А.М. Федосеев
М.А. Федосеев

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано Комитетом по высшей школе Министерства науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматическое управление электроэнергетическими системами»

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1992

ББК 31.27-05
Ф 34
УДК 621.316.925(075.8)

Рецензенты: кафедра автоматизированных электрических систем Рижского политехнического института, кафедра электрических станций Новочеркасского политехнического института

Федосеев А. М., Федосеев М. А.

Ф 34 Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1992.—528 с.: ил.

ISBN 5-283-01171-2

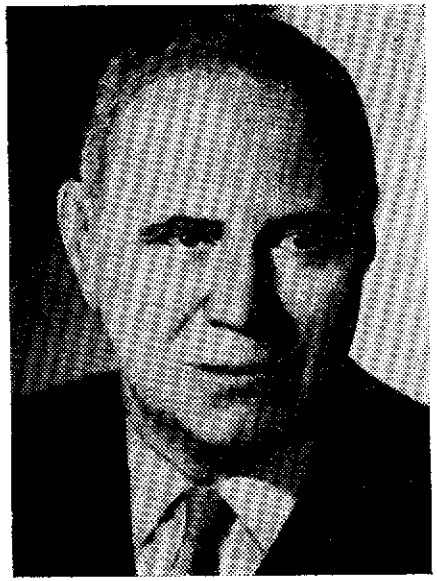
Рассматриваются основы техники релейной защиты трехфазных систем напряжением выше 1 кВ; общие принципы защиты, защиты линий, шин, генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов и двигателей. 1-е издание вышло в 1976 г., во 2-е внесены методические изменения, в нем также рассмотрены новые принципы осуществления защит.

Для студентов по специальности «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», может быть полезна студентам других электроэнергетических специальностей.

Ф [illegible] 105-91 ББК 31.27-05

[illegible] 5-283-01171-2

© Авторы, 1992



Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Ленинской и Государственной премий Алексей Михайлович Федосеев — виднейший советский ученый в области релейной защиты и автоматизации энергосистем, доктор технических наук, профессор.

В 1929 г. после окончания МВТУ А. М. Федосеев был направлен в проектный отдел Энергостроя. Здесь он создал коллектив высококвалифицированных специалистов для проектирования и разработки релейной защиты и автоматики электрических станций, подстанций и сетей высокого напряжения (СРЗиУ), работой которого руководил более 35 лет в Теплоэлектропроекте, а затем в Энергосетьпроекте. Там были заложены основы теории релейной защиты и системной автоматики, а впоследствии — устойчивости и моделирования. Под руководством А. М. Федосеева СРЗиУ ТЭП вскоре стал одним из основных научно-исследовательских центров Союза в области техники релейной защиты. В СРЗиУ разрабатывались и решались теоретические и практические задачи по созданию новых устройств релейной защиты, методов их расчета, был разработан комплекс устройств релейной защиты и автоматики для первой в Союзе электропередачи сверхвысокого напряжения.

Большой личный вклад внес Алексей Михайлович в разработку вопросов надежности релейной защиты, а также в создание защит ЛЭП сверхвысокого и ультравысокого напряжений на интегральных микросхемах. Около 60 лет вел А. М. Федосеев педагогическую и научную работу в МЭИ, где в 1942 г. при его непосредственном участии была создана кафедра релейной защиты и автоматизации энергосистем. С 1961 по 1973 г. он был деканом электроэнергетического факультета.

А. М. Федосеев — автор многочисленных статей, монографий, учебников, посвященных теории и практике релейной защиты. Значительная часть его трудов переведена и издана за рубежом. Ценным вкладом в электротехническую литературу явилась книга А. М. Федосеева «Основы релейной защиты». В 1976 г. им был издан учебник для вузов «Релейная защита электрических систем».

Трудами А. М. Федосеева создана отечественная школа специалистов по релейной защите. Его деятельность в качестве председателя советского национального технического комитета по релейной защите МЭК и СИГРЭ способствовала подтверждению высокого научного уровня отечественной техники релейной защиты в этих международных организациях. А. М. Федосеев вел большую общественную работу: возглавлял Научно-техническую комиссию по релейной защите в ГКНТ СССР, был председателем Московского правления ВНТОЭ, членом Всесоюзного Совета НТО, много лет был членом редколлегии журнала «Электричество».

Алексей Михайлович — всесторонне одаренный человек, имевший огромный авторитет у специалистов-релейщиков и многих энергетиков, он был исключительно скромным, неизменно доброжелательным и отзывчивым. Для многих своих учеников и коллег он был примером мудрости, необычайной преданности любимому делу, огромной работоспособности, настойчивости в достижении цели.

Настоящий учебник обобщает многолетний опыт талантливого инженера, ученого и педагога и несомненно будет способствовать формированию высококвалифицированных специалистов.

Зав. кафедрой релейной защиты и автоматики энергосистем МЭИ, доктор техн. наук, проф. В. П. МОРОЗКИН

Старший научн. сотрудник института Энергосетьпроект, лауреат Ленинской премии, канд. техн. наук В. М. ЕРМОЛЕНКО

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Изложение основ курса в сжатом объеме учебника становится все более трудным вследствие усложнения решаемых релейной защитой задач, обусловленных внедрением все более высоких напряжений электропередач, увеличением мощности машин со все более интенсивным использованием в них активных материалов, с внедрением более прогрессивных элементных баз (например, микропроцессорной) для осуществления защит, усложняющих, однако, изучение последних. В результате появился ряд книг, монографий даже по отдельным защитам, которых в курсе, охватывающем все разделы этой области техники, очень много.

Техника релейной защиты оформилась в самостоятельное научное направление со своими научными основами, мало изменяющимися при переходе от одной элементной базы к другой, со своими принципами, закладываемыми в выполнение защит.

Поэтому в данном учебнике, учитывая установленный для него объем, кратко рассматриваются только принципы выполнения защит и их свойства на базе соотношений электрических величин при повреждениях и ненормальных режимах работы, для реагирования на которые эти защиты предусматриваются.

Авторы полагают, что значение данного в книге основного материала обязательно для всех студентов, решивших посвятить в дальнейшем себя работе в трудной, но интересной области техники — релейной защите. Более подробное изучение защит должно осуществляться в счет часов дополнительных курсов. Материал в книге изложен так, чтобы студенты изучали в первую очередь принципы защит, а не выполнение отдельных устройств, которые могут довольно часто модернизироваться или вообще заменяться новыми, и на базе исторического развития техники умели критически оценивать ее существующие формы и по возможности

готовиться к работе по дальнейшему совершенствованию защит. В учебнике приводятся краткие данные о вкладе отдельных (преимущественно отечественных) специалистов в развитие техники защиты, причем отмечаются в основном те, кто внес вклад в развитие собственно принципов выполнения защит. Для сокращения списка литературы в него включены только книги и монографии, характеризующие этапы развития техники защиты или необходимые для более глубокого изучения вопроса. Ссылки на статьи даны в исключительных случаях, если соответствующего материала нет в книгах.

Настоящее, второе, издание учебника, в значительной мере переработанное по сравнению с первым, составлено в соответствии с уточненной программой курса для специальности 21.04.

Тяжелая болезнь и смерть оборвали работу А. М. Федосеева над учебником. Глубокая признательность выражается зав. кафедрой «Релейной защиты и автоматизации энергосистем» МЭИ доктору техн. наук, проф. В. П. Морозкину и всему коллективу кафедры за дружескую помощь, оказанную в процессе работы над книгой, а также рецензентам зав. кафедрой «Автоматизированные электрические системы» РПИ А. С. Саухатасу, проф. Л. Б. Паперно, доценту Л. А. Орехову и особенно зав. кафедрой «Электрические станции» НПИ доктору техн. наук, проф. В. В. Платонову и коллективу кафедры за ценные замечания и полезные предложения, использование которых помогло улучшить учебник.

Все пожелания по улучшению учебника просьба направлять в адрес издательства: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

БПИ — Белорусский политехнический институт

ВЗПИ — Всесоюзный заочный политехнический институт им. С. Орджоникидзе

ВНИИР — Всесоюзный научно-исследовательский институт релестроения

ВНИИЭ — Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики

ЕрПИ — Ереванский политехнический институт

ИЭИ — Ивановский энергетический институт им. В. И. Ленина

ИЭД АН УССР — Институт электродинамики Академии наук УССР

Лаборатория им. А. А. Смурова — лаборатория высоких напряжений при ЛЭТИ — Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина)

ЛПИ — Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Льв.ПИ — Львовский политехнический институт

МВТУ — Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана (ныне ГТУ — Государственный технический университет)

МЭИ — Московский энергетический институт; кафедра РЗиА МЭИ — его кафедра релейной защиты и автоматизации энергосистем

МЭК — Международная электротехническая комиссия

НИИПТ — Научно-исследовательский институт постоянного тока

НПИ — Новочеркасский политехнический институт им. С. Орджоникидзе

НЭТИ — Новосибирский электротехнический институт

РПИ — Рижский политехнический институт им. В. И. Ленина и его проблемная лаборатория

СИГРЭ — Международная конференция по большим электрическим системам

Союзтехэнерго — Производственное объединение по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей (ранее ОРГРЭС)

СРЗиУ ТЭП — Сектор релейной защиты и устойчивости с его лабораториями института «Теплоэлектропроект» (позднее ЭСП)

ТПИ — Томский политехнический институт им. С. М. Кирова

УПИ — Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова

ХЭМЗ — Харьковский электромеханический завод

ЧГУ — Чувашский государственный университет

ЧПИ — Челябинский политехнический институт

ЧЭАЗ — Чебоксарский электроаппаратный завод

ЭНИН — Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского

ЭСП — Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Энергосетьпроект»

ВВЕДЕНИЕ

В.1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

При проектировании и эксплуатации любой электроэнергетической системы приходится считаться с возможностью возникновения в ней повреждений и ненормальных режимов работы. Ниже рассматриваются электрические трехфазные системы переменного тока с $U_{ном} > 1$ кВ. Наиболее распространенными и в то же время наиболее опасными видами повреждений в них являются короткие замыкания (КЗ). Одним из основных видов ненормальных режимов работы являются перегрузки. В перегруженном элементе возникают токи, превосходящие длительно допустимые для него значения. Температура токоведущих и других частей может при этом недопустимо повышаться, сами они деформироваться, а их изоляция ускоренно изнашиваться или даже разрушаться.

Повреждения и ненормальные режимы работы могут приводить к возникновению в системе *аварий,* под которыми обычно понимаются вынужденные нарушения нормальной работы всей системы или ее части, сопровождающиеся определенным недоотпуском энергии потребителям, недопустимым ухудшением ее качества или разрушением основного оборудования.

Первопричины возникновения аварий бывают весьма разнообразными, но в большинстве своем являются результатом своевременно не обнаруженных и не устраненных дефектов оборудования, неудовлетворительных проектирования, монтажа и эксплуатации. Плановое хозяйство нашей страны, в котором огромное значение имеет энергетика, требует бесперебойного электроснабжения потребителей. Поэтому следует стремиться работать безаварийно. Предотвращение возникновения аварий или их развития при повреждениях в электрической части энергосистемы часто

может быть обеспечено путем быстрого отключения поврежденного элемента.

По условиям обеспечения бесперебойной работы неповрежденной части системы и уменьшения размеров повреждения оборудования время отключения КЗ должно быть по возможности малым, часто это десятые, а иногда и сотые доли секунды. Необходимо также иметь в виду, что КЗ в любом месте системы ввиду взаимосвязанности всех ее элементов в той или иной мере немедленно отражаются на работе значительной ее части. Совершенно очевидно, что дежурный персонал не в состоянии в требуемое малое время отметить возникновение КЗ, выявить поврежденный элемент и дать сигнал на отключение его выключателей. Поэтому электрические установки снабжаются автоматически действующими устройствами — **релейной защитой** или предохранителями (последние преимущественно в системах с $U_{ном}<1$ кВ), осуществляющими защиту от повреждений и некоторых ненормальных режимов работы.

Основным назначением релейной защиты является автоматическое отключение поврежденного элемента (как правило, при КЗ) от остальной, неповрежденной части системы при помощи выключателей. Таким образом, она является одним из видов противоаварийной автоматики систем. Важность этого вида автоматики определяется тем, что без нее вообще невозможна бесперебойная работа электроэнергетических установок. Следует отметить, что некоторые виды повреждений, например однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, непосредственно не нарушают работу системы. В таких случаях часто допускают действие защиты только на сигнал.

Дополнительным назначением релейной защиты является необходимость ее реагирования на опасные ненормальные режимы работы элементов системы. В зависимости от их вида и условий эксплуатации установки (например, наличия или отсутствия постоянного дежурного персонала) защита действует на сигнал или отключение выключателей тех элементов, оставлять которые на некоторое время в работе нежелательно или даже недопустимо, так как это может привести к возникновению повреждения или аварии. Релейную защиту, которая должна реагировать на ненормальные режимы работы, часто целесообразно выполнять не быстродействующей, как защиту от КЗ, а с определенной выдержкой времени.

Название «релейная защита» появилось в ряде стран в связи с тем, что рассматриваемый вид противоаварийной автоматики начал осуществляться с использованием электромеханических аппаратов, названных *реле*. В дальнейшем этот термин получил всеобщее признание и был узаконен в Международном электротехническом словаре, сыгравшем большую роль в становлении отечественной терминологии.

Впервые реле было разработано и построено русским ученым П. Л. Шиллингом в 1830—1832 гг. Оно составляло существенную часть вызывного прибора в изобретенном им телеграфе. Реле было сконструировано в 1835 г. физиком Генри. Аппарат получил применение в телеграфии, в связи с чем, по-видимому, и получил наименование

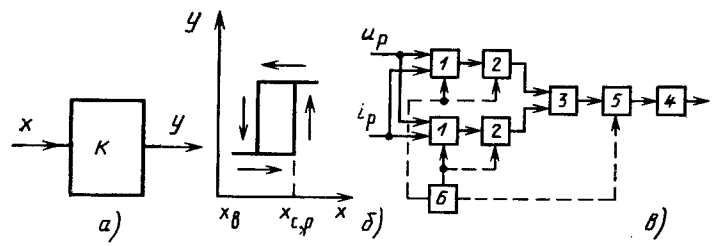


Рис. В.1. Действие (*а*), релейная характеристика (*б*) и функциональные части реле (*в*)

«реле» (французское слово relais в первоначальном смысле соответствовало русским выражениям «перекладные лошади», «почтовая станция, где стояли сменные лошади»).

В технике релейной защиты под термином *реле* в соответствии с ГОСТ обычно понимают автоматически действующий аппарат, предназначенный при заданном значении воздействующей величины, характеризующей определенные внешние явления, производить скачкообразное изменение в электрических цепях управления или сигнализации. Реле, применяемые для осуществления защит, обычно имеют электрические воздействующие величины и называются электрическими. Рисунки В.1, *а* и *б* иллюстрируют работу электрического реле: при определенном значении воздействующей величины $x=x_{с.р}$ (например, тока *1* в защищаемом элементе), обусловливающем срабатывание реле, скачком изменяет свое значение выходной сигнал y; при возврате реле ($x=x_в$) сигнал y принимает первоначальное значение.

В соответствии с ГОСТ электрические реле имеют пять основных функциональных частей (рис. В.1, *в*): воспринимающую *1*, преобразующую *2*, сравнивающую *3*, исполнительную *4* и замедляющую *5*. В реле, реагирующих более чем на одну величину, может иметься несколько

однотипных частей. В предположении, что реле используют непрерывную форму получаемой информации, в воспринимающей части непрерывные воздействующие величины превращаются в непрерывные величины, удобные для дальнейшего использования; в преобразующей — род тока, характер изменения во времени или вид энергии преобразуется в удобный для сравнения; в сравнивающей производится сравнение преобразованных величин и обеспечивается дискретная величина на выходе; в исполнительной усиливаются дискретные сигналы и она (у электромеханических реле — контакт) обеспечивает скачкообразное изменение состояния управляемых электрических цепей; в замедляющей обеспечивается требуемая выдержка времени. Кроме перечисленных реле могут иметь и дополнительные функциональные части, например задающие *6*, в которых производятся определенные настройки. Перечисленные функциональные части не всегда имеют отдельное конструктивное оформление. Нередко несколько таких частей органически сочетаются и входят в реле в неявном виде (например, у электромеханических реле). Необходимо также отметить, что в последние годы появились реле, использующие дискретную входную информацию, преобразующие непрерывную информацию в дискретную и т. д. Для таких реле приведенные определения нуждаются в уточнении.

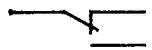
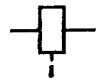
Существует много способов классификации реле. Они для электроустановок с $U_{ном}>1$ кВ могут быть, например, классифицированы как: *электромеханические* — с подвижными элементами и *статические* — без подвижных элементов; *максимальные* и *минимальные* — срабатывающие при увеличении или соответственно уменьшении воздействующей величины; *тока, напряжения, направления мощности, измерительные* и *логические* и т. д. (измерительные — по роду величины, вызывающей срабатывание).

Первоначально реле выполнялись электромеханическими. В дальнейшем все большее применение получают статические реле (преимущественно полупроводниковые). В настоящее время релейная защита начинает выполняться с использованием микропроцессорной техники; при этом основными элементами защиты являются уже не реле, а микропроцессоры — управляемые интегральные микросхемы с программами, закладываемыми в их запоминающее устройство. Защиты с микропроцессорной элементной базой могут быть названы микропроцессорными или программными. Однако при любой элементной базе научные основы рассматриваемой области техники остаются неизменными, сохраняются и многие основные принципы выполнения защит. Поэтому за данной областью техники целесообразно сохранить название *техника релейной защиты.*

В табл. В.1 приведены примеры обозначений реле и их частей.

Способы выполнения защит весьма разнообразны. Однако все они обычно строятся на электрических принципах, выполняются в

Таблица В.1

Виды реле и вспомогательных элементов и их кодовые обозначения		Виды контактов реле, их обмоток и некоторых элементов	
Вид	Код	Вид контакта	Обозначение
Реле	*K*	Замыкающий	
Реле тока	*KA*	Замыкающий с замедлением при срабатывании	
Реле тока с выдержкой времени	*KAT*		
Реле напряжения	*KV*	Замыкающий с замедлением при возврате	
Реле направления мощности	*KW*		
Реле сопротивления	*KZ*	Размыкающий	
Реле промежуточное	*KL*	Размыкающий с замедлением при срабатывании	
Реле указательное	*KH*		
Реле времени	*KT*	Размыкающий с замедлением при возврате	
Реле положения «отключено»	*KQT*		
Реле положения «включено»	*KQC*	С переключением	
Реле тока с торможением	*KAW*	Замыкающийся кратковременно	
Фильтр	*Z*		
Фильтр тока	*ZA*	Размыкающий с дугогашением	
Фильтр напряжения	*ZV*	Обмотка одиообмоточного реле	
Частотный фильтр	*ZF*	Обмотки двухобмоточного реле	
Электромагнит отключения	*YAT*		
Плавкий предохранитель	*F*	Электромагнит отключения	
Кнопка управления	*SB*		

Примечания: 1. Статические реле осуществляют управление не контактами, а электрическими сигналами.

2. Контакты реле изображаются для «обесточенного» состояния обмоток последних, показывать контакты после срабатывания реле ГОСТ не предусматривается.

3. Коды, принятые для реле, ниже (например, в гл. 2) используются также для органов защиты.

большинстве случаев автономными устройствами и имеют в общем случае две главные части (рис. В.2) — измерительную и логическую.

Измерительная часть, включающая измерительные органы, непрерывно контролирует состояние защищаемого объекта и определяет условия срабатывания в соответствии со значениями входных воздействующих величин. Логическая часть, включающая логические органы, формирует управляющие воздействия в зависимости от комбинации и последовательности поступления на нее сигналов от измерительной части. Обычно логическая часть действует на выключатели не непосредственно, а через исполнительный орган. Измерительная часть, как правило, получает информацию о токах и напряжениях в месте включения защиты через первичные измерительные преобразователи — трансформаторы тока и напряжения (*ТА* и *TV*).

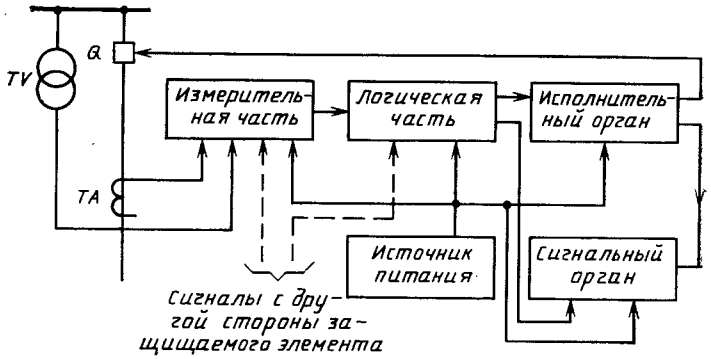


Рис. В.2. Структурная схема автономной защиты

Для продольных защит их измерительные или логические части получают информацию также с другой стороны защищаемого элемента, с другой электроустановки по вспомогательным проводам или специальным каналам связи. Для поперечных защит основные части защиты получают информацию от других элементов, присоединенных к общим шинам, по вспомогательным проводам в пределах общей для них электроустановки.

Дополнительно в защите предусматриваются сигнальные органы, дающие сигналы о срабатывании устройства защиты в целом, а в ряде случаев и отдельных его частей, а также иногда и специальные устройства для их проверки. Учитывая изложенное, в защиту в более широком смысле включают также вторичные цепи *ТА* и *TV*, каналы связи, а также цепи оперативного тока (питания и отключения) и другие вспомогательные устройства.

Бесперебойная работа электроэнергетических систем обеспечивается применением как релейной защиты, так и ряда других устройств противоаварийной автоматики. Работа многих из этих устройств связана с работой релейной защиты; все они входят в кибернетическую систему управления электроэнергетической системой при нарушениях ее нормальных режимов работы.

В.2. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Как известно, в 1888 г. выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский, которому принадлежит много работ и изобретений в разных областях электротехники, изобрел систему трехфазного тока. Вскоре под его руководством впервые в мире была осуществлена передача электрической энергии токами достаточно высокого напряжения (8,5 кВ) на большое расстояние. Это было важным событием в истории электроэнергетики, и системы трехфазного тока вскоре получили широчайшее применение. Их эксплуатация, как и других электрических систем, была невозможна без защит от электрических повреждений, наиболее распространенными и опасными из которых, как указывалось выше, являются КЗ.

В электрической системе КЗ в большинстве случаев сопровождаются возрастанием тока. Поэтому первыми появились токовые защиты, действующие в случае, когда ток в защищаемом элементе превышает заранее установленное значение. Токовые защиты могут выполняться плавкими предохранителями или реле. Плавкие предохранители использовались для защиты первых электроэнергетических установок еще в конце прошлого века. В скором времени они в ряде случаев перестали удовлетворять своему назначению и стали заменяться устройствами, основными элементами которых были электромагнитные реле тока. Однако конструкции плавких предохранителей совершенствуются, и они продолжают с успехом использоваться не только в системах напряжением ниже 1 кВ, но также и в распределительных сетях более высоких напряжений.

Широкое применение для защиты реле получают в начале XX столетия. В 1901 г. появляются индукционные реле, построенные на базе индукционных измерительных механизмов, предложенных и разработанных также М. О. Доливо-Добровольским. В 1905—1908 гг. разрабатываются дифференциальные токовые защиты. С 1910 г. начинают применяться токовые направленные защиты; к этому же времени относятся попытки выполнения дистанционных реле (реле сопротивления), завершившиеся выпуском в начале 20-х годов дистанционных защит.

К 20-м годам относится также выпуск первых обобщающих пуб-

ликаций по релейной защите, выполняемой на электромеханнческой элементной базе. К нним, в частности, относятся книга под редакцией немецкого электротехнника Р. Рюденберга, перевод которой на русскнй язык был выпущен в 1930 г. В 30-х годах была опубликована на ту же тему более глубокая по содержанию книга под редацней М. Шлейхера, напнсанная с участнем Нейгебауера.

В 1923—1928 гг. появляются первые попыткн по использованню для защиты электроникн, в частности токов высокой частоты, передаваемых по проводам защищаемых лнний. В 1932 г. появнлась работа известного французского электротехника Фаллю по распространенню высокочастотной энергни по линиям электропередачн и описаине защиты с наложеннымн иа линню токамн высокой частоты. В 1934 г. былн опублнкованы результаты разработок на электронных лампах реле разлнчного назначення (R. Widerol). В этн же годы в Советском Союзе была разработана на электронных лампах дистанцнонниаи защита. Однако на практнке онн распространения не получили; единственным, вероятно, нсключением было многолетиее использование ламповых прнемопередатчнков в каналах для передачи высокочастотных сигналов по проводам защнщаемых линий для осуществления быстродействующнх защит.

Более перспективным оказалось применение полупроводников (меднозакнсных н селеновых выпрямнтелей), начатое также еще в 30-е годы для выполнения реле, работающих на выпрямленных токах. Дальнейшее развнтие это направлеине получило в конце 40-х годов, когда стало возможным прнменение германиевых и кремниевых диодов и транзисторов. В последующне годы в Советском Союзе и за рубежом разрабатывалнсь н выполнялись с использованием полупроводников как отдельные бесконтактные реле н устройства, так н защиты в целом. Опыт выполнения и эксплуатацин такнх защит иесмотря на ряд возннкающих трудностей оказался безусловно положительным. Однако надежды, возлагавшиеся иа полупроводниковые защиты по потребляемым мощностям и связанным с нним чувствительностям, оправдались не полностью. Выявнлась также их относительно невысокая надежиость, обусловленная недостаточной стабильностью параметров и иалнчнем весьма большого количества внешних соединений между отдельными функциоиальнымн элементамн защнты.

Положение с применением для защиты полупроводниковой элементной базы существенно изменилось в 60-е годы после разработки и начавшегося внедрения в разные области интегральной мнкроэлектроники со все возрастающей степенью нитеграцни, когда в одном кристалле удается «упаковывать» очень большое чнсло микроэлементов (резисторов, кондеисаторов, триодов и т. д.). Поэтому в настоящее время как у нас, так и за рубежом разработаны и начинают широко внедряться защиты, использующие микроэлектронную элементную базу. Такие защиты с прнмененнем средств диагностнки обладают высокой надежностью и потребляют небольшне мощиости от трансформаторов тока и напряжения. Практнчески этн мощности определяются только потерямн в соединнтельных проводах между измерительными преобразователями н устройствами защнты н в устройствах сопряжения между ними. В связи с этим актуальнымн являются вопросы нспользоваиия новых, более облегченных исполнений измерительных преобразователей с передачей информацин от них к устройствам защиты по каналам с малыми потерями мощности, обладающим хорошей помехозащищенностью.

Применяемые в настоящее время устройства защиты на микроэлектронной элементной базе обычно осуществляются с использованием полупроводниковых аналоговых операционных усилителей н логических элементов. Возможны также выполнения защит на цифровой микроэлектронной базе.

Отдельно следует остановиться на возможностях использования для осуществления реле и защит в целом нелинейных свойств ферромагнитных сердечнников.

В нашей стране во ВНИИЭ (И. Н. Попов) н за рубежом был разработан ряд устройств релейиой защиты на базе магнитных усилителей. Одиако развитие полупроводниковой техники сделало их в общем случае неконкурентоспособными из-за большой инерционности и существенно худших массогабаритных параметров. Необходнмо, однако, отметить, что в Советском Союзе в 50-е годы в НПИ (А. Д. Дроздов и др.) на базе теории цепей с ферромагнитнымн сердечниками были разработаны достаточно простые реле с подмагничиванием переменным током промышленной частоты. Такие реле получили реализацию в основном для осуществления дифференциальиых токовых защит электрических машин (трансформаторов, генераторов) и в различных модификациях используются на практике до сих пор.

В настоящее время в разиых областях начинает получать широкое применение микропроцессорная техника, в основе которой находятся микропроцессоры. Это перспективное направление начинает применяться и для осуществления релейной защнты, которая реалнзуется, как указывалось выше, уже не с помощью реле, а в внде программ, закладываемых в память микроЭВМ или микропроцессорных систем.

Принципиально представлялось бы весьма целесообразным такое выполнение защит от повреждений, при котором они могли бы не только фиксировать происшедшее повреждение, но и выявлять намечающееся. Практически в большинстве случаев выполнять такие защиты затрудинтельно или даже невозможно (например, защиту от КЗ, происшедшего вследствие грозового разряда). К этому, одиако, необходимо стремиться.

Обычно для действин защит используют токн н напряжения про-

мышленной частоты защищаемых элементов. Иногда, однако, оказывается целесообразным применять электрические величины волновых процессов, гармонические, колебательные (знакопеременные) и апериодические составляющие переходного режима, а также наложенные токи повышенной, пониженной частоты и наложенный постоянный ток. Так, например, для осуществления защиты линий сверхвысоких напряжений от КЗ в разработках ЭНИН используются электрические величины при волновых процессах, возникающих в момент появления повреждения [59].

Отечественная техника релейной защиты практически начала развиваться только после Октябрьской революции при претворении в жизнь плана ГОЭЛРО.

Основными научно-исследовательскими центрами в 30-е годы были лаборатория высоких напряжений им. А. А. Смурова, СРЗиУ ТЭП, ХЭМЗ, ОРГРЭС и крупнейшие энергетические системы — Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго и др. Начали активно включаться в работу и кафедры втузов — ТПИ, НПИ, ЛЭТИ, ЛПИ, МЭИ и др.

Лабораторней им. А. А. Смурова под руководством В. И. Иванова и П. И. Рыжова проводились разносторонние исследования и разработки. Особо следует отметить работы по переходным процессам в цепях защит, по защитам генераторов и высокочастотным защитам линий высокого напряжения (Е. А. Карпович и др.).

Большая работа по созданию схем защит и разработке методов расчета их параметров, а также по их типизации проводится СРЗиУ ТЭП, начавшим с начала 30-х годов систематическую разработку, а с 1932 г. — и выпуск отдельными разделами «Руководящих указаний по релейной защите» (РУ) под руководством Л. Е. Соловьева, обеспечившего их высокое научное качество и авторитет. Необходимо отметить, что уже первые разделы РУ давали более конкретные указания по выбору и проектированию релейной защиты, чем зарубежные работы аналогичного типа. После Л. Е. Соловьева эта работа в течение многих лет возглавлялась А. Б. Черниным. Необходимо отметить, что А. Б. Черниным или под его руководством был выполнен также ряд исследований по расчетам электромагнитных переходных процессов и были составлены два раздела руководящих указаний по ним.

Электроцехом ОРГРЭС, созданным в 1933 г., разрабатывались методы испытаний реле и защит, проводились исследования машинного оборудования при ненормальных режимах работы, осуществлялись наладка и включение в работу релейных защит на новых электростанциях. Большое значение имели при этом начатые в СРЗиУ ТЭП работы И. А. Сыромятникова, впоследствии крупнейшего электроэнергетика, по режимам работы двигателей и их защите, давшие возможность коренным образом повысить надежность работы собственных нужд электростанций и потребителей.

На ХЭМЗ коллективом под руководством Ф. А. Ступеля осуществлялось конструирование и производство многочисленных новых типов реле и защит.

Персоналом служб релейной защиты электроэнергетических систем проводилась большая работа по внедрению новых защит, реконструкции существующих, повышению уровня их эксплуатации и созданию новых устройств.

К рассматриваемому периоду относится также появление многих оригинальных обобщающих трудов советских авторов по вопросам защиты, первым из которых является книга В. И. Иванова (1932 г.). Первая специальная книга о реле защиты была выпущена в 1941 г. Ф. А. Ступелем. Важными для теории релейной защиты явились труды Н. Н. Щедрина и Н. Ф. Марголина по исследованию переходных электромагнитных процессов в электрических системах.

В годы Великой Отечественной войны советские релейщики в исключительно тяжелых условиях неустанно работали по совершенствованию защиты и повышению уровня ее эксплуатации. Большое значение в этих направлениях имели работы И. И. Соловьева и возглавлявшегося им коллектива релейщиков Мосэнерго. И. И. Соловьев, плодотворно работая и далее в области релейной защиты, сыграл также большую роль в разработке вопросов автоматизации систем и в воспитании кадров молодых специалистов.

Послевоенные годы характеризуются дальнейшим быстрым развитием техники релейной защиты, ставшим возможным благодаря деятельности организаций как вновь созданных (ЧЭАЗ, ВНИИЭ, ВНИИР), так и работавших в рассматриваемом направлении ранее (Техуправление Минэнерго, СРЗиУ ТЭП, ИЭД АН УССР, ЭНИН, ОРГРЭС, энергетические системы — Мосэнерго, Ленэнерго, Челябэнерго, Днепроэнерго и др. и высшие учебные заведения — НПИ, МЭИ, РПИ, УПИ, ЛПИ, ТПИ и др.).

Серьезным испытанием для советских релейщиков явилось в этот период создание новых оригинальных защит для сооружавшихся электропередач 400—500 кВ. С этой сложной задачей они успешно справились. Особо в решении этой проблемы следует отметить роль СРЗиУ ТЭП (В. М. Ермоленко, С. Я. Петров и др.), ВНИИЭ (М. И. Царев, Е. Д. Сапир и др.), ЧЭАЗ (А. В. Буйлов, А. М. Бреслер, Г. Ф. Эдельштейн и др.) и служб эксплуатации (Н. В. Чернобровов и др.).

К этому периоду относится также опубликование ряда обобщающих трудов Г. И. Атабекова, В. Л. Фабриканта, А. Б. Чернина, А. Д. Дроздова, И. М. Сироты и др. [1—8]. Г. И. Атабеков был одним из первых, кто добивался быстрейшего внедрения полупроводников в отечественную технику релейной защиты.

В наступивший период значительно возросла по сравнению с до-

военным уровнем роль коллективов высших учебных заведенн в разработке новых вопросов техники релейной защиты.

Так, например, в НПИ под руководством А. Д. Дроздова образовался сильный коллектив (В. В. Платонов, А. С. Засыпкин, Э. В. Подгорный и др.), разрабатывавший вопросы создания устройств на базе теории цепей с ферромагнитными сердечникамн н исследовавший работу электромагнитных трансформаторов тока н напряжения в переходных режимах, поведение защит прн бросках тока намагничивания силовых трансформаторов, защит, последних н некоторые другие. В РПИ была создана проблемная лаборатория по использованию полупроводников в технике релейной защиты, которая под руководством В. Л. Фабриканта, ранее работавшего в СРЗиУ ТЭП, выполняла ряд полезных исследований и разработок совместно с кафедрой автоматизнрованных электрнческих систем того же института (А. С. Саухатас, Л. А. Орехов, Л. Б. Паперно н др.). Необходимо отметить большой вклад В. Л. Фабриканта в создание как законченной теорни построения измерительных органов релейной защиты применительно к выполиению органов на электромеханической элементной базе [3], так и теории, охватывающей ряд важных вопросов осуществления органов на полупроводниковой базе [4]. В. Л. Фабрикантом создана также общая теория построения пассивных фильтров симметричных составляющих [5]. В УПИ под руководством В. Е. Полякова проводились полезные исследования и разработки по примеиению аппарата математической логики в технике релейной защиты. На кафедре РЗиА МЭИ разрабатывались вопросы защиты линий электропередачи постоянного тока высокого и сверхвысокого напряжений под руководством В. М. Мараичака (В. Н. Новелла и др.), защиты линий переменного тока высокого и сверхвысокого напряжений (В. Г. Дорогунцев и др.), принципы построения защит с ТА и TV на цифровой базе (В. Е. Казанский, Я. Л. Арцишевский). В ЛПИ под руководством Г. М. Павлова (В. К. Ванин и др.) начали развертываться работы по использованию для защиты элементов диалоговой вычислительной техиики. В ИЭД АН Украины (И. М. Сирота, Б. С. Стогний) проводятси разработки оригииальиых защит от замыканий иа землю в генераторах и сетях, новых типов ТА с разрезными сердечниками.

В последние годы научно-исследовательская деятельность в области релейной защиты у нас сосредоточена в основном во ВНИИЭ, ВНИИР, ЭСП, НПИ, МЭИ, РПИ, ИЭД АН УССР, УПИ, ЛПИ, БПИ, ЭНИН, Коми филиала АН РФ, НЭТИ, ИЭИ, ТПИ, ЧЭАЗ, ряде других вузов и организаций (например, в Тяжпромэлектропроекте, Союзтехэнерго) и в некоторых энергетических системах. При этом следует особо подчеркнуть высокую квалификацию и творческую инициативу работников эксплуатации, которые под руководством ЦДУ ЕЭС СССР и главного научно-технического управления Миизнерго миого сделали для повышения уровня техники релейной защиты. В связн с этим следует отметить большую творческую работу коллектнва лабораторин релейной защиты ВНИИЭ, ивляющейся головной научной органнзацией главного научно-технического управления Минэнерго.

Завершаются исследования и разработки защит на интегральной мнкроэлектронной элементной базе и промышленностью (ЧЭАЗ) начат серийный выпуск этих защит в шнрокой номенклатуре. Развернуты начатые много раньше перспективные работы по созданию и введению в опытную эксплуатацию программных защнт с использованием микропроцессорной техники в МЭИ, ВНИИЭ, Коми фнлиале АН РФ, ИЭД АН Укранны (соответственно под руководством В. П. Морозкина, Я. С. Гельфанда, Н. А. Манова, Б. С. Стогния), БПИ (В. Н. Новаш) и других организациях.

Большие н сложные задачи перед релейщиками были поставлены при проектированни, сооружении и введении в эксплуатацию линий электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжений. Эти задачи при определяющем участин ЭСП, ВНИИР, ВНИИЭ и ЦДУ ЕЭС были успешио решеиы. При этом следует особо отметить образование за последние десятилетия во ВНИИР весьма сильного коллектива релейщиков (Ю. Н. Алимов, Г. С. Нудельмаи, Э. М. Шиеерсон и др.) и способиость ВНИИР совместно с ЧЭАЗ решать весьма сложные вопросы релестроеиия. Был также опубликован ряд обобщающих работ [8, 17, 44, 48, 51 и некоторые другие] советских авторов.

Необходимо отметить, что техиика релейной защиты за последние десятилетия интенсивно развивалась и за рубежом, особенно в США, Японии, Франции, Англии и ФРГ, причем выпускаемая в этих странах аппаратура обычно отличается высокими технологической отработкой и надежностью. Опубликовано большое число научно-технических трудов, преимущественно в периодических изданиях, в частности фирменных. Из обобщающих трудов прошлых лет в первую очередь должны быть названы книги Варрингтона (Великобритания) и Нейгебауера (Германия) [18, 19], а также Цидановича (Польша) [50], Клеменца и Роте (б. ГДР) [35].

Вопросы для самопроверки

1. Кто изобрел систему трехфазного тока?
2. Сформулируйте назиачение релейной защиты.
3. Какие основные элементные базы используются в технике релейной защиты?
4. Объясните термии «реле».

Глава первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

1.1. ФУНКЦИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЕЕ СВОЙСТВАМ

Релейная защита от КЗ обычно выполняется в виде автономных устройств, включаемых на элементах электрической системы, реагирующих на КЗ в заданных зонах и действующих на выключатели этих элементов (рис. 1.1).

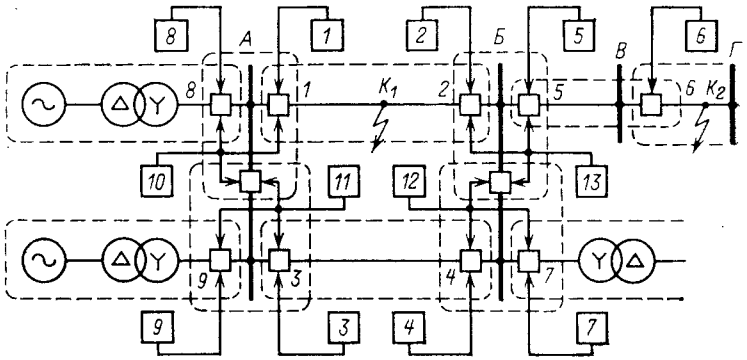


Рис. 1.1. Автономные основные защиты элемеитов системы:

1, 2, 3, 4 — цепей линии *АБ*; *5* — линии *БВ* и шии *В*; *6* — линии *ВГ*; *7* — трансформатора *Б*; *8, 9* — блоков *А*; *10, 11* — секций шин *А*; *12, 13* — секций шин *Б*

Совокупность указанных зон должна охватывать всю защищаемую систему, с тем чтобы ни одна ее точка не оказывалась незащищенной (например, соединения между трансформаторами тока и выключателями, втулки последних и т. д.). Включенный в работу (обычно обслуживающим персоналом) комплект релейной защиты начинает функционировать. Его *функции заключаются как в срабатывании при внутренних повреждениях, так и в несрабатывании в случаях внешних повреждений, а также в несрабатывании в нормальных и ненормальных режимах работы электрической системы при отсутствии в ней повреждений.* Внутренним обычно является КЗ в защищаемом элементе системы — участке линии сети, трансформаторе, генераторе и т. д. В некоторых, однако, случаях к внутренним может относиться более широкий круг КЗ, охватывающий повреждения и на смежных с защищаемым элементах; так, например, к защите может быть предъявлено требование срабатывать при КЗ на смежном элементе в случае отказа защиты или выключателя последнего. По выполняемым функциям защиты делятся на *основные и резервные*.

Основной называется защита, предназначенная для работы при всех или части видов КЗ (например, только при многофазных КЗ) в пределах всего защищаемого элемента (например, 100 % длины линии) со временем, меньшим, чем у других установленных защит.

Резервной называется защита, предусматриваемая для работы вместо основной данного элемента в случаях ее отказа или вывода из работы (*ближнее резервирование*), а также вместо защит смежных элементов при их отказе или в случаях отказов выключателей смежных элементов (*дальнее резервирование*).

Необходимо также отметить, что выше было приведено только разделение функций на три рода. Перечень же конкретных функций рассматривается при выполнении отдельных устройств защиты, причем для идеальной защиты он охватывает все КЗ и все режимы без КЗ, являясь предельным, а для реальных защит часто бывает и меньше предельного. При этом имеются повреждения и режимы, не охватываемые заданным перечнем функций, которые могут обусловливать *допущенные срабатывания и несрабатывания*, относимые к допущенным заданием (например, срабатывания при качаниях ввиду отсутствия специальной блокировки, не предусмотренной для упрощения защиты).

Выполнение заданных функций в процессе эксплуатации защиты может иногда срываться, например, вследствие погрешностей органов защиты, выхода из строя ее элементов, т. е. имеют место *отказы функционирования защиты*. Отказы делятся на *отказы срабатывания* при требуемом сраба-

тывании, *излишние срабатывания* при повреждениях с требованием несрабатывания и *ложные срабатывания* при отсутствии повреждения в системе.

Достаточно полноценное функционирование защиты обеспечивается тем, что ей придаются определенные свойства. До последнего времени широкое распространение имеют понятия, характеризующие свойства, определяемые следующими четырьмя требованиями, предъявляемыми к релейной защите от КЗ [1]: *селективностью, быстродействием, чувствительностью и надежностью.* Все эти требования плюс учет экономических факторов при правильном их понимании являются обоснованными. Однако, как показывает рассмотрение [20, 21], они не охватывают всех необходимых свойств, находятся на разных уровнях активности и поэтому были уточнены.

Свойства защиты находятся в сложной зависимости друг от друга. Поэтому полезно классифицировать их с разных позиций. При этом целесообразно использование введенного И. А. Ушаковым понятия *эффективности функционирования,* под которой можно понимать свойство выполнять предельное число функций каждую с предельным эффектом. О предельном числе функций говорилось выше. Эффект выполнения функции применительно к релейной защите снижается, например, из-за конечного времени ее срабатывания. Очевидно, что только идеализированной защите можно приписать 100 %-ную эффективность функционирования. Отказы в функционировании и допущенные срабатывания и несрабатывания приводят к тому, что реальный выходной эффект ниже предельного, свойственного идеализированной защите.

Одним из способов классификации может служить разделение свойств в соответствии с эффективностью: срабатывания при внутренних КЗ; несрабатывания при внешних КЗ; несрабатывания в режимах без КЗ. Другим подходом к классификации свойств защиты, сочетающимся с первым, может служить выделение трех следующих общих причин снижения выходного эффекта защиты:

ограниченности числа заданных функций (выражается в допущенных срабатываниях и несрабатываниях) и заданного эффекта срабатывания;

погрешностей функционирования, понимаемых более широко, чем только погрешности отдельных параметров защиты (погрешности функционирования, например, из-за большого переходного сопротивления в месте повреждения, неблагоприятного состава входных воздействующих величин в переходном процессе и т. п.);

отказов, выходов из строя элементов защиты (проявляются в отказах функционирования из-за полной или частичной утраты заданных свойств).

Каждая из трех перечисленных общих причин является проявлением неполноты соответствующего свойства. Первое, высшее по активности (высший уровень) из этих свойств представляет собой *селективность защиты,* второе, среднего уровня, может быть названо *устойчивостью функционирования* и, наконец, третье, низшего уровня, представляет собой *надежность функционирования.* Свойства высшего и среднего уровней образуют техническое совершенство защиты.

Сочетание первого и второго подходов к классификации, использованное при составлении табл. 1.1 [20.21], дает достаточно полное представление об основных свойствах защиты.

Эффективность функционирования обеспечивается всеми указанными в таблице свойствами совместно, причем определить свойство данного уровня принципиально можно только, зная полноту свойств более высокого уровня, в предположении идеальности свойств более низкого уровня. Так, техническое совершенство определяется при идеальной надежности. С другой стороны, надежность оценивается не при идеальном, а при заданном техническом совершенстве (по данному ниже ее определению).

Главными особенностями рассматриваемой систематизации основных свойств релейной защиты являются разграничение понятий технического совершенства и надежности и разделение технического совершенства в свою очередь на два уровня свойств — селективность и устойчивость функционирования.

Определения свойств даны для защит от КЗ на одном элементе. Применительно к релейной защите системы этот вопрос усложняется, в особенности когда наиболее тяжелые аварии, связанные с отказом функционирования защиты, носят [22] «цепочечный характер» и исход аварии зависит от совершенства многих аппаратов и других факторов, а не только защит поврежденного элемента.

Следует отметить, что в табл. 1.1 приведены не все, а только основные свойства защиты, которые в свою очередь обеспечиваются рядом других свойств. Так, например, в устойчивость функционирования входят точность работы ап-

Таблица 1.1

Общие названия свойств		Эффективность функционирования			
		Срабатывание при внутренних КЗ		Несрабатывание при внешних КЗ	Несрабатывание без КЗ
Техническое совершенство	Селективность	Селективность срабатывания при внутренних КЗ		Селективность несрабатывания при внешних КЗ	Селективность несрабатывания без КЗ
		Защитоспособность	Быстрота срабатывания		
	Устойчивость функционирования	Устойчивость срабатывания		Устойчивость несрабатывания при внешних КЗ (отстроенность при внешних КЗ)	Устойчивость несрабатывания без КЗ (отстроенность без КЗ)
		Чувствительность к КЗ	Устойчивость быстроты срабатывания		
Надежность функционирования		Надежность срабатывания при внутренних КЗ		Надежность несрабатывания при внешних КЗ	Надежность несрабатывания без КЗ

паратуры, помехостойкость, в надежность — безотказность, долговечность, ремонтопригодность. В связи с этим, а также и с другими причинами целесообразно дальнейшее уточнение некоторых вопросов.

Селективность. Селективностью называется высшее свойство защиты, обеспечивающее эффективное отключение только поврежденного элемента системы при КЗ его выключателями. Оно дает возможность при наличии резервирования питания потребителей исключать перерывы в их электроснабжении. Так, например, в случае КЗ на одной из параллельных линий (рис. 1.1), связывающих подстанции *А* и *Б* (точка K_1), селективно действующая защита участков линий отключает комплектами *1* и *2* только выключатели *1* и *2* поврежденной цепи и питание подстанции *Б* сохраняется по второй неповрежденной цепи. Свойство селективности не исключает возможности срабатывания защит как резервных в случаях отказа защит или выключателей смежных элементов. Так, например, при КЗ на участке *ВГ* (точка K_2) и отказе его защиты или выключателя *6* обычно как резервная срабатывает защита участка *БВ*, отключая выключатель *5*. При этом хотя и отключается неповрежденный участок *БВ*, но число подстанций, оставшихся без питания, ограничивается только двумя (*В* и *Г*).

Селективность срабатывания устройства защиты при внутренних КЗ характеризуется его защитоспособностью и быстротой срабатывания.

Защитоспособность — свойство защищать (без учета резервного действия) весь элемент при всех учитываемых видах металлических КЗ. Для линий, как правило, требуется защищать всю длину участка. Для машин и аппаратов иногда вынужденно отступают от этого требования, допуская, например, наличие некоторой доли незащищенных витков обмоток.

Быстрота срабатывания является весьма важным свойством защиты при ее срабатывании в случаях внутренних КЗ. Это определяется тем, что ускорение отключения КЗ:

повышает устойчивость параллельной работы машин в системе и дает возможность увеличивать пропускную способность электропередач;

уменьшает влияние понижения напряжения на работу потребителей;

уменьшает размеры разрушения поврежденного элемента, что особенно существенно для мощных, дорогостоящих генераторов и трансформаторов;

снижает вероятность перехода к более тяжелому виду

КЗ, сопровождаемому увеличением тока КЗ и уменьшением напряжения в сети;

повышает эффективность автоматического повторного включения;

может предотвращать возникновение недопустимых внутренних перенапряжений на электропередачах сверхвысоких напряжений.

Приведенные соображения показывают, насколько важно быстрое отключение КЗ в системе.

Время отключения повреждения t складывается из времени срабатывания защиты $t_з$ и выключателя $t_в$:

$$t = t_з + t_в. \qquad (1.1)$$

В системах сверхвысоких напряжений иногда требуется иметь $t \leqslant 0{,}06 \div 0{,}08$ с. При, например, $t_в \approx 0{,}05$ с на долю релейной защиты в этих случаях остается $t_з = 0{,}02 \div 0{,}04$ с; могут быть целесообразны и меньшие $t_з$, что при современной технике достижимо. В других, менее тяжелых случаях по технико-экономическим соображениям допустимо использовать защиты с бóльшими временами $t_з$. Большое значение имеет также быстрый возврат защит линий, необходимый для обеспечения их готовности к срабатыванию в случае вновь возникшего повреждения.

В соответствии с указанным выше и табл. 1.1 рассматриваются также селективности несрабатывания при внешних КЗ и в режимах без КЗ.

Защиты, которые по принципу действия могут срабатывать в качестве резервных при КЗ на смежных элементах с учетом селективности только при внешних КЗ, называются *относительно селективными. С абсолютной селективностью* при такой классификации оказываются защиты, которые принципиально могут срабатывать только в случаях КЗ на защищаемом элементе. Защиты с относительной селективностью в общем случае должны выполняться с выдержками времени. Защиты с абсолютной селективностью выполняются без выдержек времени.

Необходимо отметить, что на практике селективность часто понималась в более узком смысле — только как селективность несрабатывания при внешних КЗ.

Отличительной чертой свойства селективности по сравнению с устойчивостью функционирования и надежностью является возможность его 100 %-ной полноты у реальных устройств.

Устойчивость функционирования. При внешних КЗ и режимах без КЗ она определяется устойчивостью несрабатывания, которая может также рассматриваться как соответствующая отстроенность от воздействующих на защиту величин.

Чувствительность характеризует устойчивость срабатывания при КЗ в защищаемой зоне. Удовлетворение требований чувствительности в современных электрических системах часто встречает ряд серьезных затруднений. Так, например, при передаче по линиям больших мощностей на значительные расстояния токи КЗ в защите при учете возможных минимальных режимов работы станций и повреждений через значительные переходные сопротивления могут быть соизмеримы с максимальными рабочими токами или даже меньше их. Это приводит к невозможности применения в таких случаях наиболее простых защит, реагирующих на ток в месте включения защиты, и заставляет переходить на значительно более сложные и дорогие типы защитных устройств. С учетом опыта эксплуатации и уровня техники к защитам предъявляются определенные минимально необходимые требования в отношении чувствительности.

Чувствительность защит обычно оценивается их *коэффициентом чувствительности* $K_ч$. Для максимальных защит, реагирующих на величины, возрастающие в условиях повреждения (например, на ток), $K_ч$ определяется отношением минимального значения входной воздействующей величины (тока) при металлическом КЗ в защищаемой зоне к установленному на защите параметру срабатывания (соответственно току срабатывания). Для минимальных защит, реагирующих на величины, уменьшающиеся в условиях повреждения (например, на полное напряжение), $K_ч$ определяется, наоборот, отношением установленного на защите параметра срабатывания (соответственно напряжения срабатывания) к максимальному значению входной воздействующей величины (остаточного напряжения). Необходимые минимальные $k_{ч\,min}$ для различных защит и защищаемых элементов регламентированы ПУЭ, выпускавшимися Минэнерго СССР и являющимися обязательными для применения. Их значения, например, для максимальных токовых защит линий часто определяются необходимостью учета переходных сопротивлений в месте повреждения.

Устойчивость быстроты срабатывания характеризуется стабильностью срабатывания защиты по времени при внутренних КЗ. Это понятие относится в основном к защитам, работающим без выдержки времени (за-

щитам с абсолютной селективностью). При внутренних КЗ такие защиты могут работать с замедлением, например за счет переходных процессов.

Надежность. В соответствии с терминологией [23] надежность определяется как свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях эксплуатации. Под обьектом применительно к релейной защите можно понимать как систему взаимодействующих устройств релейной защиты, так и отдельные устройства и их функциональные элементы. Ниже будут рассматриваться вопросы надежности отдельных устройств защиты и систем защиты. По общим вопросам надежности опубликован ряд основополагающих трудов, в том числе отечественных [24 и др.]. Теория надежности опирается на такую фундаментальную дисциплину, как теория вероятностей. Величины, с которыми приходится иметь дело при рассмотрении вопросов надежности релейной защиты, часто являются случайными. Под случайной понимается величина, которая в результате «опыта» может принимать одно из своих возможных значений, заранее неизвестное. Случайной величиной, например, является рассматриваемое ниже время наработки защиты до отказа. Применение теории иадежности в различных областях техники требует учета ряда их особенностей, в частности в технике релейной защиты; при этом по возможности используются термины и определения [23].

Надежность является комплексным свойством объекта. Единичными основными его свойствами являются: *безотказность* — непрерывное сохранение работоспособности, *долговечность, ремонтопригодность* и некоторые другие.

Следует нметь в внду, что отказы срабатывания, излишние срабатывания и ложные срабатывания возможны не только из-за неполноты надежности, но также из-за технического несовершенства. (Например, отказ срабатывания из-за недостаточной чувствительности вследствие большого переходного сопротивления в месте КЗ.)

В общем случае возможно выделение элементов, объектов и систем, разлнчающихся показателями и методамн оценки их надежности: невосстанавливаемые, прнменяемые до первого отказа, и восстанавливаемые в процессе применения, для которых недопустнмы нли кратковременно допустимы перерывы в работе. Системы устройств релейной защнты какого-либо работающего элемента электрической системы, например линии, относятся ко второй группе. Однако и отдельные устройства защиты обычно относят также к этой группе.

Однако, например, при испытаннях на иадежность с целью контроля качества изделий в заводских условиях отказавшие экземпляры могут ие восстанавливаться.

Для оценкн иадежности невосстанавливаемых объектов используют вероятностные характеристики случайной величины T — среднего времени наработки до отказа (математнческого ожиданя наработкн объекта до первого отказа). Оиа может быть описана с помощью широко известных четырех показателей надежности невосстанавлнваемых объектов [например, 24]: вероятности безотказной работы на определенном нитервале времени, вероятности отказа на этом же интервале времени, плотности распределения вероятности времени до отказа и интенсивности отказа.

Значительно более сложной является оценка надежности восстанавливаемых объектов, в том чнсле релейной защнты.

Применительно к отдельным устройствам защиты первыми, учнтывающими специфику нх функционирования, следует считать работы, выполненные Э. П. Смирновым [25, 26]. В ннх, в частности, учтена кроме рассмотренных выше следующая особенность работы устройства. Различаются *отказы работоспособности* и *функционирования* — отказ, даже полный, работоспособностн устройства может не приводить к немедленному отказу его функциоиированиа, так как может проявляться только прн возникновении КЗ в защищаемой зоне или вне ее; при этом время между отказом работоспособности н появлением требования к выполнению соответствующей функции может быть большим, и появляется возможность восстановления его работоспособности. Следует подчеркиуть, что требования срабатывания защиты при КЗ в защищаемой зоне и несрабатывания при КЗ вне ее можно также рассматривать как своего рода проверкн.

Коэффициенты неготовности. За основные показателн надежности одного устройства защиты в настоящее время приннмаются отдельные *коэффициенты неготовности срабатывания* $q_с$ *и несрабатывания* $q_{нс}$, а также *параметр потока ложных срабатываний* $\omega_{л.с}$. Под коэффициентом $q_с$ поннмается вероятность отказа срабатывания при одном требованин срабатывання, а под коэффициентом $q_{нс}$ — вероятность срабатывания при одном требованни несрабатывания.

Прн определенни коэффициентов неготовности н другнх показателей релейной защиты используются потокн однородных событий, представляющие случайный процесс, образованный совокупностью случайных моментов времени возникновения этнх событий. К ним, например, относятся потоки требований срабатываиня, моментов отказов работоспособности и функциоиирования, ложных срабатыванн и т. д. Параметрами потоков являются нх значения за достаточно малую единицу времени. Практнчески обычно используется их среднее значение за один год.

Наряду с такими потоками приходится учитывать наличие потоков событий, имеющих детерминированные (неслучайные) моменты времени появления событий. К ним отиосятся, например, регулярные проверки устройств защиты, осуществляемые персоналом или специальными устройствами.

При наличии статистнческих данных обычно используются следующие выражения для коэффициентов $q_с$ и $q_{нс}$:

$$q_с = \omega_{о,с}/\omega_{т,с} = \omega_{о,с}/(\omega_{п,с} + \omega_{о,с}) \approx n_{о,с}/n_{т,с} = \\ = n_{о,с}/(n_{п,с} + n_{о,с}); \quad (1.2)$$

$$q_{нс} = \omega_{и,с}/\omega_{т,нс} = n_{и,с}/n_{т,нс}, \quad (1.3)$$

где $\omega_{о,с}$, $\omega_{т,с}$, $\omega_{п,с}$ и $\omega_{и,с}$ — параметры потоков отказов срабатывания, требований срабатывания, правильных и излишних срабатываний соответственно; $n_{о,с}$, $n_{т,с}$, $n_{п,с}$ и $n_{и,с}$ — соответствующие им числа отказов срабатывання, требований срабатывания, правильных и излишних срабатываний.

Другой вид получают коэффициенты $q_с$ и $q_{нс}$ при примеиеиии математического аппарата марковскнх случайных процессов, характеризуемых системой уравненнй Колмогорова (например, [16, 25]).

Введя допущение о том, что поток регулярных проверок является случайным (первое событне потока не фиксированно), и используя указанный аппарат, можно получнть следующее выражение для $q_с$:

$$q_с = \omega_{в,н}/(\omega_{в,н} + \omega_{пр} + \omega_{т,с}), \quad (1.4)$$

где $\omega_{в,н}$, $\omega_{пр}$ и $\omega_{т,с}$ — параметры потоков возникиовения состояния неработоспособности, проверок н требований срабатывання. Аналогичным образом, как и в первом случае, получается $q_{нс}$. Для оценки надежности устройства защиты полученные коэффициенты q и параметр потока ложных срабатываний следовало бы сравнивать с их нормированными значениями. Предложения по этому вопросу разработаны ЭСП [84].

Представляет также интерес предложенный Я. С. Гельфандом метод эквивалентных повреждений [9], позволяющий формулировать для некоторых элемеитов электрических систем требования к надежности их защиты и оценивающий взанмосвязь между их надежностями.

Необходимо отметить, что при сравнении вариантов выполнения одного устройства между собой знание значений нормнрованных величин может оказываться и не обязательным.

В [26] предложено использовать комплексный показатель ненадежности для одного устройства, охватывающий одиовременно коэффициенты $q_с$, $q_{нс}$ и параметр $\omega_{л,с}$. За него принимается отношение взятых в среднем потерь $\Delta\Phi_н$ выходного эффекта устройства из-за его отказов функционироваиия и предельного идеализированного выходного эффекта $\Phi_п$ того же устройства:

$$q = \Delta\Phi_н/\Phi_п. \quad (1.5)$$

Из (1.5) можио получить следующее окончательиое выражение для комплексного коэффициента неготовности:

$$q = q_с + \alpha q_{нс} + \beta\omega_{л,с}, \quad (1.6)$$

где α и β — некоторые весовые коэффициенты.

Рассмотренный метод подхода к определению q наряду с таким достоинством, как комплексиость, имеет и ряд существенных ограничений. Наиболее важным из ннх является затруднительность определения правильных значений α и β. Поэтому на практнке часто ограничиваются расчетом $q_с$, $q_{нс}$ и $\omega_{л,с}$.

Указанные показателн разработаны для оценки надежности только одного отдельного устройства защиты.

Для характеристики надежности систем защит, а как частный случай и отдельных устройств, возможно исходить из условия, что как их надежность, так и эффективность функционирования в целом характеризуется потерямн выходного эффекта защищаемой системы. Использование такого подхода впервые, по-видимому, четко сформулировано Н. В. Вавиным [16, 27]. Некоторые соображения по этому методу даны в гл. 15.

Выше рассматривались свойства защит от КЗ. Ряд этих свойств относнтся и к защитам от ненормальных режимов работы и некоторых видов повреждений, допускающих продолжение работы в течение определенного времени. Прн этом, однако, следует учитывать специфические условия функционирования этих защит. Так, например, защиты от перегрузок элементов системы целесообразно выполнять с выдержками временн. Защиты от однофазных замыканий на землю в системах с нзолированной нейтралью, работающие на сигнал, допускается выполнять так, чтобы онн определяли только цепочку элементов системы, на которых произошло повреждение, и т. д.

Оценка технического совершеиства, надежиости и эффективности фуикциоиироваиия защит. Как видно из приведенного выше рассмотрения характеристик технического совершенства и надежности, методы их оценок, а также, очевидно, и средства по обеспечению иеобходимого их уровнн различны. Необходимо также иметь в виду сложность взаимоотношеннй между этими двумя свойствами — повышение уровня одного из них может приводить к понижению уровня другого: например повышение чувствнтельности защиты может привести к такому ее усложнению, прн котором надежность снизится. Однако ее выходной технический эффект, как и эффективность функционирования, будет определяться в первом приближении чнслом правильных, излишних и ложных срабатываний. При этом иногда трудно даже четко классифицировать, какое из свойств приводит к излишним или ложным срабатываниям. Поэтому на практике иногда нспользуются обобщенные статистнческие показатели только эффективностн функционирования.

Оценка правильных действий. Для оценки функционирования релейной защиты как в зарубежной, так и в отечественной практике используется обобщенный усредненный статистический показатель η ее работы, называемый *процентом правильных действий*. Он представляет выраженное в процентах отношение числа правильных срабатываний отдельных устройств защиты $n_{п,с}$ (состоявшихся требовавшихся срабатываний) к сумме $n_{п,с}$ и неправильных срабатываний $n_{н,с}$ (сумма чисел отказов $n_{о,с}$, излишних $n_{и,с}$ и ложных $n_{л,с}$ срабатываний):

$$\eta = n_{п,с} \cdot 100/(n_{п,с} + n_{н,с}) = n_{п,с} \cdot 100/(n_{п,с} + n_{о,с} + n_{и,с} + n_{л,с}). \quad (1.7)$$

Этот показатель в какой-то мере отражает эффективность функционирования защиты, имеет в отечественных энергосистемах значения много лучшие, чем в ряде зарубежных систем, но по ряду причин в недостаточной мере правильно ее оценивает. Так, например, сумма $n_{и,с}+n_{л,с}$ стоит в знаменателе (1.7), хотя эти срабатывания наносят потери, которые для получения выходного эффекта защиты следует вычитать из эффекта от требуемых срабатываний.

По предложению, сделанному еще в конце 60-х годов [21, 25], рассматриваемый показатель может иметь следующую улучшенную структуру:

$$\eta_{эф} = [n_{п,с} - (n_{и,с} + n_{л,с})] \cdot 100/(n_{п,с} + n_{о,с}). \quad (1.8)$$

Приведенные выражения для η и $\eta_{эф}$ записаны при пренебрежении допущенными срабатываниями и несрабатываниями, числа которых соответственно $n_{д,с}$ и $n_{д,н}$.

Содержащаяся в приведенных выражениях условность — неучет различия потерь при разных видах функционирования — по-видимому, неизбежна при формировании простого укрупненного показателя, предназначенного контролировать уровень эффективности функционирования больших количеств устройств защиты.

Применяются также показатели эффективности функционирования одного устройства, называемые периодичностью тех или иных его действий. Они представляют собой средние времена между соответствующими повторными действиями, приходящимися на одно устройство. Они могут определяться также количеством устройств, деленным на число их соответствующих действий в год.

Общая эффективность и качество релейной защиты. В настоящее время все возрастает потребность в методах экономических обоснований решений по релейной защите.

Использование, как иногда предлагалось, для оценки общей эффективности защиты расчетных затрат на осуществление и эксплуатацию только самой защиты, включающих также потери из-за ее отказов функционирования, считается в настоящее время неправомерным. В этой связи следует отметить работы, выполняемые в последнее время в ЭСП и дающие возможность более правильно подойти к решению вопросов оценки общей эффективности релейной защиты [84].

Как известно, кроме эффективности важное значение имеет качество продукции, выпускаемой промышленностью, в том числе, очевидно, и устройств релейной защиты. Качество является обобщающим свойством, характеризующим совершенство устройств релейной защиты. Существенными составляющими этого свойства являются техническое совершенство и надежность.

1.2. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ЕЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ

Общие вопросы выполнения защиты от КЗ. Способы выполнения защиты от КЗ весьма разнообразны. Однако все защиты выполняются обычно автономными устройствами с использованием, как правило, токов и напряжений промышленной частоты защищаемых элементов сети.

По способам обеспечения селективности при внешних КЗ они могут быть отнесены к двум основным группам (см. § 1.1). В одну из них входят защиты, обладающие относительной селективностью, в другую — абсолютной селективностью. Защиты с абсолютной селективностью работают только при КЗ на защищаемом участке и поэтому обычно выполняются без выдержки времени. Это является их большим достоинством. Защиты с относительной селективностью могут работать при КЗ как на защищаемом участке, так, в качестве резервных, и на смежных. Для обеспечения их селективности при КЗ вне защищаемого участка они должны в таких случаях работать с временем, большим времен срабатывания защит смежных элементов.

В некоторых случаях для обеспечения более быстрого отключения КЗ оказывается целесообразным снижать требования к селективности защит с относительной селективностью, допуская их срабатывание при КЗ на части смежных участков даже при исправности защит и выключателей последних. Такие защиты называются *неселективными*. Они применяются обычно в сочетании с устройствами автоматического повторного включения (АПВ), исправляющими их недостаточно совершенную работу. Так, например, неселективные защиты иногда используются на радиальных линиях в распределительных сетях с односторонним питанием, часто имеющих большое число последовательно расположенных участков. Защиты с абсолютной селективно-

стью не могут быть неселектнвными. По выполняемым функциям защиты делятся на основные и резервные (§ 1.1). Наличие в сети резервных защит считается обязательным. Для выполнения функций дальнего резервирования защиты должны обладать относительной селективностью.

В некоторых случаях используются также *дополнительные защиты,* выполняющие некоторые вспомогательные функции, например ускорение отключения КЗ на части участка, защиту «мертвых зон», определяемых направленными элементами основных и резервных защит, и т. д.

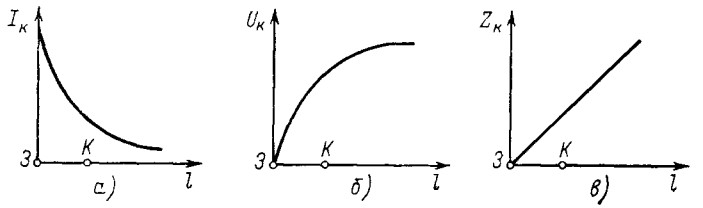


Рис. 1.2. Зависимости электрических величин от места металлического КЗ (точка *К*)

Для повышения эффективности резервирования в сетях высоких, сверхвысоких и ультравысоких напряжений предусматриваются специальные устройства резервирования при отказе выключателей — УРОВ (см. гл. 15).

Защиты с относительной селективностью. К этой группе относятся рассматриваемые ниже токовые, токовые направленные и дистанционные защиты. Их селективность при внешних КЗ обеспечивается выбором выдержек времени защиты и параметров срабатывания измерительных органов и контролем (если оказывается необходимым) направления мощности КЗ. Ниже возможность такого выбора определяется на примере защиты линий законами изменений токов, напряжений и знаков мощностей, характеризующими КЗ в различных точках защищаемой сети (рис. 1.2).

Ток КЗ $I_к$, проходящий через устройства защиты, включенные по концам защищаемых участков, тем меньше, чем больше удалено место повреждения (точка *К*) от места включения защиты (точка *З*) (рис. 1.2, *а*), так как его значение уменьшается с увеличением сопротивления петли *КЗ*. Это и дает возможность создавать токовые защиты с выдержками времени тем бо́льшими, чем меньше значение $I_к$. Чем более резко снижается $I_к$ вдоль защищаемого направления, тем более эффективным оказывается осуществление таких защит. Длина защищаемой зоны токовой защиты зависит от режима работы сети. Остаточное напряжение петли КЗ в месте включения защиты $U_к$, наоборот, тем больше, чем более удалена эта точка (рис. 1.2, *б*). Поэтому рассматриваемые ниже дистанционные защиты, функционирование которых обычно определяется сопротивлением петли КЗ $Z_к$, пропорциональным отношению $U_к/I_к$, будут иметь тем бо́льшие $Z_к$, чем более удалена точка КЗ от места включения защиты (рис. 1.2, *в*). При этом оказывается несущественной крутизна снижения $I_к$. Это определяет, в частности, возможность более легкого выбора параметров таких защит и устойчивость длины защищаемых зон независимо от режима работы сети.

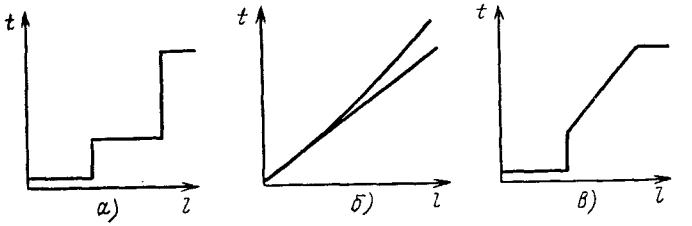


Рис. 1.3. Виды характеристик выдержек времени $t=f(l)$ защит с относительной селективностью

Полная мощность КЗ всегда направлена к месту повреждения, поэтому ее знак дает возможность выявлять место КЗ по отношению к месту включения защиты.

Выдержки времени рассматриваемых защит в функции расстояния от места их включения до точки КЗ могут иметь ступенчатый (рис. 1.3, *а*), плавный или зависимый (рис. 1.3, *б*) и ступенчато-плавный или комбинированный (рис. 1.3, *в*) вид. Под выдержкой времени на практике обычно понимается не уставка на органе выдержки времени, а полное время срабатывания защиты до момента подачи отключающего сигнала на выключатель. В нашей стране для сетей напряжением 35 кВ и выше обычно используются защиты со *ступенчатыми характеристиками* с числом ступеней три, иногда четыре. В распределительных сетях более низких напряжений применяются и другие исполнения, например при необходимости сочетать их с за-

щитами, выполняемыми плавкими предохранителями, имеющими плавные характеристики выдержек времени. Преимуществом защит со ступенчатыми характеристиками по сравнению с другими является более простое выполнение измерительных органов. Поэтому ниже основное внимание уделяется именно таким защитам.

На рис. 1.4 приведены трехступенчатые характеристики выдержек времени защит, включенных на радиальные линии сети с односторонним питанием. Каждый комплект защиты (*1, 2, 3*) имеет три ступени, характеризуемые выдержками времени t^{I}, t^{II} и t^{III} и защищаемыми зонами l^{I}, l^{II} и l^{III}, определенными при металлических КЗ.

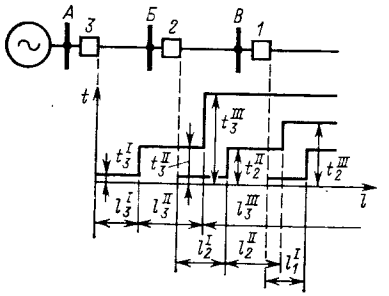


Рис. 1.4. Ступенчатые характеристики выдержек времени защит с относительной селективностью в сети с односторонним питанием

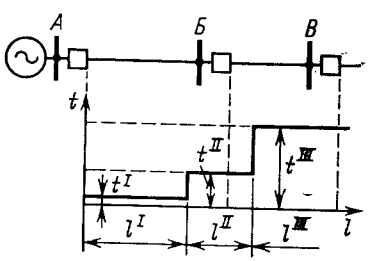


Рис. 1.5. Характеристика $t=f(l)$ трехступенчатой защиты, включенной на участке *АБ*

Первые ступени (I) обычно работают без специально устанавливаемой выдержки времени (t^{I} определяется конечным собственным временем срабатывания элементов защиты). Защищаемые ими первые зоны l^{I} охватывают только часть длины участка, ближайшую к месту включения защиты. Охват всего участка, как правило, нецелесообразен, так как при этом защита данного участка могла бы излишне срабатывать при КЗ в начале смежных элементов.

Вторы ступени (II) работают с выдержкой времени t^{II}, обычно одинаковой для всех защит линий сети. Это время, составляющее в среднем около 0,5 с, предотвращает возможность срабатывания II ступени защиты при КЗ в начале смежных элементов. Защищаемая II ступенью зона l^{II} должна с запасом охватывать конец участка (за первой

зоной) и шины подстаиции противоположной стороны. Конец l^{II} ограничивается началом второй зоны защиты смежного участка, что предотвращает возможность одновременного срабатывания смежных защит (последующей и предыдущей) с одинаковым t^{II} при КЗ во второй зоне предыдущей защиты (например, защиты *3* при КЗ в l_2^{II} защиты *2*).

Третьи ступени (III) имеют наибольшие выдержки времени t^{III}, выбираемые по ступенчатому принципу тем бо́льшими, чем ближе включена защита к источнику питания. При этом выдержка времени n-й защиты $t_n^{III}=t_{(n-1)max}^{III}+\Delta t$, где Δt — ступень выдержки времени, принимаемая в среднем около 0,5 с (см. § 1.8). Основное назначение III ступеней — выполнение функций резервирования при КЗ на предыдущем участке и отказе его защиты или выключателя. Конец зон действия l^{III} III ступеней часто не фиксируется. Очень часто защиты выполняются таким образом, что последующие ступени каждого устройства могут срабатывать при несрабатывании по некоторым причинам (например, вследствие недостаточной чувствительности) предыдущих ступеней. В таких случаях III ступени, являющиеся наиболее чувствительными, резервируют также работу I и II ступеней своего комплекта защиты, а II ступень — работу I ступени. Такая возможность показана на рис. 1.5 применительно к одной защите, включенной на линию со стороны электроустановки *А*.

Используя рассмотренные ниже соотношения алгебры логики, принцип работы защит, например токовых, можно представить без применения каких-либо схем следующим структурным выражением:

$$y = I_1^{I} D_1^{\uparrow I} + I_2^{II} D_2^{\uparrow II} + I_3^{III} D_3^{\uparrow III}, \qquad (1.9)$$

где y — сигнал на выходе защиты; I — сигналы от измерительных органов тока ступеней защит; D — операторы задержки по времени ступеней защит; индексы I, II и III сверху указывают номер ступени; индексы 1, 2, 3 снизу — соответствующие им параметры срабатывания.

В отдельных случаях число ступеней защиты может быть как меньше, так и больше трех. Например, целесообразность выполнения защиты с четырьмя ступенями может возникнуть при недостаточной чувствительности II ступени n-й защиты (рис. 1.4 и 1.6) к КЗ в конце защищаемого элемента. Тогда для предотвращения возможных отключений

таких КЗ часто с большой выдержкой времени t_n^{III} при трехступенчатом выполнении защиты между II и последней ступенями включают дополнительную с временем $t_n^{III} > t_{n-1}^{II}$, а III ступень превращают в IV с выдержкой времени t_n^{IV} (рис. 1.6, *а*). Та же задача может быть решена и без увеличения числа ступеней; для этого увеличивают зону действия II ступени *n*-й защиты и выбирают $t_n^{II} > t_{n-1}^{II}$ (рис. 1.6, *б*). Однако при этом КЗ в конце участка будут ликвидироваться менее эффективно — с большей выдержкой времени.

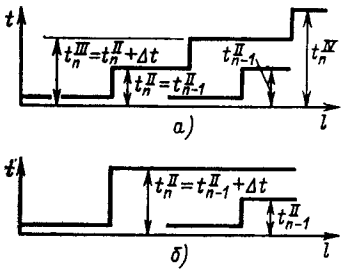


Рис. 1.6. Варианты характеристик выдержек времени ступенчатых защит

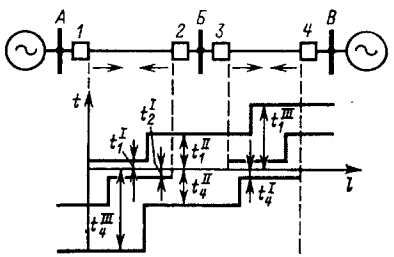


Рис. 1.7. Ступенчатые характеристики выдержек времени защит с относительной селективностью в сети с двусторонним питанием

Сокращение числа ступеней защиты линий иногда осуществляется путем исключения одной из них или совокупности двух. При этом для основных защит одновременное исключение II и III ступеней недопустимо, так как оставлять защиту только с I ступенью нельзя — она не защищает конца участка. Такая защита иногда применяется только как дополнительная, обеспечивающая быстрое отключение КЗ в начале участка, имеющего другую основную защиту.

На рис. 1.7 приведены ступенчатые характеристики выдержек времени защиты для участков линий сети с двусторонним питанием. В этом случае комплекты защиты включаются с обеих сторон каждого участка и для обеспечения полной селективности при внешних КЗ дополняются органами направления мощности, разрешающими им срабатывать только при направлении мощности КЗ от шин в сторону защищаемого участка. Характеристики защит *1* и *3*, действующих при направлении мощности КЗ слева направо, на рис. 1.7 показаны сверху, а защит *2* и *4*, действующих соответственно при направлении мощности КЗ справа налево, — снизу.

Диаграммы на рис. 1.4 и 1.7 подтверждают возможность правильной ликвидации КЗ защитами с относительной селективностью.

Для направленных защит, например токовых направленных, как и рассмотренных выше ненаправленных, принцип работы можно представить следующим структурным выражением:

$$y = S\left(I_1^I D_1^{\uparrow I} + I_2^{II} D_2^{\uparrow II} + I_3^{III} D_3^{\uparrow III}\right), \qquad (1.10)$$

где S — сигнал от органа направления мощности.

Если рассматриваемая защита является дистанционной, ее измерительные органы сопротивления часто сами обладают направленностью действия. В этом случае отдельные органы направления мощности отсутствуют и структурное выражение защиты может иметь вид

$$y = Z_1^I D_1^{\uparrow I} + Z_2^{II} D_2^{\uparrow II} + Z_3^{III} D_3^{\uparrow III}, \qquad (1.11)$$

где Z — сигналы от направленных органов сопротивления.

Для последних (III) ступеней направленных защит может быть применен и принципиально другой способ выбора параметров [18]. При этом способе последние резервные ступени (например, III) выполняются работающими в обратном направлении — от линии в сторону шин, к которым она присоединена. Получающиеся при этом характеристики выдержек времени, например у защит *2* и *3*, приведены на рис. 1.8. Такое выполнение исключает отключение элементов, присоединенных к ответвлениям на неповрежденной линии *АБ*, при ликвидации КЗ на линии *БВ* защитами линии *АБ* (защита *2*) как резервными. Однако направленные защиты могут иметь II ступени недостаточно чувствительными; тогда КЗ в конце участка ликвидирует-

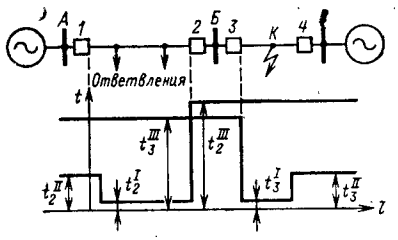


Рис. 1.8. Специальное выполнение характеристик третьих ступеней защит, исключающее отключение ответвлений при действии защиты как резервной

ся не их II, а III ступенью. Так, например, КЗ у шин *В* на участке *БВ* при указанных характеристиках защит может отключаться I ступенью защиты *4* и III ступенью защиты *2*. В таких случаях при рассматриваемом способе излишне может отключаться подстанция *Б*. Кроме того, при рассматриваемом выполнении III ступени не могут полноценно резервировать защиту смежного участка при питании защит от общего источника оперативного тока подстанции, на которой они установлены (при неисправности указанного источника защиты не работают). С учетом изложенного рассматриваемый способ не всегда эффективен и используется редко.

Защиты с абсолютной селективностью. К этой группе относятся защиты, основанные на непосредственном или косвенном сравнении электрических величин по концам защищаемой линии или на двух или нескольких присоединенных к общим шинам линиях электроустановки. В первом случае защиты называются *продольными*, во втором — *поперечными*. При непосредственном сравнении электрических величин по связующим звеньям передаются контролируемые электрические величины, а при косвенном — сигналы блокировки или разрешения срабатывания от сработавших элементов защиты и защит в целом.

Для продольных защит в качестве связующих звеньев, по которым передается информация об электрических величинах с одного конца участка на другой, используются вспомогательные провода, прокладываемые обычно в земле, провода самой защищаемой линии, по которым передаются сигналы токами высокой частоты, или редко — специальные радиоканалы.

В качестве связующих звеньев для поперечных защит целесообразно, очевидно, применять вспомогательные провода, прокладываемые в пределах данной электроустановки.

В защитах с абсолютной селективностью могут сравниваться мгновенные токи или только фазы токов, а также знаки мощностей или иногда направления мгновенных токов.

Защиты, непосредственно сравнивающие мгновенные токи, называются *дифференциальными токовыми*; их разновидностью являются *дифференциально-фазные токовые*, в которых сравниваются фазы токов. Защиты, сравнивающие знаки мощностей, называются *направленными*. В некоторых случаях, например для параллельных цепей линий, применяются и *поперечные токовые направленные защиты*, в частности дифференциальные.

На рис. 1.9, *а* показана линия с двусторонним питанием, оборудованная защитой с абсолютной селективностью. Условные положительные направления токов $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$ с двух ее сторон, показанные на схеме стрелками, приняты от шин *А* и *Б* в сторону линии. При КЗ на защищаемой линии (точка K_1) токи КЗ $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$ сдвинуты по фазе на относительно небольшой угол δ (рис. 1.9. *б*), определяемый углом

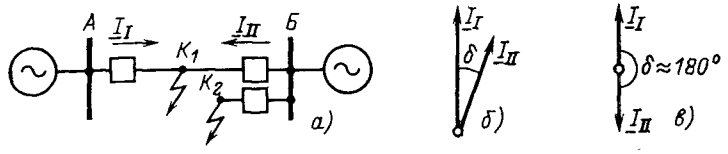


Рис. 1.9. Принцип действия продольных защит с абсолютной селективностью

сдвига ЭДС $\underline{E}_A$ и $\underline{E}_A$ и неодинаковыми углами сопротивлений arctg (X_A/R_A) и arctg $(X_Б/R_Б)$ двух частей системы по отношению к точке K_1. В случаях внешних КЗ этот угол для участков не очень большой длины, если пренебречь их емкостной проводимостью, равен 180° (рис. 1.9, *в*). Мощности КЗ при повреждении на линии и тех же условных направлениях, что и токи, имеют одинаковые знаки, а в случаях внешних КЗ — разные.

С учетом указанного различия в фазных соотношениях токов или знаках мощности КЗ представляется возможным обеспечивать селективность при внешних КЗ рассматриваемой группы защит без использования выдержек времени.

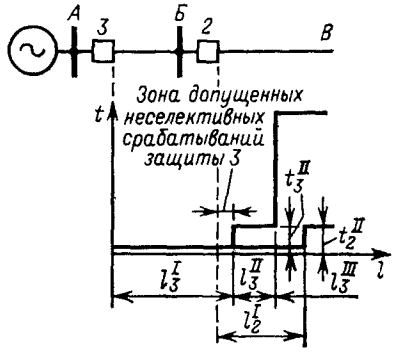


Рис. 1.10. Характеристики выдержек времени при неполностью селективной первой ступени защиты *3*

Неселективные защиты. Рассматриваемые защиты являются разновидностью

защит с относительной селективностью и часто отличаются от последних только выбором параметров срабатывания отдельных ступеней.

На рис. 1.10 в виде примера приведена трехступенчатая характеристика защиты *3* участка *АБ* линии с односторонним питанием. Она отличается от характеристик защит рис. 1.4 тем, что ее первая зона l_3^I охватывает весь участок *АБ* и шины подстанции *Б*. При таком выполнении защиты КЗ в любой точке защищаемого участка будут отключаться без выдержки времени. При КЗ в начале участка *БВ* одновременно с первой ступенью защиты *2* будет срабатывать первая ступень защиты *3*. Ее нежелательное, но намеренно допущенное срабатывание будет исправляться *АВП*. В отечественной практике находят применение неселективные токовые защиты преимущественно в распределительных сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ. Они выполняются, например, так, чтобы без выдержки времени отключались все КЗ, обусловливающие на шинах головных подстанций остаточные напряжения, меньшие примерно $0{,}6U_{ном}$.

1.3. ВИДЫ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Связь в пределах электроустановок (например, соединения между *ТА* и *TV* и устройствами защиты) обычно выполняется по жилам контрольных кабелей. Для продольных защит как с косвенным, так и с непосредственным сравнением электрических величин в качестве связующих звеньев — каналов связи для передачи информации — применяются проводные (вспомогательные провода, выполненные в виде контрольных кабелей), высокочастотные и радиоканалы. В последние годы в связи с начавшимся использованием дискретной передачи информации от *ТА* и *TV* к устройствам защиты, внедрением микропроцессорной техники (программных защит) началось применение в пределах электроустановок специальных оптико-волоконных кабелей, хорошо известных в технике связи (см., например, [53]). Такие кабели с успехом могут применяться в виде каналов связи и для продольных защит линий ограниченной длины.

Каналы с вспомогательными проводами. В качестве вспомогательных проводов для продольных защит линий обычно используются жилы бронированного кабеля или многожильного специального кабеля (служащего одновременно для системной телемеханики и связи), прокладываемого в земле. Применение проводов, подвешенных на опорах ВЛ связи или даже на отдельных опорах, для основных защит считается нецелесообразным, так как эти провода имеют надежность во много раз меньшую, чем у защищаемых линий. По тем же причинам обычно не применяют жилы кабелей общей связи. Связь в пределах подстанций выполняется по жилам контрольных кабелей. По вспомогательным проводам передача информации производится на переменном токе промышленной частоты (50 Гц), постоянном токе или, редко, токах тональных частот.

В изолированных от земли жилах кабелей продольных защит могут возникать перенапряжения. Эти перенапряжения определяются двумя основными факторами:

ЭДС влияния, наведенными в жилах кабеля за счет взаимоиндукции между этим кабелем, проложенным в земле вдоль трассы защищаемой линии, и самой линией. Эти ЭДС, обусловленные токами нулевой последовательности, возникают при КЗ на землю;

напряжением на заземляющем контуре электроустановок, по которому при указанных КЗ проходят токи нулевой последовательности; это напряжение передается проводящей оболочке кабеля (свинцовой, бронированной), непосредственно соединенной с указанным контуром. За счет емкостной связи между оболочкой и жилами и других факторов возникает напряжение и на жилах. Это явление принято называть «выносом потенциала заземления электроустановки».

Результирующее значение возможного перенапряжения определяется геометрической суммой рассмотренных слагающих. С этими перенапряжениями приходится считаться также в устройствах передачи отключающих сигналов. Использование разрядников для защит от этих перенапряжений нецелесообразно, так как нарушало бы канал связи в момент возникновения КЗ в защищаемой системе. Поэтому принимаются специальные меры для снижения перенапряжений. Для снижения, например, перенапряжений, обусловленных ЭДС влияния, кабель удаляют на достаточное расстояние от трассы защищаемой линии. Значительно сложнее предотвращается влияние, определяемое выносом потенциала. Рекомендации по этому вопросу можно рассматривать как находящиеся в стадии разработок. Рассмотренные перенапряжения следует также учитывать при выборе изоляции аппаратуры и выполнения устройств, контролирующих исправность жил кабелей.

Оптико-волоконные каналы. Основной частью этих каналов является оптический световод, представляющий собой волокно из кварцевого стекла с переменным показателем преломления. Оптический луч распространяется по стекловолокну, многократно отражаясь от внутренней границ стекол. Стекловолокно можно укладывать рядом в жгуты, так как переходные затухания между ними очень велики. Таким образом, собранные в жгут световоды передают лучи независимо друг от друга. Снаружи располагается защитная пластмассовая оболочка и,

в случае необходимости, броневой покров. Такой световод (оптико-волоконный кабель) можно, как и обычный кабель, прокладывать в земле или подвешивать (например, для соединения *ТА* на потенциале провода высокого напряжения с устройством на потенциале земли).

Структурная схема оптико-волоконного канала в целом приведена на рис. 1.11. Она включает кроме оптического световода *ОСВ* электрооптический передатчик *ЭОП* и оптико-электрический приемник *ОЭП*. Основным элементом *ЭОП* является светодиод или полупроводниковый лазер. Часто предпочитается последний. Он управляется электрическими сигналами и создает соответствующие им световые сигналы. Основным элементом *ОЭП* является обычно фотодиод, который создает электрические сигналы, подобные передаваемым *ОСВ* световым, т. е. восстанавливает сигналы, поступающие на *ЭОП*.

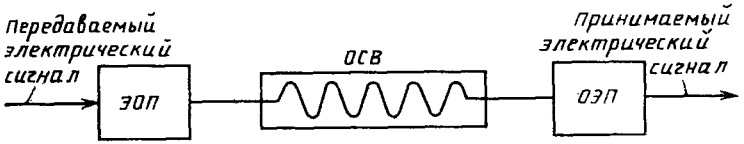


Рис. 1.11. Оптико-волоконный канал

Оптико-волоконные каналы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими проводными каналами: высокую помехоустойчивость от внешних и внутренних источников, малую материалоемкость и большую эластичность, возможность передачи большого объема информации, в них не возникает проблем выноса потенциала.

Высокочастотные каналы. Как правило, они выполняются с использованием проводов защищаемых линий. Для выполнения передачи по каналу производится высокочастотная (ВЧ) обработка проводов фаз, заключающаяся в установке по концам защищаемого участка заградителей и конденсаторов связи. Наименьшее количество аппаратуры требуется для обработки по схеме фаза — земля, которая в нашей стране всегда применяется для релейной защиты [28]. Принципиальная схема ВЧ канала по схеме фаза — земля приведена на рис. 1.12. Канал состоит из следующих элементов: проводов фаз линии, заградителей *3′* и *3″*, конденсаторов связи *4′* и *4″*, защитных устройств *5′* и *5″*, фильтров присоединения *6′* и *6″*, ВЧ кабелей *7′* и *7″*, приемопередатчиков *8′* и *8″*.

В передаче ВЧ сигналов участвуют все три фазы линии, даже если обработанной является только одна из них. Заградители препятствуют распространению энергии ВЧ сигналов за пределы защищаемого участка. В качестве конденсаторов связи при $U_{ном} \geqslant 500$ кВ используются

емкостные делители напряжения трансформаторов напряжения (см. гл. 3). Фильтр присоединения совместно с конденсатором связи образует полосовой фильтр, пропускающий только токи необходимой полосы частот. Высокочастотные кабели соединяют приемопередатчик с фильтром присоединения. Они представляют собой одножильные концентрические экранированные кабели с малым затуханием для ВЧ сигналов (применяются кордельные или радиокабели). Приемопередатчики генерируют и принимают сигналы токов высокой частоты. Передатчики пускаются в работу и останавливаются сигналами релейной части защит. Сигналы, получаемые на выходе приемников, вводятся в релейные части защит для их правильного функционирования.

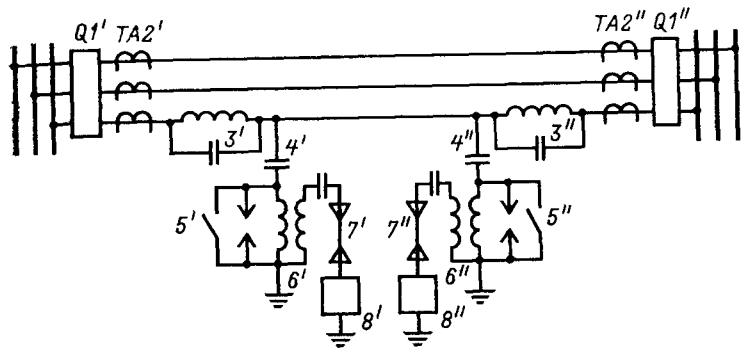


Рис. 1.12. Принципиальная схема ВЧ канала по схеме фаза—земля

Требования, предъявляемые к ВЧ каналу условиями работы продольных защит, принципиально могут быть удовлетворены при работе передатчиков обеих сторон линии на одной частоте. Однако в некоторых случаях при этом возникают затруднения [28]. Поэтому в отечественной практике используется небольшое разнесение частот (до 1,5 кГц) — так называемые сближенные частоты в пределах общей полосы пропускания, предложенное в свое время отечественными и китайскими специалистами. Для ВЧ каналов релейной защиты в общем случае могут использоваться частоты в пределах 40—500 кГц.

Для получения необходимого сигнала во всех рабочих режимах ВЧ канала передатчики должны обеспечивать необходимый запас по перекрываемому затуханию. Особенно сильные затухания возникают при осаждении на проводах линий гололеда, изморози или мокрого снега вследствие диэлектрических потерь в слое покрытия. При сильных гололедах эти затухания могут (в редких случаях) даже превосходить допустимые значения, и для некоторых типов защит (селективность дей-

ствия которых при внешних КЗ обеспечивается ВЧ сигналами) встает вопрос о выведении их при этом из работы. Очень важным является учет разного рода помех. При их отсутствии ВЧ приемник мог бы иметь почти неограниченно высокую чувствительность и сигналы могли бы передаваться на весьма большие расстояния. Значительный уровень помех в ВЧ каналах определяется главным образом высоким напряжением проводов защищаемых линий сети. Оно обусловливает помехи от коронирования проводов, от дуг при КЗ, при операциях с выключателями, разъединителями и др. Кроме того, имеются помехи от соседних ВЧ каналов, радиостанций, атмосферных разрядов. Отстройка от помех со стороны защищаемой сети осуществляется выбором порога чувствительности ВЧ приемника и обеспечением минимально допустимого уровня принимаемых им сигналов. Отстройка от помех со стороны соседних ВЧ каналов и радиостанций обеспечивается соответствующим выбором рабочей полосы частот, в которой помехи от каналов с другими частотами были бы достаточно малы. В современной аппаратуре техники связи всегда используется кварцевая стабилизация сигналов передатчиков, что обеспечивает высокую стабильность частоты каналов.

Одним из недостатков ВЧ канала является его нарушение на участке с КЗ. Особенно ненадежно, с очень большим затуханием проходит сигнал через место трехфазного КЗ на землю; он существенно затухает и при однофазном КЗ на обработанной фазе вблизи конца линий. Это приходится учитывать при выполнении защит с ВЧ каналами.

Первые ВЧ приемопередатчики для защиты в Советском Союзе были разработаны и выпущены в 30-х годах лабораторией им. А. А. Смурова. Последующие, более совершенные отечественные приемопередатчики разрабатывались во ВНИИЭ (Г. В. Микуцким).

Радиоканалы. Простейший радиоканал, применяемый для линий небольшой длины, состоит (рис. 1.13) из приемопередатчиков *3′* и *3″*, линий *4′* и *4″*, направленных антенн *5′* и *5″* и пространства между последними. Радиоканалы большой протяженности выполняются радиорелейными линиями; последние никаких релейных свойств не имеют и отличаются от каналов малой протяженности наличием промежуточных приемопередающих радиостанций, которые усиливают радиосигналы.

Радиоканалы работают на ультракоротких волнах (УКВ). Предпочтение отдается дециметровым и сантиметровым волнам. Они, как

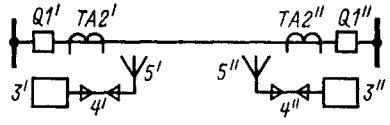


Рис. 1.13. Принципиальная схема простейшего радиоканала

правило, распространяются в непосредственной близости от поверхности земли и почти не огибают выпуклостей ее поверхности. Поэтому максимальная длина простейших радиоканалов (рис. 1.13) ограничивается, грубо говоря, пределами прямой видимости между антеннами и обычно не превосходит даже при их высоком расположении 40—60 км. При больших расстояниях переходят на радиорелейные линии.

Области применения различных каналов связи. Для связей в пределах электрических установок (станций, подстанций) широко используются вспомогательные провода, осуществляемые в виде контрольных кабелей. Они в случае необходимости применяются также для продольных защит линий высокого напряжения длиной до нескольких километров. Основными недостатками проводного канала являются: большие затраты на провода и их прокладку, пропорциональные длине канала; возможность нарушений в связи с прокладкой по неохраняемой территории, которые могут приводить к продолжительному выходу защиты из работы и отказам в функционировании (при несовершенстве устройств контроля), и ряд других, перечисленных выше.

Значительными преимуществами в ряде случаев обладают оптико-волоконные каналы, выполняемые обычно в виде кабелей, поэтому они начинают получать широкое применение в технике релейной защиты как электроустановок, так и линий относительно небольшой протяженности.

Для линий длиной, превосходящей несколько километров, по технико-экономическим показателям более целесообразно применение ВЧ каналов. Радиоканалы, особенно радиорелейные линии, в качестве основных каналов связи защит пока в отечественной практике почти не находят применения, хотя и имеют ряд преимуществ (см. [10]).

1.4. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К АНАЛИЗУ, СИНТЕЗУ ЗАЩИТ И ВЫБОРУ ИХ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ

В технике релейной защиты, весьма многогранной по своему содержанию, но сформировавшейся во вполне определенную научно-техническую область знаний, используется ряд известных методов и математических приемов. Необходимо подчеркнуть, что задачи выполнения защиты по существу обычно многокритериальны, так как при выборе наилучших вариантов приходится учитывать различные предъявляемые к ней требования, среди которых час-

то имеются и противоречащие друг другу. Однако на практике обычно сводят решение задач к однокритериальным.

Величины, с которыми оперируют в защите, являются, как правило, случайными (токами нагрузки в рабочих и переходных режимах, токами КЗ, погрешностями органов защиты и т. д.). Поэтому принципиально могли бы достаточно широко использоваться положения теории вероятности. Такой подход был впервые предложен К. Ю. Мёллером (Таллиннский политехнический институт) еще в 60-е годы. В дальнейшем он был несколько развит в работах ряда других отечественных организаций. Однако он пока широкого распространения на практике не получил.

Ниже, как правило, будет использоваться более простой для расчетов детерминистический подход, в котором выбор параметров осуществляют, исходя из случаев, считающихся «наихудшими», с учетом элементов вероятностной оценки. Последнее осуществляется введением нормируемых коэффициентов отстройки, чувствительности, согласования, выбираемых на основании многолетних статистических данных. Исключение пока составляют, например, теория надежности защит и подход к выбору выдержек времени защит с относительной селективностью, рассмотренный ниже.

При ступенчатых характеристиках этих выдержек времени, например, III ступень n-защиты имеет выдержку времени $t_n^{\text{III}} > t_{n-1}^{\text{III}}$. Выбираемая разность $t_n^{\text{III}} - t_{n-1}^{\text{III}} = \Delta t_n$, как указывалось выше, называется *ступенью выдержки времени*. При выборе Δt учитываются следующие требования: она должна быть минимально допустимой для уменьшения уровня выдержек времени защит в системе и быть такой, чтобы повреждение на предыдущем, $(n-1)$-м участке отключалось раньше, чем сработает защита последующего, n-го участка. Учитывая это, ступень Δt при детерминистическом подходе было предложено в 30-х годах [1] выбирать по выражению

$$\Delta t_n = t_{\text{в}(n-1)} + t_{\text{п}(n-1)} + t_{\text{пп}} + t_{\text{ип}} + t_{\text{зап}}. \qquad (1.12)$$

В это выражение входят: время действия $t_{\text{в}(n-1)}$ выключателя предыдущего, $(n-1)$-го участка (время от подачи сигнала на отключение до разрыва тока КЗ); сумма абсолютных значений максимальной положительной погрешности $t_{\text{п}(n-1)}$ предыдущей защиты, которая затягивает отключение, и максимальной отрицательной погрешности $t_{\text{пп}}$ данной n-защиты, которая может привести к преждевременному излишнему ее срабатыванию; время инерционной ошибки $t_{\text{ип}}$ данной защиты, учитывающее возможность действия органов этой защиты уже после отключения внешнего КЗ, и некоторый запас $t_{\text{зап}}$.

Время действия выключателей колеблется в широких пределах: примерно 0,04—0,3 с. Максимальные погрешности вторичных защит с независимыми характеристиками обычно не превосходят $\pm(0{,}05—0{,}1)$ с, составляя половину гарантируемого заводами *времени разброса* $t_{\text{разб}}$. Инерционные ошибки для этих защит близки к нулю. Поэтому Δt для указанных защит не должна превышать 0,2—0,6 с. При использовании менее точных защит, а также защит с зависимыми характеристиками Δt иногда достигает 0,8—1 с.

В выражении (1.12) ярко проявляется детерминистический подход к определению — принимается маловероятное «наихудшее» сочетание погрешностей смежных защит, в особенности когда считается, что они определяются только разбросом (от установленного времени срабатывания), представляющим собой типичную вероятностную величину.

В общем случае погрешности определяются также работой защит в разных температурных условиях и т. п. Учитывая влияние этих слагающих погрешностей и $t_{\text{ип}}$ в $t_{\text{зап}}$, принимая нормальный закон распределения для $t_{\text{п}}$ от разброса и используя правило трех сигм (см., например, [16]), можно получить для Δt следующее выражение:

$$\Delta t_n = t_{\text{в}(n-1)} + \sqrt{t^2_{\text{п}(n-1)} + t^2_{\text{пп}}} + t_{\text{зап}}. \qquad (1.13)$$

При выборе Δt_n таким способом обеспечивается работа защит с очень большой вероятностью p ее отстроенности от внешних КЗ ($p \approx 0{,}999$) и имеется возможность снижения Δt, например при $t_{\text{п}(n-1)} = t_{\text{пп}} = 0{,}5 t_{\text{разб}}$ примерно на $0{,}3 t_{\text{разб}}$.

Дальнейшее повышение точности по времени работы органов, уменьшение времени отключения выключателей, а также рассмотренный прогрессивный вероятностный подход к определению Δt могут существенно влиять на снижение уровня выдержек времени защит с относительной селективностью в системе.

1.5. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЗАЩИТЕ

Положительные направления. При написании соотношений между синусоидальными электрическими величинами как для мгновенных, так и для амплитудных их значе-

ний следует задаваться положительными направлениями величин. Это важное положение подчеркивалось в технике релейной защиты, начиная еще с начала 30-х годов [4]. Положительные направления можно, вообще говоря, выбирать произвольно. Однако в электротехнике для многих случаев рекомендуются определенные положительные направления, большинство которых широко используется и в технике релейной защиты:

Ниже рассматриваются некоторые случаи принимаемых условных положительных направлений.

На рис. 1.14, *а* показан идеальный источник ЭДС, синусоидального переменного тока, который изображается кружком со стрелкой внутри. К его зажимам *1* и *2* присо-

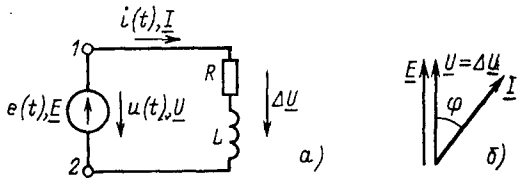


Рис. 1.14. Электрическая цепь с идеальным источником ЭДС и векторная диаграмма электрических величин

единена нагрузка, характеризуемая индуктивностью L и активным сопротивлением R. Стрелка $\underline{E}$ внутри кружка источника ЭДС $e(t)$ указывает ее положительное направление. Для тока $i(t)$, $\underline{I}$ и напряжения $u(t)$, $\underline{U}$ на зажимах источника, равного падению напряжения в нагрузке, приняты обычно используемые положительные направления. Тогда $u(t)=e(t)$ и на векторной диаграмме (рис. 1.14, *б*) вектор $\underline{U}$ совпадает по фазе с ЭДС $\underline{E}$. Положительное направление падения напряжения $\Delta\underline{U}$ в нагрузке принято совпадающим с направлением тока $i(t)$, $\underline{I}$. Оно ($\Delta\underline{U}$) равно $\underline{U}$, совпадает с ним по фазе и опережает ток $\underline{I}$ на угол $\varphi=\operatorname{arctg}(\omega L/R)$.

На векторных диаграммах углы между напряжениями и соответствующими им токами в электрической цепи обычно отсчитываются от тока к напряжению в направлении против движения часовой стрелки; при этом они считаются положительными. Однако эти углы могут отсчитываться и в направлении движения часовой стрелки. В этом случае

они должны приниматься отрицательными. Таким образом, угол φ между одними и теми же векторами напряжения и тока может иметь два значения (рис. 1.15), сумма абсолютных значений которых составляет 360°.

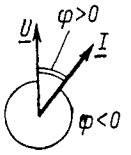


Рис. 1.15. Фазные соотношения между $\underline{U}$ и $\underline{I}$

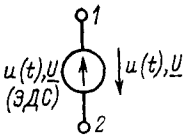


Рис. 1.16. Идеальный источник напряжения

Следует отметить, что иногда используется понятие не источника ЭДС, а идеального источника напряжения $u(t)$, $\underline{U}$ (рис. 1.16). При этом все сказанное выше относительно ЭДС $e(t)$, $\underline{E}$ полностью относится и к последнему.

На рис. 1.17, *а* показана индуктивность L, по которой проходит ток $i(t)$, $\underline{I}$, например, от идеального источника тока (изображается кружком с двойной стрелкой, фикси-

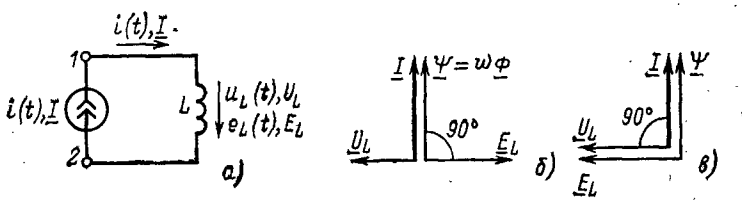


Рис. 1.17. Цепь с идеальным источником тока и векторные диаграммы

рующей положительное направление тока). Принятые положительные направления тока $i(t)$, $\underline{I}$, падения напряжения в индуктивности $u_L(t)$, $\underline{U}_L$ и возникающей ЭДС самоиндукции $e_L(t)$, $\underline{E}_L$ направлены от зажима *1* источника к зажиму *2*. На основании закона электромагнитной индукции Фарадея — Максвелла ЭДС $e_L=-d\Psi/dt$. Если потокосцепление Ψ линейно зависит от тока ($\Psi=Li$), то $e_L=-Ldi/dt$. С учетом правила Ленца, выражающего прин-

цип электромагнитной инерции, в выражении для e_L стоит знак минус, поскольку ее положительное направление принято совпадающим с током i.

На векторной диаграмме (рис. 1.17, *б*) $\underline{E}_L$ отстает по фазе от $\underline{I}$ на 90°; потокосцепление $\underline{\Psi}=w\underline{\Phi}$ (w — число витков индуктивности, $\underline{\Phi}$ — поток), если i и $\underline{\Phi}$ связаны правилом правого винта, совпадает по фазе с током $\underline{I}$. Напряжение $u_L=-e_L$, так как оно должно уравновешивать e_L, поэтому на векторной диаграмме $\underline{U}_L$ сдвинуто по отношению к $\underline{E}_L$ на угол 180°. Необходимо отметить, что иногда (например, при построении векторной диаграммы для трансформаторов тока, как было предложено в [4]) бывает удобно для $\underline{E}_L$ принять условное положительное направление противоположным току $\underline{I}$. Тогда $e_L=+Ldi/dt$ и вектор $\underline{E}_L$ должен быть изображен опережающим векторы $\underline{I}$ и $\underline{\Psi}$ на 90° (рис. 1.17, *в*). Естественно, правило Ленца при этом не нарушается.

Принципиально индуктивность L вне зависимости от принимаемых условных положительных направлений всегда остается величиной положительной; это относится также и к понятиям емкости C и сопротивления R.

В электротехнике, в том числе в технике релейной защиты, используются разного рода схемы замещения. Эти схемы представляют только математические модели, описывающие определенные электрические влияния. В этих схемах иногда появляются, например, «отрицательные» индуктивности рассеяния. Их следует, как и другие элементы схемы, оценивать только как расчетные величины, не нарушающие приведенных выше положений.

Фазные и междуфазные напряжения. Далее рассматриваются трехфазные электрические системы. На рис. 1.18, *а* условно показан трехфазный идеальный источник $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$, работающий на трехфазную нагрузку, соединенную в звезду, с сопротивлениями фаз $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_C$. Фазы изображенной системы связаны всегда с землей через практически одинаковые, хотя, может быть, и весьма малые емкости C_0. Поэтому нейтральная точка соединенных в звезду источников фазных ЭДС оказывается как бы «привязанной» к земле и имеет потенциал при пренебрежении влиянием гармоник, кратных трем, тот же, что и потенциал земли, принимаемый равным нулю.

Фазным напряжением $\underline{U}_{ф.н}$ в электротехнике обычно называют напряжение фазы по отношению к нейтральной точке источника питания или нагрузки. Если нагрузка симметрична ($\underline{Z}_A=\underline{Z}_B=\underline{Z}_C$), то в принятом режиме работы системы рассматриваемые напряжения одинаковы. При несимметричной нагрузке ее нейтральная точка получает по отношению к нейтральной точке источника смещение.

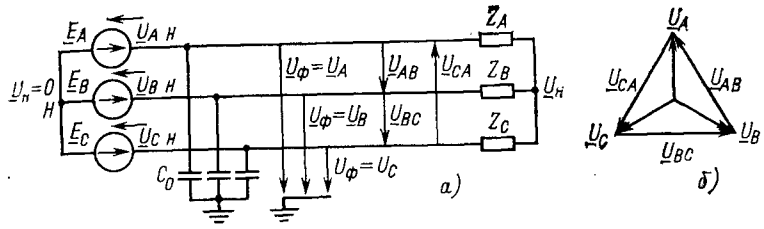


Рис. 1.18. Напряжения в трехфазной системе

В технике релейной защиты под фазными напряжениями $\underline{U}_ф$ понимают напряжения фаз по отношению к земле, а не к нейтральным точкам. Напряжение $\underline{U}_ф$ равно $\underline{U}_{ф.н}$ только при полной симметрии системы. В случае возникновения повреждений фаз на землю (например, однофазного замыкания на землю в системе с изолированной нейтралью по рис. 1.18, *а*) напряжение $\underline{U}_ф$ может резко отличаться от $\underline{U}_{ф.н}$. Ниже под фазными напряжениями понимаются напряжения $\underline{U}_ф$ фаз по отношению к земле, обозначаемые соответственно $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$.

Под междуфазными понимаются разности соответствующих фазных напряжений, например $\underline{U}_{AB}=\underline{U}_A-\underline{U}_B$. Принимаемые положительные направления для напряжений даны на рис. 1.18, *а*, соответствующая им векторная диаграмма для симметричного режима — на рис. 1.18, *б*.

Определение электрических величин по заданным ЭДС и с использованием принципа наложения. Определение токов и напряжений при повреждениях в системе может производиться двумя способами — непосредственно по заданным ЭДС генераторов или с использованием известного принципа наложения.

Принцип наложения применим для линейных цепей и обычно реализуется путем наложения на заданный режим работы системы последующего *аварийного* режима.

Таким образом, комплексная электрическая величина при повреждении $\underline{F}_к$ является суммой рабочей $\underline{F}_{раб}$ и аварийной $\underline{F}_{ав}$ величин, откуда

$$\underline{F}_{ав} = \underline{F}_к - \underline{F}_{раб}. \qquad (1.14)$$

В технике релейной защиты используются оба рассмотренных принципа. Принцип наложения оказывается особенно эффективным, когда требуется определение только *аварийных слагающих* токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей, обычно практически отсутствующих в рабочих режимах, а иногда и аварийных слагающих прямой последовательности или полных аварийных слагающих, также отсутствующих в рабочих режимах. При простых видах повреждений они непосредственно определяются по известному рабочему напряжению (при КЗ) или рабочему току (при разрыве фазы) в месте последующего повреждения.

Необходимо отметить, что токи в месте ответвления к точке КЗ (не в ветвях схемы) определяются только аварийными слагающими.

Особенности использования принципа наложения. Применительно к определению токов и напряжений при КЗ в одной точке K (рис. 1.19, *а*) принцип базируется на допустимости включения в месте КЗ двух идеальных (с внутренним сопротивлением, равным нулю) источников ЭДС (в литературе часто неудачно — двух напряжений) $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$, равных по значению и противоположно направленных. Значения $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$ принимаются равными напряжению $\underline{U}_{к,раб}$ в точке K до наступления повреждения. Регулирующее действие двух этих источников отсутствует (их векторы совпадают по фазе, и их разность равна нулю — рис. 1.19, *б*).

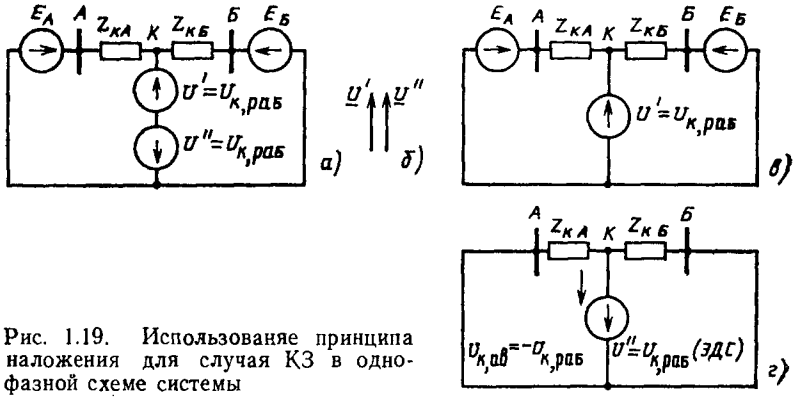


Рис. 1.19. Использование принципа наложения для случая КЗ в однофазной схеме системы

Эквивалентные ЭДС $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ в сочетании с источником ЭДС $\underline{U}'$ характеризуют рабочий режим, имевшийся до возникновения КЗ (рис. 1.19, *в*). Второй источник ЭДС $\underline{U}''$ создает условия собственно аварийного режима (рис. 1.19, *г*), а получающиеся в нем токи и напряжения принято называть аварийными слагающими. Приведенное рассмотрение полностью характеризует принцип наложения только для случая металлического КЗ в однофазной системе или трехфазного КЗ в трехфазной. Полное аварийное напряжение в точке КЗ $\underline{U}_{к,ав}$ при принятии для него положительного направления от точки КЗ (например фазного напряжения по отношению к земле) будет тогда равно $-\underline{U}_{к,раб}$ (рис. 1.19, *г*).

Преобразование трехфазных цепей в однофазные. Рассматриваемые ниже трехфазные электрические системы являются в первом приближении симметричными и линейными. Их анализ работы при несимметричных повреждениях во многих случаях значительно упрощается при преобразовании фазных величин (напряжений, токов, сопротивлений), обеспечивающем представление расчетной трехфазной схемы в виде одной или нескольких однофазных схем. Для этого может быть использована система симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности, которые в случае необходимости объединяются в комплексную расчетную схему.

Метод симметричных составляющих, известный в технике с 1912 г., в законченном виде изложен в 1918 г. Фортескью и использован далее Эвансом и Вагнером (США) для расчетов КЗ. Он применим как при определении симметричных составляющих по заданным ЭДС источников питания, так и при использовании принципа наложения.

Некоторые особенности применения симметричных составляющих. Общие вопросы их применения подробно рассмотрены в учебной литературе [29]. Здесь же необходимо только подчеркнуть, что они используются как для мгновенных значений величин, так и для их амплитудных значений, их аварийных слагающих при поперечных несимметриях (КЗ в одной точке) и при продольных несимметриях (разрывы фаз), а также при сложных видах повреждений, например обрывах фаз, сопровождающихся КЗ в системе. При использовании метода для расчета переходных процессов сопротивления выражаются в операторной форме, а токи получаются в виде их изображений; по ним получаются их оригиналы, выражающие величины в функции времени. В заключение следует отметить, что для некоторых сложных, специальных случа-

ев используются не симметричные, а другие составляющие [31], а также иногда решение систем алгебраических, дифференциальных, операторных уравнений и специальные комплексные расчетные схемы с промежуточными трансформаторами (Н. И. Соколов и др.).

Периодические, гармонические, апериодические и затухающие колебательные знакопеременные функции. Периодической, как известно, называется функция $f(t)$, если она определена на всей действительной оси и для нее выполняется равенство $f(t)=f(t+T)$, в котором период T выражается через частоту f по формуле $T=1/f$, где T измеряется в секундах, а частота f — в периодах в секунду.

Гармоническая (тригонометрическая) функция (тока, напряжения и т. д.) часто представляется в виде $A=A_m\sin(\omega t+\psi)$ или $A=A_m\times\times\cos(\omega t+\psi)$, где A_m — ее амплитуда; ψ — начальная фаза; ω — угловая (круговая) частота, равная $2\pi f$ и измеряемая в радианах в секунду.

Гармоническую функцию иногда требуется представить в виде суммы синусоиды и косинусоиды, каждая из которых имеет нулевую начальную фазу. Учитывая, что $\sin(\omega t+\psi)=\cos\psi\sin\omega t+\sin\psi\cos\omega t$, получаем $A=A_m\sin(\omega t+\psi)=A_{m1}\sin\omega t+A_{m2}\cos\omega t$, где $A_{m1}=A_m\cos\psi$ и $A_{m2}=A_m\sin\psi$, причем $A_m^2=A_{m1}^2+A_{m2}^2$.

При сложении гармонических колебаний одинаковой частоты (периода) получаются гармонические колебания той же частоты. Если частоты гармоник не равны, но соизмеримы, т. е. относятся как целые числа, при их сложении получается **периодическая функция с новым** периодом. Действительно, если, например, $T_1=1/30$ с, а $T_2=1/20$ с, то три периода первого слагаемого составляют два периода второго и через 1/10 с будут повторяться значения обоих, а значит, и значение их суммы; период суммарной функции составит, таким образом, 1/10 с.

Кратные частоты являются частным случаем соизмеримых частот. Если частоты несоизмеримы, то сумма их не будет являться периодической функцией.

Затухающие колебания представляются выражением вида $A_m e^{-\delta t}\times\times\sin(\omega t+\psi)$. Нули этой функции (кривая *а* на рис. 1.20) повторяются через равные промежутки времени τ; промежутки времени между последовательными максимумами также постоянны и равны. Однако эти максимумы не находятся посередине между нулями, а сдвинуты влево. Поэтому рассматриваемая функция не является периодической, так как для нее не существует такого τ, для которого при любом времени t было бы справедливо выражение $f(t+\tau)=$

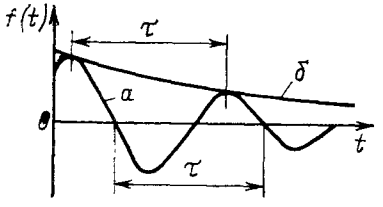


Рис. 1.20. Колебательная (знакопеременная) затухающая (кривая *а*) и апериодическая (кривая *б*) функция времени

$=f(t)$. Величину τ часто называют периодом (поскольку для заданной кривой *а* τ постоянно), а функцию $f(t)$ — гармонической, хотя это принципиально неверно. Более правильно ее можно было бы называть колебательной (знакопеременной) затухающей функцией. Рассматриваемые выражения для $f(t)$ справедливы и при $\omega=0$, когда она превращается в апериодическую (кривая *б* на рис. 1.20).

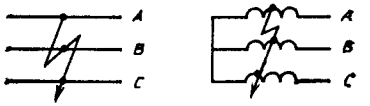
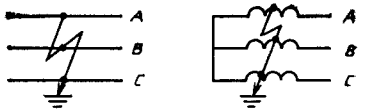
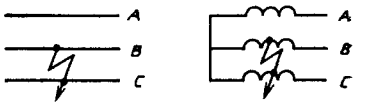
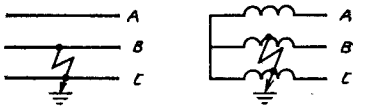
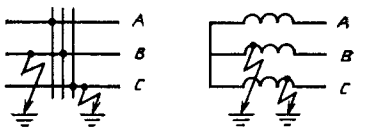
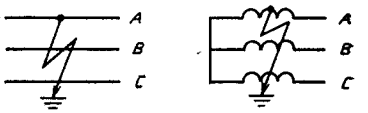
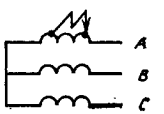
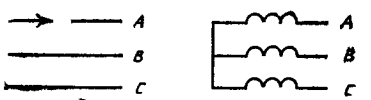
1.6. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ ОТ ЭТИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Общие данные. Повреждения в электрических системах чаще возникают на линиях сетей. Повреждения в обмотках электрических машин, и особенно таких аппаратов, как трансформаторы и автотрансформаторы, бывают реже, иногда имеют специфический характер, обусловленный их выполнением (например, витковые КЗ), и могут сопровождаться тяжелыми для них последствиями. Основные виды повреждений приведены в табл. 1.2. Возможны и более сложные виды повреждений, представляющие сочетание некоторых из перечисленных. Так, например, при разрыве провода линии у изолятора упавший на землю конец вызывает появление однофазного КЗ — $K^{(1)}$ или однофазного замыкания — $K_з^{(1)}$ (например, в сети с изолированными нейтралями) с разрывом фазы. Соотношения, подобные разрыву, возникают также при отказах в работе части фаз автоматических выключателей (характерны для воздушных выключателей с пофазным приводом). В процессе развития повреждений возможны также переходы одного вида повреждений в другой, чаще с охватом большего числа фаз. Так, например, $K_з^{(1)}$ иногда переходят в двойные КЗ на землю $K_{дв}^{(1,1)}$, что может быть на линиях или при $K_з^{(1)}$ в обмотке машины или аппарата и возникновении $K_{дв}^{(1,1)}$ за счет пробоя на землю на линии того же напряжения. С другой стороны, внутри однофазных аппаратов многофазные КЗ (без земли) практически вообще невозможны.

Ниже в данной главе рассматриваются повреждения на линиях сетей. Особенности повреждений в машинах и аппаратах кратко характеризуются в соответствующих главах об их защитах. Необходимо, однако, отметить, что ряд соотношений, характерных для линий, относятся и к машинам, и к аппаратам (например, при внешних КЗ, разрывах фаз и т. д.).

Переходные сопротивления в месте повреждения. Пере-

Таблица 1.2

Повреждения	Разновидности и обозначения	Линии и шины, изображения	Машины и аппараты, изображения
Трехфазные КЗ	КЗ между тремя фазами — $K^{(3)}$		
	Трехфазное КЗ на землю — $K^{(1,1,1)}$		
Двухфазные КЗ	КЗ между двумя фазами — $K^{(2)}$		
	Двухфазное КЗ на землю — $K^{(1,1)}$		
	Двойное КЗ на землю — $K^{(1,1)}_{дв}$		
Однофазные КЗ и однофазные замыкания на землю	Однофазное КЗ — $K^{(1)}$ и однофазное замыкание на землю $K^{(1)}_{з}$		
	Однофазное витковое КЗ — $K^{(1)}_{в}$		
Разрыв фазы	L		

ходные сопротивления $R_п$ в общем случае определяются сопротивлениями электрических дуг, посторонних предметов в месте повреждения, опор и их заземлений, а также сопротивлениями между проводами фаз и землей (например, при падении проводов на землю).

При замыканиях *между фазами* переходные сопротивления часто определяются сопротивлениями дуг. Вольт-амперная характеристика дуги резко нелинейная. В течение каждого полупериода сопротивление дуги значительно изменяется; при этом форма тока в ней обычно остается близкой к синусоидальной, так как ток в основном определяется сопротивлениями элементов системы. Напряжение на дуге в отличие от тока сильно искажается (рис. 1.21, *а*).

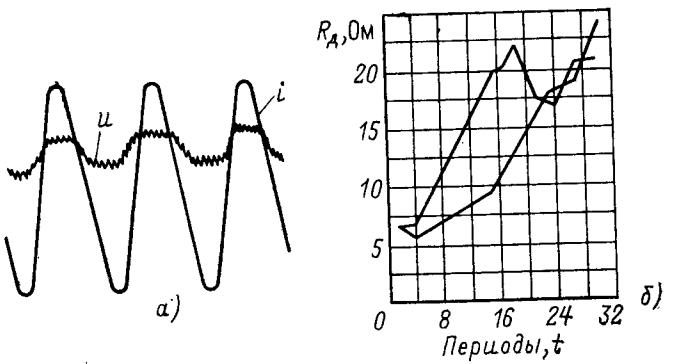


Рис. 1.21. Короткие замыкания через открытые электрические дуги

При рассмотрении работы защит обычно используется представление об эквивалентном сопротивлении дуги; при этом нужно иметь в виду, что дуга является источником высших гармоник.

Экспериментальные исследования открытых дуг, проводившиеся во многих странах, показали, что при токах $I_д$ в дуге в сотни ампер и более сопротивление дуги (эквивалентное значение), являющееся практически активным, может в общем случае определяться по выражению $R_д = U_m l_д / I^k_д$, в котором U_m — градиент напряжения на дуге, В/м; $l_д$ — ее длина, м.

В отечественной практике на основании исследований В. В. Бургсдорфа градиент напряжения на дуге как мало

зависящий от тока при больших его значениях принимается постоянным и равным 1400—1500 В/м, а показатель степени $k=1$. Тогда $R_д$, Ом, рассчитанное по амплитудным значениям, будет

$$R_д = U_m l_д / I_m = U_m l_д / 1{,}41 I_д \approx 1050 l_д / I_д, \qquad (1.15)$$

где $I_д$ — действующий ток, А.

Напряжение на дуге в течение полупериода часто имеет плоскую форму с коэффициентом амплитуды около 1,1—1,2. Поэтому сопротивление $R_д$ было бы бо́льшим при определении по действующему значению напряжения. При небольших токах повреждения коэффициент в формуле (1.15) увеличивается.

Дуга имеет наименьшее сопротивление в первые периоды времени возникающего повреждения, когда ток $I_д$ имеет максимальное значение, а ее длина $l_д$ — минимальное. Далее под влиянием ветра, конвекции воздуха и электродинамических усилий дуга удлиняется и ее сопротивление с некоторыми «провалами», вызываемыми дополнительными перекрытиями, начинает быстро возрастать (рис. 1.21, *б*). При деревянных опорах в случае КЗ на землю через них дуга иногда может погаснуть даже без отключения поврежденного элемента; однако, как правило, дуга ликвидируется только после отключения КЗ релейной защитой.

В отличие от КЗ между фазами при *КЗ на землю* определяющими обычно являются другие слагающие переходных сопротивлений. Так, например, при перекрытии фазы линии на опору $R_п$ может в основном обусловливаться сопротивлением заземления опоры. Согласно ПУЭ эти сопротивления при токах промышленной частоты и отсоединенных молниезащитных тросах в летнее время при металлических и железобетонных опорах не должны превышать 5—20 Ом в зависимости от удельных сопротивлений земли.

При глухом заземлении тросов на каждой опоре результирующее сопротивление заземления опор уменьшается. Однако в последние годы на линиях 220 кВ и выше крепление тросов на опорах выполняется изоляторами с шунтирующими искровыми промежутками (для снижения потерь энергии от токов, наводимых в тросах, а иногда и для использования тросов в других целях) с заземлением на анкерном участке всего в одном месте. При этом приходится считаться со значительными сопротивлениями заземления отдельных опор.

Небольшие сопротивления $R_п$ характерны только для

КЗ на землю на электроустановках (согласно ПУЭ сопротивление их заземляющих устройств в системах с глухозаземленными нейтралями не должно превосходить 0,5 Ом).

Наличие переходных сопротивлений $R_п$, особенно при КЗ на землю на линиях, может существенно отражаться на работе защит и должно учитываться при их выполнении. В частности, это осуществляется при установлении для защит минимально допустимых коэффициентов чувствительности.

Короткие замыкания в одной точке. В общем случае КЗ в одной точке K трехфазной системы через переходные сопротивления $R_п$ неодинаковых значений может быть представлено схемой на рис. 1.22. Здесь и в дальнейшем за ус-

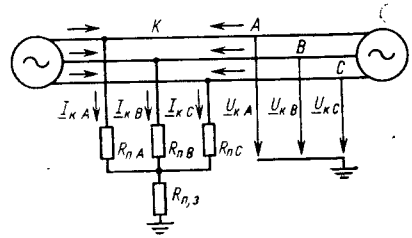


Рис. 1.22. Общий случай КЗ в одной точке через переходные сопротивления

ловные положительные направления токов КЗ принимаются направления токов в фазах линии к месту повреждения, в ответвлении КЗ — от фаз к земле, а фазных напряжений — также от фаз к земле.

Возникшее КЗ характеризуется уравнениями

$$\underline{U}_{кA} = R_{пA}\underline{I}_{кA} + 3R_{п,з}\underline{I}_{к0};$$

$$\underline{U}_{кB} = R_{пB}\underline{I}_{кB} + 3R_{п,з}\underline{I}_{к0};$$

$$\underline{U}_{кC} = R_{пC}\underline{I}_{кC} + 3R_{п,з}\underline{I}_{к0}.$$

Фазные напряжения $U_к$ в точке КЗ и токи $I_к$, проходящие через $R_п$, могут быть выражены через симметричные составляющие.

На практике обычно довольствуются значительно более упрощенными выражениями, в которых в зависимости от вида повреждения отдельные $R_п$ принимаются равными нулю, бесконечности или равными между собой. Примеры ти-

пичных упрощенных представлений повреждений через $R_и$ приведены на рис. 1.23. При этом появляется возможность учитывать фазные $R_п$ как симметричные элементы системы.

При малых или равных нулю $R_п$ КЗ называются металлическими.

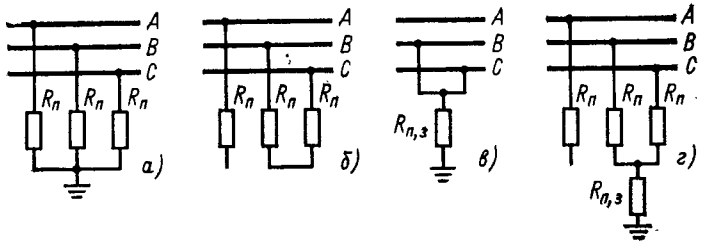


Рис. 1.23. Примеры упрощенного учета переходных сопротивлений в месте КЗ

Расчетные условия. Работа защитных устройств при КЗ в большинстве случаев определяется периодическими слагающими промышленной частоты токов $I_р$ и напряжений $U_р$, подводимых к реле, а также сдвигами по фазе $\varphi_р$ между ними. Ниже в целях упрощения рассматриваются характеризующие их соотношения для ненагруженной линии с односторонним питанием (рис. 1.24) в начальный момент повреждения. Учет двустороннего питания, нагрузок и других дополнительных факторов проводится только для некоторых характерных случаев. Для выявления правильных фазных соотношений учитываются как активные слагающие сопротивлений элементов системы, так и переходные сопротивления $R_и$ с ограничениями, рассмотренными выше.

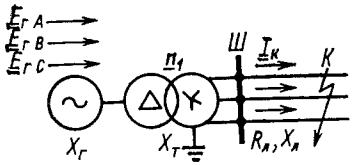


Рис. 1.24. Повреждение на ненагруженной линии с односторонним питанием

Защищаемая линия, на которой рассматриваются повреждения, считается имеющей только индуктивное и активное сопротивления в разных последовательностях (не учитываются емкостные проводимости, характерные для линий сверхвысоких и ультравысоких напряжений значительной протяженности). Источник питания условно представляется в виде блока генератор — трансформатор; последний имеет соединение обмоток У/Д и возможность глухого заземления нейтрали. Электродвижущие силы фаз генератора $\underline{E}_{гA}$, $\underline{E}_{гB}$ и $\underline{E}_{гC}$ считаются приведенными к стороне высшего напряжения трансформатора с помощью его комплексного коэффициента трансформации, предложенного в 40-е годы Н. А. Мельниковым, и обозначаются соответственно $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$ и $\underline{E}_C$. Комплексный коэффициент трансформации применительно к прямой последовательности $\underline{n}_1 = ne^{j30°N}$ и к обратной последовательности $\underline{n}_2 = ne^{-j30°N}$, где N — номер группы соединений обмоток трансформатора; например для обычно используемой одиннадцатой группы У/Д-11 $N=11$.

В указанных выражениях учитывается переход со стороны У на сторону Д. В рассматриваемом случае переход осуществляется со стороны Д на сторону У; при этом $\underline{n}_1 = ne^{-j30°N}$ и $\underline{n}_2 = ne^{j30°N}$. Суммарное сопротивление источника питания принимается реактивным с равными сопротивлениями прямой и обратной последовательностей. Для трансформатора реактивное сопротивление нулевой последовательности учитывается равным его сопротивлению прямой последовательности, что точно только для группы из однофазных трансформаторов.

Трехфазные короткие замыкания в одной точке. Векторные диаграммы напряжений и токов фаз при металлическом КЗ между тремя фазами $K^{(3)}$ в точке K линии (на расстоянии, характеризуемом $\underline{Z}_л = R_л + jX_л$) приведены на рис. 1.25.

Токи $\underline{I}_к$ при принятых условных положительных направлениях отстают от соответствующих ЭДС $\underline{E}$ (рис. 1.25, *б*) на угол $\varphi_c^{(3)} = \operatorname{arctg}(X_г + X_т + X_л)/R_л$. Остаточные фазные и междуфазные напряжения возрастают по мере удаления от места КЗ, где $\underline{U}_к^{(3)} = 0$. Например, на шинах $Ш$ $\underline{U}_{к,ш}^{(3)} = \underline{Z}_л \times \underline{I}_к^{(3)} = (R_л + j\underline{X}_л)\underline{I}_к^{(3)}$. Фазные напряжения $\underline{U}_{к,ш}^{(3)}$ опережают соответствующие им токи $\underline{I}_к^{(3)}$ на угол $\varphi_л = \operatorname{arctg} X_л/R_л$. Рассматриваемая диаграмма характеризует и трехфазные КЗ на землю, возникающие, например, при ошибочном включении под напряжение закороченной линии, находившейся в ремонте.

При КЗ через симметричные $R_п$ $\varphi_c^{(3)} = \operatorname{arctg}(X_г + X_т +$

$+X_л)/(R_л+R_п)$; $\underline{U}^{(3)}_{к,ш} = (R_л+R_п+jX_л)\underline{I}^{(3)}_к$; $\widehat{\underline{U}^{(3)}_{к,ш}\underline{I}^{(3)}_к} = \operatorname{arctg} X_л/(R_л+R_п)$.

Фазные соотношения между электрическими величинами в рассматриваемых случаях симметричного КЗ остаются теми же и со стороны генераторного напряжения, где действуют реальные ЭДС $\underline{E}_г$, так как вся диаграмма поворачивается на угол, определяемый группой соединения У/Д трансформатора, до совпадения $\underline{E}$ по фазе с $\underline{E}_г$ (на $j30°N$).

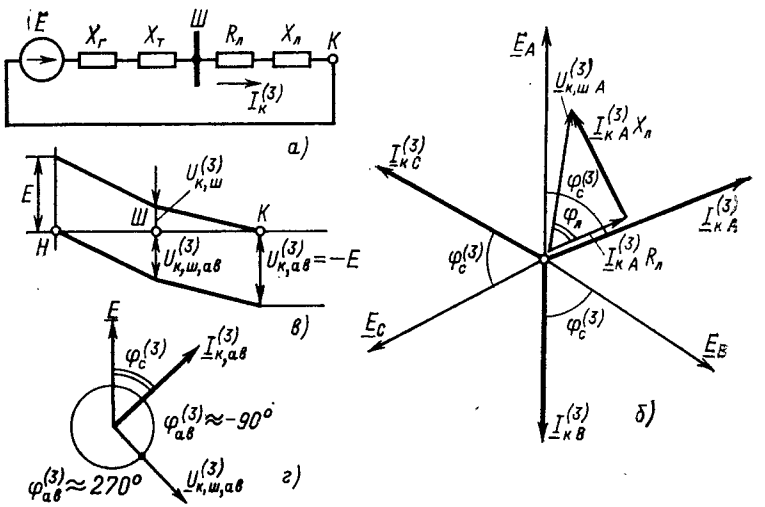


Рис. 1.25. Соотношения электрических величин при металлическом $K^{(3)}$

Аварийные слагающие $I^{(3)}_{к,ав}$ в рассматриваемом случае КЗ на ненагруженной линии равняются $I^{(3)}_к$. Иные соотношения получаются для аварийных напряжений. Для места повреждения K $\underline{U}^{(3)}_{к,ав} = \underline{U}^{(3)}_к - \underline{E}$ (рис. 1.25, *в*). При металлическом КЗ, когда $\underline{U}^{(3)}_к = 0$, $\underline{U}^{(3)}_{к,ав} = -\underline{E}$.

Аварийные напряжения в отличие от остаточных напряжений $U^{(3)}_к$ уменьшаются по мере удаления от места повреждения. Они имеют наибольшее значение в точке K и равны нулю в нейтралях генераторов. Поэтому их проще

всего определять как падение напряжения от нейтрали до точки *Ш* — шин подстанции. При принятых условных положительных направлениях $\underline{U}^{(3)}_{к,ш,ав} = -j(X_г+X_т)\underline{I}^{(3)}_к$. Переходные сопротивления $R_п$, как видно из выражения для $\underline{U}^{(3)}_{к,ш,ав}$, на значение угла между $\underline{I}^{(3)}_{к,ав}$ и $\underline{U}^{(3)}_{к,ав}$ не влияют. Это, очевидно, будет справедливо и для других аварийных составляющих (обратной, нулевой). Поэтому угол $\varphi^{(3)}_{ав}$ всегда близок к (—90°) или 270° (рис. 1.25, *г*), даже когда место включения защиты удалено от генераторов и учитываются активные сопротивления линий и $R_п$.

Степень опасности того или другого вида КЗ на линиях характеризуется прежде всего влиянием на устойчивость системы и непосредственно на работу ее потребителей. Поэтому $K^{(3)}$, характеризуемые наибольшим возможным снижением напряжения прямой последовательности (у места КЗ до нуля), являются наиболее тяжелыми. Однако, учитывая малую вероятность этого вида КЗ в сетях высокого и особенно сверхвысокого напряжения, имеющих обычно глухозаземленные нейтрали, за расчетный (при определении устойчивости) принимают следующий за $K^{(3)}$ по тяжести вид КЗ — $K^{(1,1)}$ (см., например, [30]).

Двухфазные короткие замыкания в одной точке. Рассматриваются следующие разновидности двухфазных КЗ (см. табл. 1.2): $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ в системе с изолированными нейтралями и $K^{(1,1)}$ в системе с глухозаземленными нейтралями. Повреждение $K^{(1,1)}$ в разных точках ($K^{(1,1)}_{дв}$) как сложный вид КЗ рассматривается отдельно.

Короткое замыкание между двумя фазами. Векторная диаграмма полных напряжений и токов фаз при металлическом $K^{(2)}_{BC}$ в точке K линии рис. 1.24 приведена на рис. 1.26, *а*. Граничные условия для $K^{(2)}$: $I^{(2)}_{кA}$ в неповрежденной фазе A отсутствует, $\underline{I}^{(2)}_{кB} = -\underline{I}^{(2)}_{кC}$, $\underline{U}^{(2)}_{кBC} = \underline{U}^{(2)}_{кB} - \underline{U}^{(2)}_{кC} = 0$. Токи определяются ЭДС $\underline{E}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C$, действующей в контуре их циркуляции. При принятом равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей ток $\underline{I}^{(2)}_{кB}$ отстает от $\underline{E}_{BC}$ на угол $\varphi^{(2)}_с = \varphi^{(3)}_с$. Фазное напряжение $\underline{U}^{(2)}_{кA} = \underline{E}_A$, фазные напряжения $\underline{U}^{(2)}_{кB} = \underline{U}^{(2)}_{кC} = -0{,}5\underline{E}_A$, поскольку сумма $\underline{U}^{(2)}_{кA} + \underline{U}^{(2)}_{кB} + \underline{U}^{(2)}_{кC}$ во всех точках системы, в том числе и в точке K, остается равной нулю.

Напряжения в нейтралях генератора и трансформатора (если бы даже нейтраль последнего была не заземлена),

как и при нормальной работе, равны нулю. По мере удаления от места повреждения $\underline{U}_A^{(2)}$ остается неизменным, напряжения поврежденных фаз изменяются. Например, на шинах *Ш*

$$\underline{U}_{к,шB}^{(2)} = \underline{U}_{кB}^{(2)} + (R_л + jX_л)\,\underline{I}_{кB}^{(2)};$$
$$\underline{U}_{к,шC}^{(2)} = \underline{U}_{кC}^{(2)} + (R_л + jX_л)\,\underline{I}_{кC}^{(2)}.$$

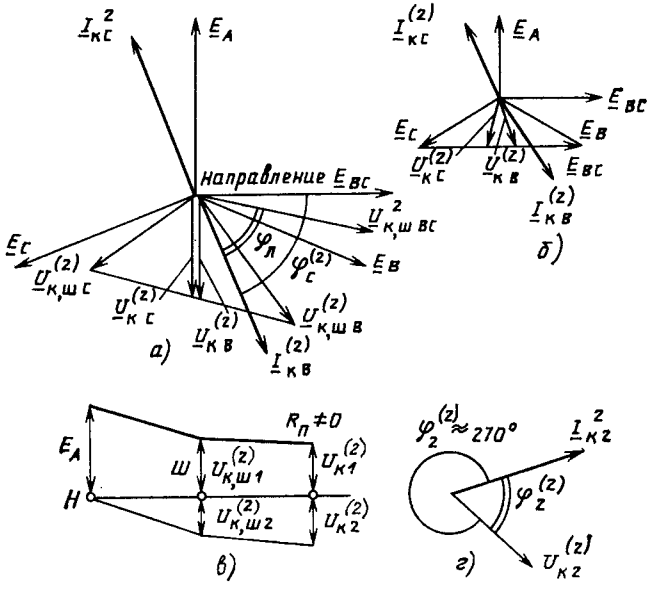


Рис. 1.26. Соотношения электрических величин при $K^{(2)}$

Напряжение $\underline{U}_{к,шBC}^{(2)} = 2(R_л + jX_л)\underline{I}_{кB}^{(2)}$. Оно опережает ток $\underline{I}_{кB}^{(2)}$ на угол $\varphi_л$, определяемый, как и при $K^{(3)}$.

Следует отметить, что фазные напряжения $\underline{U}_{к,шB}^{(2)}$ и $\underline{U}_{к,шC}^{(2)}$ с учетом того, что $\varphi_л \neq \varphi_c^{(2)}$, оказываются неравными, причем напряжение опережающей фазы *B* больше, чем отстающей фазы *C*.

Еще большие искажения векторных диаграмм напряжений возникают при повреждениях через $R_п$. При этом, как было показано еще в начале 30-х годов, учет $R_п$ при повреждениях обусловливает изменения напряжений фаз по дугам окружностей. Учет равных $R_п$ в фазах *B* и *C* осуществляется включением в месте повреждения сопротивления $2R_п$.

Наиболее простые векторные диаграммы напряжений получаются при равных углах сопротивлений отдельных элементов системы до точки *K*, когда $\varphi_л = \varphi_c^{(2)}$. В этом случае (рис. 1.26, *б*) концы векторов напряжений фаз *B* и *C* по мере удаления от места повреждения скользят по прямой, соединяющей концы векторов $\underline{E}_B$ и $\underline{E}_C$, а напряжение $\underline{U}_{кBC}^{(2)}$ совпадает по фазе с $\underline{E}_{BC}$.

Использование методов симметричных составляющих дает простую возможность более глубокого рассмотрения соотношений при $K^{(2)}$.

Напряжение прямой последовательности $\underline{U}_{к1}^{(2)}$ имеет наименьшее значение в месте повреждения и возрастает по направлению к источнику питания (рис. 1.26, *в*). Напряжение обратной последовательности $\underline{U}_{к2}^{(2)}$, наоборот, максимально в точке повреждения и снижается в том же направлении. Угол сдвига $\varphi_2^{(2)} = \underline{U}_{к2}\underline{I}_{к2}$ при $K^{(2)}$, как и при других видах несимметричных КЗ, не зависит от $R_п$, поскольку определяется только сопротивлениями элементов системы, и близок к 270° (или —90°) (рис. 1.26, *г*).

Полные аварийные слагающие фаз и их отдельные последовательности определяются с учетом соображений, приведенных выше. В частности, необходимо отметить, что аварийная слагающая напряжения прямой последовательности в отличие от $\underline{U}_{к1}^{(2)}$, как и при $K^{(3)}$, имеет наибольшее значение в месте КЗ и образует с $\underline{I}_{к1ав}^{(2)}$ угол, не зависящий от $R_п$. Полные аварийные слагающие в неповрежденной (особой) фазе отсутствуют, например $\underline{U}_{кA\,ав}^{(2)} = \underline{U}_{кA}^{(2)} - \underline{U}_{кA\,раб} = 0$. В поврежденных фазах они есть.

Использование симметричных составляющих дает, в частности, простую возможность проследить, как могут изменяться электрические величины при имеющемся обычно неравенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей генераторов системы. Только при $X_{к1\Sigma} = X_{к2\Sigma}$, как это принималось выше, напряжение неповрежденной фазы $\underline{U}_{к,шA}^{(2)} = \underline{E}_A$. Это сказывается и на напряжениях поврежденных фаз; например, для точки *Ш* $\underline{U}_{к,шB}^{(2)} = \underline{U}_{к,шC}^{(2)} = -0{,}5\underline{U}_{к,шA}^{(2)}$, а не $-0{,}5\underline{E}_A$.

При несимметричных КЗ, к которым относится и $K^{(2)}$, соотношения между $\underline{E}$, $\underline{U}^{(2)}$ и $\underline{I}^{(2)}$ на стороне генераторного

напряжения, где действуют $\underline{E}_г$, оказываются весьма отличными от рассмотренных для стороны с приведенными ЭДС $\underline{E}$. Формально это может быть объяснено тем, что комплексные коэффициенты трансформации для прямой и обратной последовательностей различны.

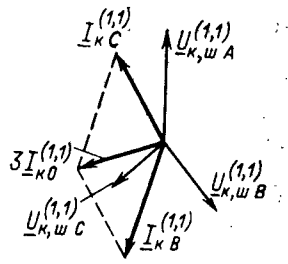
Двухфазное короткое замыкание на землю в сети с изолированными нейтралями. Двухфазные КЗ на землю $K^{(1,1)}$ в сетях с изолированными нейтралями или заземленными через дугогасящие реакторы (в нашей стране это сети с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ) отличаются от $K^{(2)}$ в основном только тем, что поврежденные фазы, например B и C, в месте металлического КЗ принужденно приобретают потенциал земли; появляется напряжение нулевой последовательности, практически одинаковое во всей сети. Нейтраль системы (трансформатора) получает по отношению к земле смещение $U_н = 0{,}5\underline{E}_A$, а напряжение неповрежденной фазы A возрастает до $1{,}5\underline{E}_A$. Значения токов поврежденных фаз, междуфазных напряжений и их фазные соотношения остаются такими же, как при $K^{(2)}$. За трансформатором, в системе генераторного напряжения смещения нейтрали генератора не происходит, так как трансформируются только составляющие прямой и обратной последовательностей.

Двухфазное короткое замыкание на землю в сети с глухозаземленными нейтралями. Двухфазные КЗ на землю $K^{(1,1)}$ в сетях с глухозаземленными нейтралями (см. рис. 1.24) могут сопровождаться сильным снижением как междуфазного, так и фазных напряжений поврежденных фаз (в месте КЗ до нуля при $R_п = 0$ и $R_{п,з} = 0$) и появлением составляющих нулевой последовательности не только в фазных напряжениях (как в сетях с изолированными нейтралями), но и в токах. Соотношения электрических величин при этом виде повреждений наиболее просто выявляются при использовании метода симметричных составляющих.

Примерный вид векторной диаграммы полных токов и напряжений дан на рис. 1.27. Угол δ между токами $I_{кB}^{(1,1)}$ и $I_{кC}^{(1,1)}$ поврежденных фаз в общем случае изменяется в широких пределах: $60° < \delta \leqslant 180°$, причем верхний предел относится к случаю обычного $K^{(2)}$, когда $Z_{к0\Sigma} = \infty$, а нижний (нереальный) соответствует $Z_{к0\Sigma} \to 0$. Ток, проходящий через $R_{п,з}$ в землю, $3\underline{I}_{к0}^{(1,1)} = \underline{I}_{кB}^{(1,1)} + \underline{I}_{кC}^{(1,1)}$.

Соотношение между $\underline{U}_{к0}^{(1,1)}$ и $\underline{I}_{к0}^{(1,1)}$, появляющимися при

Рис. 1.27. Соотношения электрических величин при $K^{(1,1)}$



$K^{(1,1)}$ с учетом того, что в глухозаземленной нейтрали трансформатора $U_н = 0$, определяется для шин подстанции и места повреждения выражениями $\underline{U}_{к,ш0}^{(1,1)} = -jX_т\underline{I}_{к0}^{(1,1)}$ и $\underline{U}_{к0}^{(1,1)} = -[R_{0л} + j(X_т + X_{0л})]\underline{I}_{к0}^{(1,1)}$, где $X_{0л}$ и $R_{0л}$ — реактивное и активное сопротивления нулевой последовательности линии до места повреждения K.

Как и для других составляющих, переходное сопротивление $R_{п,з}$ на землю в приведенные выражения для $\underline{U}_0^{(1,1)}$ не входит и угол $\varphi_0^{(1,1)} = \overset{\frown}{U_{к,ш0}^{(1,1)} I_{к0}^{(1,1)}} \approx 270°$.

Следует также отметить, что существует определенное соотношение между $I_0^{(1,1)}$ и $I_0^{(1)}$ (при однофазном КЗ), рассмотренное ниже и облегчающее проведение расчетов защит, использующих составляющие нулевой последовательности.

Соотношения между $\underline{U}_2^{(1,1)}$ и $\underline{I}_2^{(1,1)}$ определяются подобно соотношениям для $\underline{U}_0^{(1,1)}$ и $\underline{I}_0^{(1,1)}$ с той разницей, что отсчет ведется от нейтрали генератора, имеющей потенциал, равный нулю. Поэтому, например, для шин подстанции $\underline{U}_{к,ш2}^{(1,1)} = -j(X_г + X_т)\underline{I}_{к2}^{(1,1)}$ и угол $\varphi_2^{(1,1)} = \overset{\frown}{U_{к,ш2}^{(1,1)} I_{к2}^{(1,1)}} \approx 270°$.

Из всех видов несимметричных двухфазных КЗ рассматриваемые характеризуются наименьшими значениями напряжений прямой последовательности и поэтому являются наиболее тяжелыми (расчетными) по условиям сохранения устойчивой работы системы.

Однофазные короткие замыкания в сети с глухозаземленными нейтралями. Однофазные КЗ $K^{(1)}$ являются наиболее частым видом повреждений в сетях глухозаземленными нейтралями. С таким режимом заземления нейтралей в нашей стране работают сети 110 кВ и выше. В сетях 330 кВ и выше обычно заземляются все нейтрали. В сетях

с глухозаземленными нейтралями отношение результирующих сопротивлений $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} < 3 \div 4$. Это отношение вблизи шин станций и подстанций, на которых могут устанавливаться мощные автотрансформаторы, всегда имеющие глухозаземленные нейтрали, бывает значительно меньшим. Иногда при проектировании возникают даже случаи, когда $X_{0\Sigma} \ll X_{1\Sigma}$ и ток однофазного КЗ превосходит ток трехфазного КЗ, что может оказаться неприемлемым по условиям выбора коммутационной аппаратуры. Для уменьшения токов КЗ на землю, а иногда также для улучшения условий

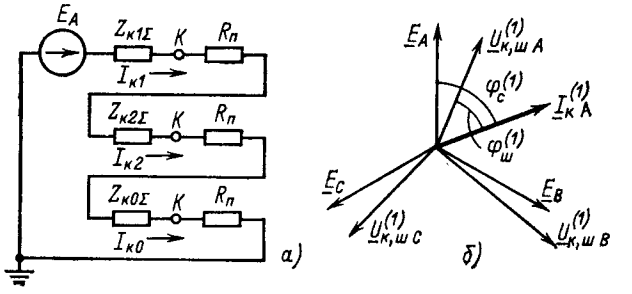


Рис. 1.28. Соотношения электрических величин при $K^{(1)}$ через $R_п$

работы релейной защиты сетей (примерной стабилизации уровня I_0 при разном числе включенных трансформаторов) часть нейтралей трансформаторов может разземляться, если их выполнение это допускает (например, при $U_{ном} = 110$ кВ).

Для выявления соотношений электрических величин при $K^{(1)}$ целесообразно использование метода симметричных составляющих. Комплексная схема последовательностей, соответствующая рис. 1.24, при учете, что особой является фаза A, имеющая в точке K переходное сопротивление $R_п$ на землю, приведена на рис. 1.28, *а*. Граничные условия характеризуются соотношениями $\underline{I}^{(1)}_{кB} = 0$; $\underline{I}^{(1)}_{кC} = 0$; $\underline{U}^{(1)}_{кA} = R_п \underline{I}^{(1)}_{кA}$. В соответствии с комплексной схемой $\underline{I}^{(1)}_{к1} = \underline{I}^{(1)}_{к2} = \underline{I}^{(1)}_{к0} = \underline{E}/\{2R_{1л} + R_{0л} + 3R_п + j[2(X_г + X_т + X_{1л}) + X_т + X_{0л}]\}$ и $\underline{I}^{(1)}_{кA} = 3\underline{I}^{(1)}_{к0}$.

Соотношения между напряжениями и токами нулевой и обратной последовательностей определяются, как для $K^{(1,1)}$. Например, $\underline{U}^{(1)}_{к,ш0} = -jX_т \underline{I}^{(1)}_{к0}$; на угол между $\underline{U}^{(1)}_{к,ш0}$ и $\underline{I}^{(1)}_{к0}$

$R_п$ не влияет, и он примерно равен 270°. Необходимо только отметить, что прямо из комплексной схемы замещения на рис. 1.28, *а* не видно, где потенциалы $\underline{U}^{(1)}_0$ и $\underline{U}^{(1)}_2$ имеют нулевые значения. Им соответствуют, исходя из других (физических) представлений, начала схем нулевой и обратной последовательностей, т. е. нейтраль заземленного трансформатора (для $\underline{U}_0$) и нейтраль генератора (для $\underline{U}_2$). На векторной диаграмме (рис. 1.28, *б*) $\underline{I}^{(1)}_{кA}$ отстает от $\underline{E}_A$ на угол $\varphi^{(1)}_c = \operatorname{arctg}[2(X_г + X_т + X_{1л}) + X_т + X_{0л}]/(2R_{1л} + R_{0л} + 3R_п)$.

Фазное напряжение $U^{(1)}_A$ при приближении к источнику питания возрастает, и в месте $Ш$ установки защиты $\underline{U}^{(1)}_{к,шA} = \underline{U}^{(1)}_{кA} + [2(R_{1л} + jX_{1л}) + R_{0л} + jX_{0л}]\underline{I}^{(1)}_{k1}$. Угол $\widehat{\underline{U}^{(1)}_{кA}\underline{I}^{(1)}_{кA}}$ в месте КЗ K $\varphi^{(1)}_к = 0$, а у шин $\varphi^{(1)}_ш = \operatorname{arctg}(2X_{1л} + X_{0л})/(2R_{1л} + R_{0л} + 3R_п)$.

Несколько более сложно определяются напряжения неповрежденных фаз B и C. Только в частном, практически малореальном случае равенства сопротивлений во всех трех последовательностях они остаются равными $\underline{E}_B$ и $\underline{E}_C$ с углом сдвига 120°. Практически же они сильно искажаются и могут быть как меньше, так и больше напряжений при нормальной работе. Примерный вид этих напряжений показан на векторной диаграмме на рис. 1.28, *б* в предположении, что результирующее сопротивление нулевой последовательности больше, чем прямой последовательности; при этом напряжения $|\underline{U}^{(1)}_{кB}|$ и $|\underline{U}^{(1)}_{кC}|$ соответственно больше ЭДС $|\underline{E}_B|$ и $|\underline{E}_C|$. При КЗ на шинах $Ш$ результирующее сопротивление нулевой последовательности $X_т$ будет меньше, чем прямой последовательности $X_г + X_т$, и напряжения $|\underline{U}^{(1)}_{кB}| = |\underline{U}^{(1)}_{к,шB}|$ и $|\underline{U}^{(1)}_{кC}| = |\underline{U}^{(1)}_{к,шC}|$ соответственно будут меньше ЭДС $|\underline{E}_B|$ и $|\underline{E}_C|$.

При определении токов КЗ часто учитываются только реактивные сопротивления элементов системы, а $R_п$ принимаются равными нулю. В этом случае токи $\underline{I}^{(1)}_{к2}$ и $\underline{I}^{(1)}_{к0}$ в месте КЗ

$$\underline{I}^{(1)}_{к2} = \underline{I}^{(1)}_{к0} = (1/3)\underline{I}^{(1)}_{кA} = \underline{E}/j(2X_{к1\Sigma} + X_{к0\Sigma}).$$

Отношение токов нулевой последовательности в месте повреждения при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ (в случае $X_{к1\Sigma} = X_{к2\Sigma}$) $I^{(1)}_{к0}/I^{(1,1)}_{к0} =$

$= (X_{к1\Sigma} + 2X_{к0\Sigma})/(2X_{к1\Sigma} + X_{к0\Sigma}) = (1 + 2X_{к0\Sigma}/X_{к1\Sigma})/(2 + X_{к0\Sigma}/X_{к1\Sigma})$.

При $X_{к0\Sigma} > X_{к1\Sigma}$ $I^{(1)}_{к0} > I^{(1,1)}_{к0}$ и, наоборот, при $X_{к0\Sigma} < X_{к1\Sigma}$ $I^{(1,1)}_{к0} > I^{(1)}_{к0}$. Как было отмечено еще в 30-е годы в СРЗиУ ТЭП О. М. Богатыревым, эти соотношения для КЗ на одиночных линиях справедливы и для всех ветвей схем нулевой последовательности, поскольку коэффициенты токораспределения в схеме нулевой последовательности не зависят от вида повреждения. Подобные соотношения могут быть получены и для отношения токов обратной последовательности в месте КЗ и в отдельных ветвях [16].

Приведенные выражения дают возможность оценивать расчетные условия для выбора параметров и определения чувствительности защит, реагирующих на составляющие

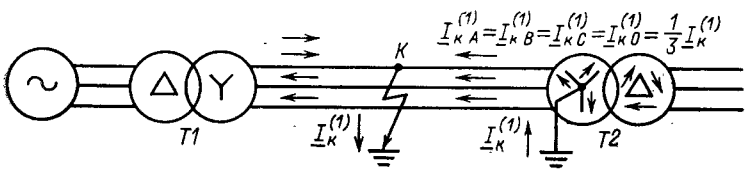


Рис. 1.29. Предельный случай распределения токов при $K^{(1)}$

токов нулевой или обратной последовательности, производя расчет только одного вида КЗ — $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$. Необходимые уточнения значений токов I_0 для случаев КЗ на линиях с взаимоиндукцией приведены в [29].

В общем случае при $K^{(1)}$ по неповрежденным фазам, даже при отсутствии токов нагрузки, проходят токи КЗ. В пределе они достигают значения тока КЗ в поврежденной фазе. В этом случае ток $I^{(1)}_{к} = 3I^{(1)}_{к0}$, проходящий через заземленную нейтраль понижающего трансформатора *T2* (рис. 1.29), принужденно (поскольку токи в его обмотках, соединенных в треугольник, должны быть равны) распределяется между тремя фазами линии на три равные составляющие $I^{(1)}_{к0}$, являющиеся полными токами фаз с этой ее стороны. За местом повреждения *K*, в сторону повышающего трансформатора *T1* с изолированной нейтралью, токи в неповрежденных фазах остаются такими же, как и со стороны *T2*. Однако они уже не являются токами нулевой последовательности, а содержат составляющие только прямой

и обратной последовательностей, так как со стороны *T1* $\underline{I}^{(1)}_{A} + \underline{I}^{(1)}_{B} + \underline{I}^{(1)}_{C} = 0$.

Однофазные КЗ представляют собой тяжелый вид повреждения, хотя и менее опасный для системы, чем многофазные КЗ. Поэтому $K^{(1)}$ должны отключаться также по возможности быстро. Защита может действовать на отключение всех трех фаз линии или только одной поврежденной с последующим ее автоматическим повторным включением. Последний способ оказывается целесообразным для магистральных линий (преимущественно одноцепных) при наличии у выключателей пофазного привода и в некоторых других случаях. При этом, как показывает опыт эксплуатации, повреждения в большинстве случаев самоликвидируются. В сетях с $U_{ном} \geqslant 300 \div 500$ кВ он применяется практически всегда, в сетях 110—220 кВ — реже.

Для защит от $K^{(1)}$ часто используются составляющие нулевой последовательности, так как при этом обеспечивается независимость от рабочих токов и напряжений и некоторые другие преимущества.

Четырехпроводные распределительные сети 380 В также обычно работают с глухозаземленными нейтралями. Соотношения токов КЗ в питающих их трансформаторах при $K^{(1)}$ на землю или четвертый (нулевой) провод даны ниже.

Двойные короткие замыкания на землю. Двойные КЗ на землю $K^{(1,1)}_{дв}$ учитываются только в сетях с нейтралями, изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы. Как уже отмечалось ранее, с таким режимом заземления нейтралей в нашей стране обычно работают сети с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ. Сопротивления емкостей фаз по отношению к земле и дугогасящих реакторов относительно велики и при определении токов $I^{(1,1)}_{дв}$ не учитываются.

Возникают $K^{(1,1)}_{дв}$ обычно в местах с ослабленной изоляцией. По мере повышения качества оборудования и условий эксплуатации относительное число $K^{(1,1)}_{дв}$ снижается, и в настоящее время они являются достаточно редким видом повреждения. Однако при выполнении релейной защиты сетей их учет считается необходимым. В сетях с глухозаземленными нейтралями ($U_{ном} \geqslant 110$ кВ) их практически не бывает, так как однофазные КЗ сопровождаются существенно меньшими перенапряжениями на неповрежденных фазах.

В случае $K^{(1,1)}_{дв}$ на линиях, отходящих от общих шин (рис. 1.30, *а*), при отсутствии взаимоиндукции между ними определение токов и напряжений может осуществляться простейшим образом с учетом того, что токи, как это подчеркивалось еще Р. Рюденбергом в 20-е годы,

проходят под проводами поврежденных линий. Просто определяются соотношения на передаче с двусторонним питанием, сопротивление которой велико по сравнению с сопротивлениями систем $Z_{эк}$, принимаемыми равными нулю (рис. 1.30, *б*). Тогда для трех контуров прохождения токов имеем $\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{Z}_{Lл}\underline{I}_A^{(1,1)} + \underline{Z}_{м,л}\left(\underline{I}_B^{(1,1)} + \underline{I}_C^{(1,1)}\right)$; $\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{Z}_{Lл}\underline{I}_B^{(1,1)} + \underline{Z}_{м,л}\left(\underline{I}_A^{(1,1)} + \underline{I}_C^{(1,1)}\right)$ и $\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{Z}_{Lл}\underline{I}_C^{(1,1)} + \underline{Z}_{м,л}\left(\underline{I}_A^{(1,1)} + \underline{I}_B^{(1,1)}\right)$, откуда $\underline{I}_A^{(1,1)} = \underline{I}_B^{(1,1)} = \underline{I}_C = (\underline{E}_B - \underline{E}_C)/(\underline{Z}_{Lл} + 2\underline{Z}_{м,л}) = (\underline{E}_B - \underline{E}_C)/\underline{Z}_{0л}$, где $Z_{Lл}$ и $Z_{м,л}$ — соответственно сопротивления провод — земля и сопротивление взаимоиндукции между проводами.

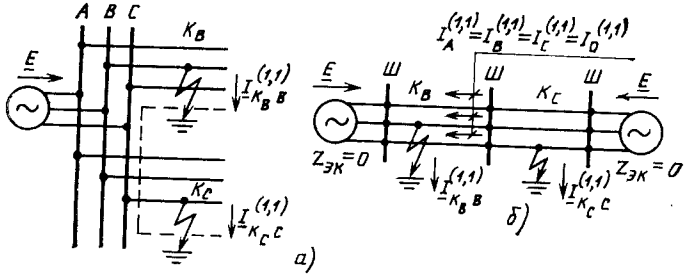


Рис. 1.30. Двойные замыкания на землю $K_{дв}^{(1,1)}$

Таким образом, в рассматриваемом предельном случае токи во всех трех фазах равны, т. е. имеют только составляющие нулевой последовательности. В реальных случаях необходимо считаться с наличием тока в неповрежденной фазе, за исключением случаев, подобных данному на рис. 1.30, где он равен нулю. Двойное КЗ на землю относят к сложным, так как оно характеризуется возникновением несимметрии (поперечной) в двух местах электрической сети. Необходимо отметить, что большой вклад в анализ сложных повреждений разного вида (в том числе и $K_{дв}^{(1,1)}$) был внесен в начале 30-х годов Н. Н. Щедриным, И. М. Марковичем, а в дальнейшем А. Б. Чернины, С. Б. Лосевым и другими советскими специалистами. Соотношения выявлялись при этом с использованием метода симметричных составляющих, а в дальнейшем и других составляющих [31].

При $K_{дв}^{(1,1)}$ напряжения между поврежденными фазами в отличие от фазных во всех точках сети, в том числе и в местах повреждения, имеют конечные значения, уменьшаются при сближении этих мест и при их совпадении равны нулю, а повреждение $K_{дв}^{(1,1)}$ превращается в $K^{(1,1)}$ в одной точке. Сдвиг по фазе $\varphi_{0дв}^{(1,1)} = \underline{U}_{0дв}^{(1,1)}\underline{I}_{0дв}^{(1,1)}$ имеет сильно

изменяющиеся значения, отличающиеся от $\varphi_0^{(1)} \approx \varphi_0^{(1,1)} \approx -90°$ в связи с влиянием переходных сопротивлений $R_п$ на землю.

В случае $K_{дв}^{(1,1)}$ на разных участках сети обычно представляется целесообразным автоматически отключать только одно место пробоя. При этом предполагается, что пробой во втором месте может самоликвидироваться (например, в воздушных сетях) или будет устранен обслуживающим персоналом (если остается устойчивое $K_з^{(1)}$). Обеспечение отключения по возможности одного места пробоя (примерно в $^2/_3$ случаев) осуществляется включением защиты на трансформаторы тока только двух фаз. Надежность электроснабжения потребителей при таком способе ликвидации повреждения может повышаться.

Продольная несимметрия. Продольная несимметрия наиболее ярко проявляется при кратковременном или длительном разрыве одной или двух фаз. Кратковременные разрывы одной фазы возникают обычно при отключении в случае $K^{(1)}$ только поврежденной фазы и ее автоматическом повторием включении (ОАПВ).

Длительные режимы с работой двумя фазами, а иногда и одной фазой, возникают, например, при пофазном ремонте линий в сети с глухозаземленными нейтралями, при отказе отдельных фаз выключателя, а также в некоторых других случаях.

Ниже рассматривается линия, связывающая две системы, имеющие трансформаторы с глухозаземленными нейтралями (рис. 1.31). Эквивалентные ЭДС генераторов $E_{гM}$ и $E_{гN}$ систем M и N, приведенные к сторонам с напряжением рассматриваемой линии, равны E_M и E_N. Разрывы рассматриваются на фазе A или на фазах B и C со стороны M линии. В обоих случаях особой является фаза A.

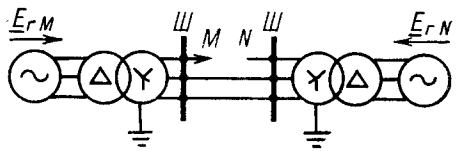


Рис. 1.31. Разрыв одной фазы

Схема с разрывами приводится к схеме без разрывов путем введения в разорванные фазы источников продольных ЭДС U_L, выбираемых так, чтобы токи в этих фазах оставались равными нулю.

Следует иметь в виду, что при продольной несимметрии в отличие от поперечной как ЭДС, так и сопротивления, отнесенные к точке несимметрии, складываются соответственно последовательно, а не параллельно.

При определении токов и напряжений в случае разрывов фаз возможно, как и при поперечной иесимметрии (КЗ в одной точке), использование комплексных схем последовательностей (для особой фазы) с заданными эквивалентными ЭДС генераторов или применение принципа наложения на нагрузочный режим, предшествовавший разрыву, последующего аварийного. В этих схемах подобно схемам при поперечных несимметриях пропадают источники ЭДС U_L.

При практических расчетах используется тот способ, который является более удобным для рассматриваемой задачи. Например, при необходимости выявления зависимости токов от угла расхождения фаз ЭДС двух частей системы с разрывом одной или двух фаз связывающей их линии применяют первый способ; если известен ток нагрузки линии перед разрывом или имеется несколько генерирующих источников, часто лучше использовать второй способ.

Разрыв одной фазы. Разрыв одной фазы A характеризуется следующими граничными условиями: $I_{LA}=I_{L1}+I_{L2}+I_{L0}=0$ и $U_{LB}=U_{LC}=0$. Эти условия аналогичны соотношениям при КЗ $K^{(1,1)}$. Симметричные составляющие продольного U_{LA} получаются равными $\underline{U}_{L1}=\underline{U}_{L2}=\underline{U}_{L0}=\underline{U}_{LA}/3$, причем при $\underline{Z}_{L1\Sigma}=\underline{Z}_{L2\Sigma}=\underline{Z}_{L0\Sigma}$ $\underline{U}_{LA}=\underline{E}_\Sigma$. С учетом изложенного получаем $\underline{I}_{L1}=\left(\underline{E}_\Sigma-\underline{U}_{L1}\right)/\underline{Z}_{L1\Sigma}=\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}-\underline{U}_{L1}/\underline{Z}_{L1\Sigma}$, $\underline{I}_{L2}=-\underline{U}_{L2}/\underline{Z}_{L2\Sigma}$, $\underline{I}_{L0}=-\underline{U}_{L0}/\underline{Z}_{L0\Sigma}$ и далее $\underline{I}_{LA}=0=\underline{E}_\Sigma/\underline{Z}_{L1\Sigma}-\underline{U}_{L1}/\underline{Z}_{L1\Sigma}-\underline{U}_{L2}/\underline{Z}_{L2\Sigma}-\underline{U}_{L0}/\underline{Z}_{L0\Sigma}$, откуда $\underline{U}_{LA}=3\underline{U}_{L1}=\left(3\underline{E}_\Sigma/\underline{Z}_{L1\Sigma}\right)/\left(1/\underline{Z}_{L1\Sigma}+1/\underline{Z}_{L2\Sigma}+1/\underline{Z}_{L0\Sigma}\right)$.

Учитывая, что $\underline{E}_\Sigma/\underline{Z}_{L1\Sigma}=\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}$, получаем $\underline{U}_{LA}$, выраженное через ток нагрузки: $\underline{U}_{LA}=3\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}/\left(1/\underline{Z}_{L1\Sigma}+1/\underline{Z}_{L2\Sigma}+1/\underline{Z}_{L0\Sigma}\right)$.

Полученные выражения дают возможность определения составляющих тока в режиме разрыва: $\underline{I}_{L1}=\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}-\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}/\left(1+\underline{Z}_{L1\Sigma}/\underline{Z}_{L2\Sigma}+\underline{Z}_{L1\Sigma}/\underline{Z}_{L0\Sigma}\right)$; $\underline{I}_{L2}=-\underline{U}_{L2}/\underline{Z}_{L2\Sigma}=-\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}/\left(\underline{Z}_{L2\Sigma}/\underline{Z}_{L1\Sigma}+1+\underline{Z}_{L2\Sigma}/\underline{Z}_{L0\Sigma}\right)$; $\underline{I}_{L0}=-\underline{U}_{L0}/\underline{Z}_{L0\Sigma}=-\underline{I}_{\text{н}}^{(3)}/\left(\underline{Z}_{L0\Sigma}/\underline{Z}_{L1\Sigma}+\underline{Z}_{L0\Sigma}/\underline{Z}_{L2\Sigma}+1\right)$.

В выражении для I_{L1} второй член определяет аварийную слагающую тока прямой последовательности.

Релейная защита часто выполняется реагирующей на симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений. Поэтому важно знать, как она будет действовать при разрывах, которые, как и КЗ на землю, сопровождаются появлением составляющих указанных последовательностей.

Составляющие I_{LA} вдоль линии при неучете ее поперечных емкостей естественно остаются неизменными. Примерные изменения составляющих напряжения U_{LA} вдоль элементов системы в предположении равенства углов их сопротивлений показаны на рис. 1.32. Разность напряжений с двух сторон от места разрыва для всех последовательностей равна $U_{LA}/3$, хотя сами напряжения последовательностей имеют разные значения. Напряжения в равипотенциальных точках схем замещения отдельных последовательностей за сопротивлением системы равны нулю.

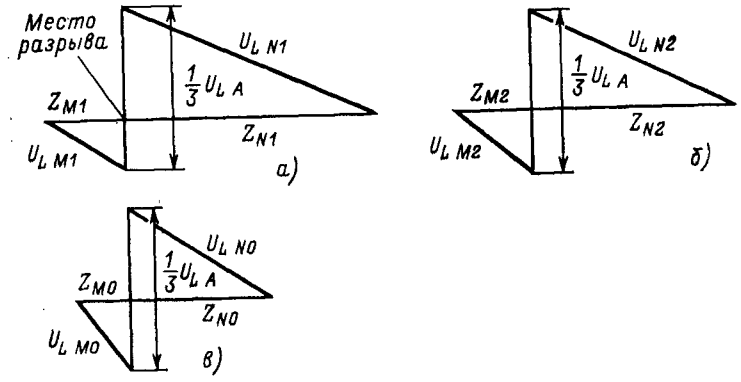


Рис. 1.32. Изменение составляющих продольных напряжений по элементам системы

На рис. 1.33, *а* представлен частный случай разрыва фазы A на выключателе линии, питающей нагрузку.

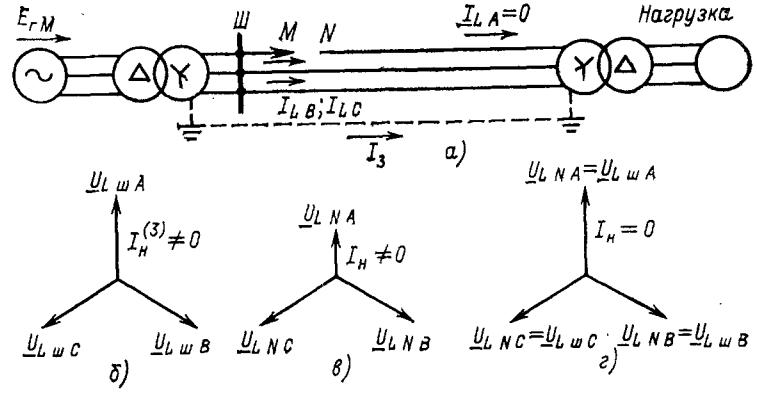


Рис. 1.33. Соотношения электрических величин при разрыве одной фазы на линии, питающей нагрузку

На рис. 1.33, *б—г* показаны возможные векторные диаграммы напряжений, характеризующие рассматриваемый разрыв. Напряжение $U_{LшA}$ фазы A на шинах источника питания сохраняет значение, близкое к рабочему напряжению $U_{щAраб}$ предшествующего разрыву режима (рис. 1.33, *б*). Напряжение той же фазы A за разрывом U_{LNA} (рис. 1.33, *в*) будет отличаться от $U_{LшA}$ на величину U_{LA}, пропорциональную току нагрузки $I_н^{(3)}$ в рабочем режиме ($U_{LNA}=U_{LшA}-U_{LA}$), и иметь конечное значение. Это определяется наведением в фазе A ЭДС, соответствующей напряжению в обмотке низшего напряжения понижающего трансформатора, соединенной в треугольник. При холостой работе линии ($I_н=0$) $U_{LA}=0$ и $U_{LNA}=U_{щAраб}$ (рис. 1.33, *г*). Таким образом, напряжения фазы A с обеих сторон разрыва оказываются одинаковыми. Напряжения фаз B и C с обеих сторон места разрыва, изменяясь по сравнению с $U_{раб}$ в зависимости от значения $I_н$, во всех режимах одинаковы: $U_{LшB}=U_{LNB}$ и $U_{LшC}=U_{LNC}$ (рис. 1.33, *б—г*).

При принятом положительном направлении тока в земле $I_з$, совпадающем с направлениями токов I_B и I_C, $I_з=-(I_B+I_C)$. Сумма $I_A+I_B+I_C=I_B+I_C=3I_0$ (ток $I_A=0$, однако, имеет составляющие, в том числе I_0, не равные нулю). Наличие $I_0\neq0$ определяет угол $\widehat{I_BI_C}$, меньший 120°.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае разрыва одной фазы на линии с односторонним питанием к потребителям подводятся три междуфазных напряжения, образующих треугольник с конечной площадью, и нагрузка, как типа осветительной, так и типа двигательной, будет продолжать работать при условии, что составляющие обратной последовательности имеют для последних допустимые пределы.

Угловые соотношения между составляющими напряжений и токов при неполнофазных режимах. Питание измерительных органов устройств релейной защиты осуществляется от первичных измерительных преобразователей тока (трансформаторов тока *TA* и напряжения *TV*). Место включения *TA* со стороны шин или после выключателя в сторону линии на угловые соотношения между составляющими токов и напряжений при разрыве значения не имеет, поскольку составляющие токов одинаковы с обеих сторон разрыва.

Место включения *TV* — на шинах (рис. 1.34, *а*) или за выключателем на линии (рис. 1.34, *б*) — может существенно влиять на указанные выше угловые соотношения. Угловые соотношения при использовании для защиты составляющих нулевой или обратной последовательности и питании ее от *TV* со стороны шин в случае разрыва в направлении от шин в линию (разрыв на самой линии или на фазах выключателя при его недовключении или недоотключении, рис. 1.34, *в*) наиболее просто определяются исходя из равенства нулю составляющих напряжения нулевой последовательности в заземленной нейтрали трансформатора подстанции и составляющих обратной последовательности в нейтралях генераторов. Соответствующие напряжения на шинах оказываются равными $U_{Lш0}=-Z_{т0}I_{L0}$ и $U_{Lш2}=-Z_{c2}I_{L2}$, где $Z_{т0}$ — сопротивление нулевой последовательности трансформатора, а Z_{c2} — сопротивление обратной последовательности блока генератор—трансформатор; углы этих сопротивлений, как это уже принималось при рассмотрении несимметричных КЗ, меньше или равны 90°. Поэтому, принимая за ис-

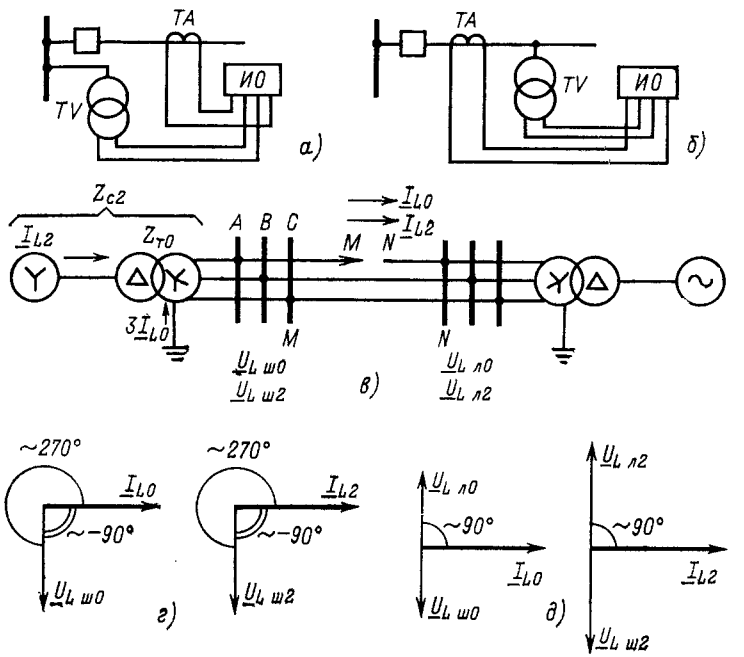


Рис. 1.34. Соотношения токов и напряжений при разрыве фазы линии в одном месте

ходную составляющую ток нулевой или обратной последовательности комплекса тока I_{LA}, получаем векторные диаграммы, изображенные на рис. 1.34, *г*. Углы $\widehat{U_{Lш0}I_{L0}}$ и $\widehat{U_{Lш2}I_{L2}}$ близки к —90°. Эти углы не зависят от принятых условных направлений токов I_{L0} и I_{L2}, так как с изменением знака токов однозначно изменяются и знаки напряжений

$U_{L\text{ш}0}$ и $U_{L\text{ш}2}$. На угловые соотношения не влияет также направление передаваемой по линии мощности.

При этом следует иметь в виду, что расположение векторов токов I_{L0} и I_{L2} и соответствующих им напряжений U_{L0} и U_{L2} по отношению к векторам полных рабочих напряжений $U_{\text{ш}AM}$ и $U_{\text{ш}AN}$ на шинах подстанций будет зависеть от направления рабочей мощности, передаваемой по линии.

Из изложенного следует, что в рассматриваемом случае установки TV на шинах при разрыве в любом месте защищаемой линии угловые соотношения между составляющими токов и напряжений нулевой и обратной последовательностей получаются такими же, как и при КЗ на защищаемой линии в полнофазном режиме. Поэтому измерительные органы защит линий, выполненные реагирующими на угловые соотношения составляющих нулевой и обратной последовательностей, при разрывах на линии будут функционировать так же, как и при КЗ на ней. Физический смысл заключается в том, что в обоих случаях источник несимметрии (поперечной или продольной) находится в зоне действия измерительных органов защиты. Указанное может приводить, без принятия необходимых мер, к недопустимому отключению линии, например, быстродействующей защитой при кратковременных несимметриях, возникающих вследствие разновременности действия фаз выключателя.

При питании защит от TV, включенных на линии, и разрыве непосредственно на последней (не на ее выключателе) измерительные органы защит будут вести себя таким же образом, как и в рассмотренном выше случае включения TV на шины.

Другие соотношения в случае включения TV на линии получаются при разрывах фаз на выключателе. В данном случае напряжения $U_{L\text{л}0}$ и $U_{L\text{л}2}$ (рис. 1.34, *д*) оказываются отличными соответственно от $U_{L\text{ш}0}$ и $U_{L\text{ш}2}$. Они разнятся от последних на значение составляющих напряжения U_L в месте разрыва, но могут определяться и как падения напряжений от соответствующих нейтралей с противоположной стороны линии с разрывом. Считая в первом приближении все сопротивления реактивными, получаем, как это иллюстрируют диаграммы напряжений на рис. 1.34, *д*, что $U_{L\text{л}0}$ и $U_{L\text{л}2}$ по фазе отличаются от $U_{L\text{ш}0}$ и $U_{L\text{ш}2}$ на 180°, как и напряжения на шинах противоположной подстанции. Таким образом, при использовании $U_{L\text{л}0}$ и $U_{L\text{л}2}$ измерительные органы со стороны данной подстанции фиксируют разрывы на выключателе как внешние КЗ, т. е. на шинах подстанции.

Выше при включении TV на линии рассматривался разрыв на выключателе только одной стороны линии. При двух разрывах, расположенных по разные стороны от TV (например, в цикле пофазного АПВ),

угловые соотношения получаются другими. Как показали исследования в СРЗиУ ТЭП (А. Б. Чернин и др.), применительно к органам, реагирующим на угловые соотношения составляющих нулевой или обратной последовательности, их функционирование оказывается зависящим от направления мощности нагрузки подобно работе под воздействием мощности нагрузки при внешних КЗ — органы срабатывают только с одной стороны линии [16].

С учетом изложенного можно сделать некоторые общие выводы по режимам с разрывом фазы: 1) разрыв фазы линии в отличие от КЗ непосредственной опасности для системы может не представлять и не требовать немедленной ликвидации; однако появляющиеся при нем составляющие токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей могут обусловливать ряд нежелательных последствий. Так, например, составляющие обратной последовательности, проходя по обмоткам статоров генераторов, могут недопустимо перегревать их роторы, несимметрия напряжений на зажимах асинхронных двигателей может быть для них длительно недопустимой, токи нулевой последовательности оказывают влияние на линии связи и т. п. Поэтому разрывы фазы в ряде случаев было бы желательно автоматически селективно ликвидировать; так часто и удается делать, если разрыв сочетается с КЗ на том же участке; 2) некоторые типы защит обратной и нулевой последовательностей (например, направленные) воспринимают появление несимметрии от разрыва подобно КЗ на том же участке или вне его. Если их срабатывание в таком режиме недопустимо, например при возникновении кратковременного разрыва фазы выключателем в цикле его автоматического отключения и повторного включения, должны приниматься соответствующие меры.

Неполнофазные режимы (передача энергии по двум фазам с возвратом тока через землю) могут создаваться искусственно (например, при проведении пофазного ремонта линии) для сохранения системных связей и работы потребителей, имеющих одностороннее питание. Возникающие при этом специфические соотношения электрических величин должны учитываться при выполнении релейной защиты.

Разрыв двух фаз. При разрыве двух фаз B и C (рис. 1.35) питание потребителей осуществляется по одной фазе линии и земле; при изолированной нейтрали с одной из сторон линии передача мощности, очевидно, невозможна.

Ток I_{LA} проходит только по фазе A, возвращаясь через землю. Сумма $\dot{I}_{LA}+\dot{I}_{LB}+\dot{I}_{LC}=3\dot{I}_0$ (полные токи в фазах B и C отсутствуют, но составляющие, в том числе и I_0, имеются). Примерный вид векторных диаграмм напряжений при разрыве двух фаз B и C на линии с односторонним питанием приведен на рис. 1.35, *б*. Напряжения фаз $U_{L\text{ш}}$ со стороны шин питающей стороны сохраняют большие значения.

Непосредственно за местом разрыва U_{LNA}, естественно, сохраняет то же значение. Однако напряжения U_{LNB} и U_{LNC}, как и U_{LBC}, сильно снижаются и площадь треугольника междуфазных напряжений, подводимых к потребителю, оказывается значительно меньшей, чем при разрыве одной фазы. При сопротивлениях нагрузки, одинаковых в прямой и обратной последовательностях, эта площадь снизится до нуля.

Режимы с отключением двух фаз реализуются крайне редко. С этими режимами как кратковременными в технике релейной защиты приходится считаться в основном при неодновременном отключении или включении фаз линий в случае, например, установки на них чувствительных быстродействующих защит нулевой последовательности.

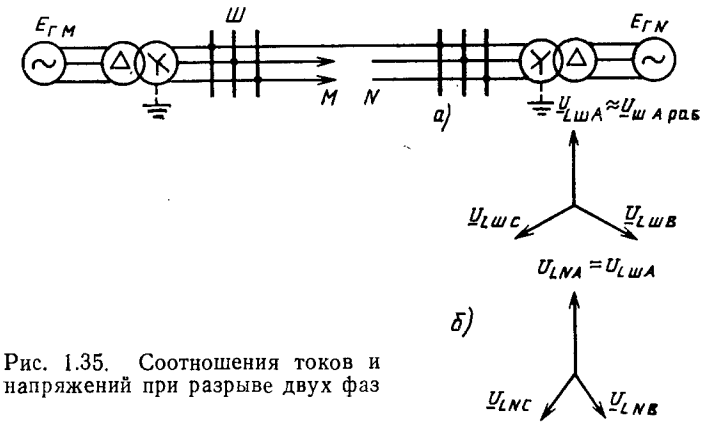


Рис. 1.35. Соотношения токов и напряжений при разрыве двух фаз

Сложноесимметричные режимы представляют собой совокупность нескольких несимметричных КЗ, или нарушений продольной симметрии, или их разных сочетаний. Такие режимы возникают, например, при: отказе одной или двух фаз выключатели при отключении им КЗ; КЗ в сети, одна из линий которой находилась в неполнофазном режиме; КЗ и каскадном (последовательном во времени) отключении поврежденной фазы выключателями с двух концов линии; обрыве провода и КЗ на землю одного из его оборванных концов и т. д. Один из сложных видов КЗ — двойные замыкания на землю $K^{(1,1)}_{дв}$ на разных участках сети с изолированными нейтралями — уже рассматривался выше.

Для некоторых случаев, когда одна и та же фаза является особой для обоих мест несимметрии, расчет может существенно упрощаться. Так, при однофазном КЗ на одной из фаз (например, A) и разрыве двух других фаз (соответственно B и C) фаза с $K^{(1)}$ является особой.

Полные токи КЗ со стороны обеих систем $\underline{I}^{(1)}_{MA}$ и $\underline{I}^{(1)}_{NA}$, направленные к месту повреждения K, при отсутствии переходного сопротивления в месте повреждения замыкаются по независимым контурам (рис. 1.36). Поэтому они рассчитываются как токи однофазного КЗ на линии с односторонним питанием по выражению $\underline{I}^{(1)}_{KA} = 3\underline{E}_A/(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2+\underline{Z}_0)$, где $\underline{E}_A$ и сопротивления $\underline{Z}$ определяются данными соответственно систем M и N и сопротивлениями поврежденной линии по обе стороны от точки КЗ. Ток в месте КЗ равен их сумме.

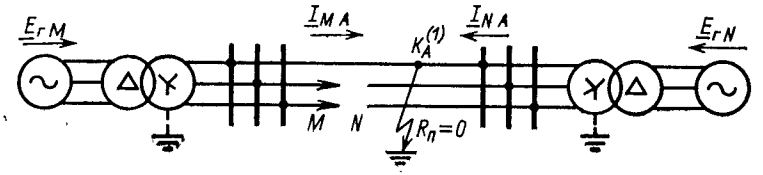


Рис. 1.36. Короткое замыкание на одной фазе и разрыв двух других

Подобное же положение возникает (рис. 1.37) при металлическом двухфазном КЗ (например, $K^{(2)}_{BC}$) и разрыве третьей фазы (соответственно A). Токи фаз B и C, направляющиеся к месту повреждения, проходят по независимым путям и определяются, как при двухфазном замыкании ($K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$) на линии с односторонним питанием. Случай

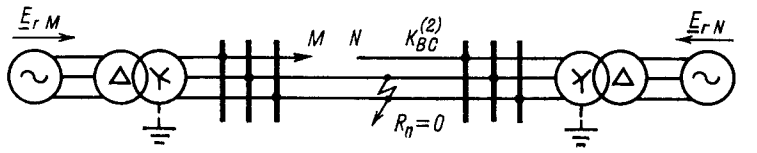


Рис. 1.37. Короткое замыкание между двумя фазами и разрыв третьей фазы

разрыва одной или двух фаз и трехфазного КЗ с $R_п=0$ (рис. 1.38) может рассматриваться как неполнофазный режим с учетом $K^{(3)}$ в виде симметричной нагрузки, определяемой сопротивлением участка линии от места разрыва (точки N) до точки $K^{(3)}$.

Соотношения электрических величин в линиях с взаимной индукцией. При анализе работы и расчетах релейной защиты электрических сетей в ряде случаев (при возникновении в сетях $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$ и появлении слагающих I_0) оказывается необходимым учитывать взаимную индукцию электрических цепей: влияние одной цепи линии электропе-

редачи на другую при их расположении на общей опоре или на близко расположенных отдельных опорах, влияние на индуктивность линий их молниезащитных тросов и т. п. При этом в основу кладутся известные соотношения и схемы замещения для индуктивно связанных цепей, в частности двухобмоточных трансформаторов, поскольку последние представляют собой один из вариантов цепей со взаимной индукцией

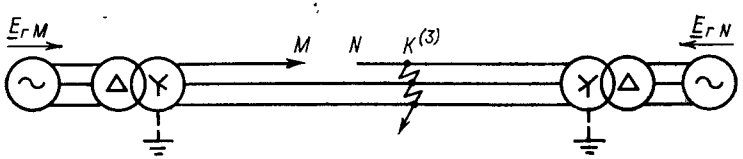


Рис. 1.38. Случай разрыва одной фазы и $K^{(3)}$

(рис. 1.39, *а* и *б*). На рис. 1.39, *в* и *г* показаны две параллельные цепи, имеющие общую точку с одного конца, и их схема замещения, составленная на основании рис. 1.39, *а* и *б*. При наличии общих точек с обеих сторон подобные схемы «спариваются».

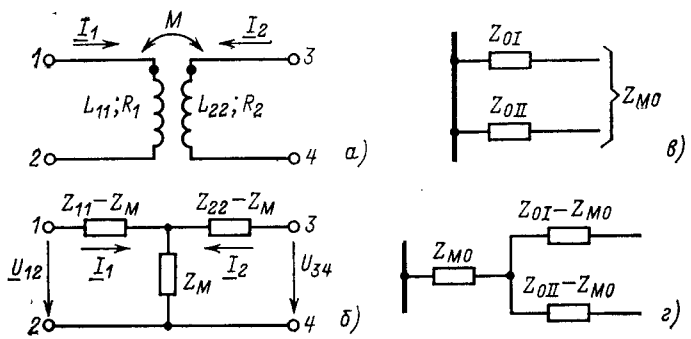


Рис. 1.39. Исходные схемы замещения для двух цепей линии со взаимной индукцией

Попутно следует отметить, что на одиночной линии также имеется взаимоиндукция между ее фазами. Сопротивления одиночной ВЛ без тросов в предположении осуществления полного цикла транспозиции проводов ее фаз $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_L - \underline{Z}_M$ и $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_L + 2\underline{Z}_M = \underline{Z}_1 + 3\underline{Z}_M$, где $\underline{Z}_L$ — сопротивление петли провод — земля, а $\underline{Z}_M$ — сопротивление взаимоиндукции между проводами фаз. Обычно используются следующие средние соотношения между X_0 и X_1 [32]: для одноцепной линии без тросов $X_0/X_1=3{,}5$; для двухцепной линии без тросов на общей опоре $X_0/X_1=5{,}5$. Для линии с тросами с учетом того, что последние выполняются стальными (с большим удельным сопротивлением), а также часто разрезаются на части с заземлением каждой части только в одной точке, в первом приближении можно использовать численные соотношения X_0/X_1, приведенные выше и для линий без тросов.

Однофазные замыкания на землю. Однофазные замыкания на землю $K_з^{(1)}$ являются характерным, наиболее частым видом повреждений в сетях, работающих с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралями. В СССР к ним в основном относятся воздушные и кабельные сети 6—35 кВ и иногда сети более высокого напряжения (в северных районах). Работа с изолированной нейтралью считается допустимой при емкостных $I_з^{(1)}$, не превосходящих 30, 20 и 10 А с $U_{ном}$ соответственно 6, 10 и 35 кВ. При бо́льших токах рекомендуется применять дугогасящие реакторы с автоматической примерно резонансной настройкой. Допускается их работа с небольшой перекомпенсацией для предотвращения резонансных перенапряжений.

Соотношения электрических величин при $K_з^{(1)}$ и разных режимах заземления нейтралей имеют некоторые общие свойства, рассматриваемые ниже на примере сети с изолированной нейтралью (рис. 1.40, *а*). Фазы сети имеют между собой и землей равномерно распределенные емкости, которые могут быть заменены сосредоточенными $C_{мф}$ и C_0, так как падения напряжения вдоль проводов фаз при малых емкостных токах близки к нулю. При нормальной ра-

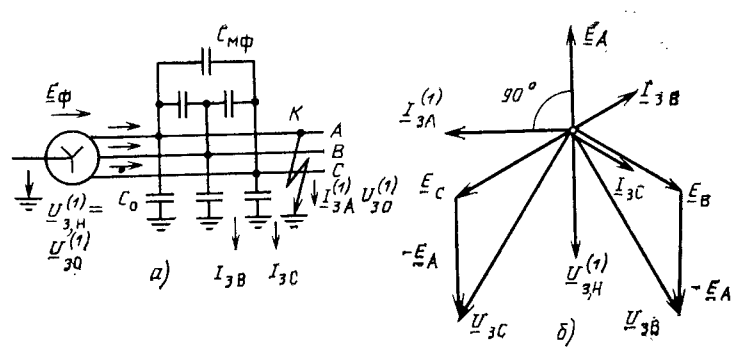


Рис. 1.40. Металлическое однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью

боте эти токи, определяемые ЭДС $\underline{E}_\Phi$ и емкостями $C_{мф}$ и C_0, симметричны и опережают ЭДС на 90°. Напряжения $\underline{U}_\Phi = \underline{E}_\Phi$. Напряжение нейтрали питающей системы $\underline{U}_н = \underline{U}_\Phi - \underline{E}_\Phi = 0$. При металлическом $K_з^{(1)}$ в точке K напряжение $U_{зA}^{(1)} = 0$ как в месте пробоя, так и в любой другой точке сети. Нейтраль сети получает по отношению к земле смещение (рис. 1.40, *б*) $\underline{U}_{з.н}^{(1)} = -\underline{E}_A$. Напряжения неповрежденных фаз оказываются теперь равными: $\underline{U}_{зB} = \underline{E}_B + \underline{U}_{з.н}^{(1)} = \underline{E}_B - \underline{E}_A$, $\underline{U}_{зC} = \underline{E}_C + \underline{U}_{з.н}^{(1)} = \underline{E}_C - \underline{E}_A$ и возрастают в $\sqrt{3}$ раз. Появляется напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_{з0}^{(1)} = 1/3(\underline{U}_{зA}^{(1)} + \underline{U}_{зB} + \underline{U}_{зC}) = -\underline{E}_A = \underline{U}_{з.н}^{(1)}$.

Ток в месте повреждения определяется емкостными токами фаз B и C, обусловленнымн только емкостями C_0:

$$\underline{I}_{зA}^{(1)} = 3\underline{I}_{з0}^{(1)} = -(\underline{I}_{зB} + \underline{I}_{зC}) = j3\omega C_0 \underline{E}_A \qquad (1.16)$$

(учитывая указанные положительные направления, а также то, что $\underline{U}_{зA}^{(1)} = 0$, $\underline{U}_{зB} + \underline{U}_{зC} = -3\underline{E}_A$ и токи фаз B и C опережают свои фазные напряжения на 90°, рис. 1.40, *б*). Ток $\underline{I}_{зA}^{(1)}$ опережает $\underline{E}_A$ на 90°. Важно отметить, что в начале рассматриваемой линии несмотря на наличие $\underline{I}_{зA}^{(1)}$ сумма токов трех фаз $\underline{I}_{зA}^{(1)} + \underline{I}_{зB} + \underline{I}_{зC} = 0$, т. е. $3I_0 = 0$ (справедливо только при условии $C_{0\,вн} = 0$ внешней по отношению к рассматриваемой линии сети).

Выше рассматривались металлические $K_з^{(1)}$. Практически же они происходят через переходные активные сопротивления $R_п$. При наличии $R_п$ напряжения $U_{з0}^{(1)} = U_{з.н}^{(1)}$ имеют меньшие значения. Это уменьшение можно характеризовать *коэффициентом полноты замыкания на землю* [1]

$$b = U_{з0}^{(1)}/U_{з0max}^{(1)} = U_{з0}^{(1)}/U_{раб.ф} \leqslant 1. \qquad (1.17)$$

Значение коэффициента $b \equiv U_{з0}^{(1)}$ обусловливается не только $R_п$, но также сопротивлениями системы по отношению к земле, которые определяются емкостями C_0 и индуктивностью L дугогасящего реактора (при его наличии). В результате один и тот же коэффициент $b(U_{з0}^{(1)})$, например, в сетн с меньшими значениями C_0 характеризует замыкания через бо́льшие $R_п$. С другой стороны, при изменении сопротивлений C_0 в случае замыкания с данным $R_п$ изменяется и коэффициент $b(U_{з0}^{(1)})$.

При рассматриваемых $K_з^{(1)}$ искажаются только фазные

напряжения. Треугольник междуфазных напряжений остается неизменным: Поэтому к фазам нагрузки продолжают подводиться нормальные напряжения и работа потребителей не нарушается. Токи в месте пробоя малы и быстро произвести значительные разрушения не могут.

Учитывая эти обстоятельства, возможное отсутствие у потребителей постоянного или быстро включаемого резерва, а также целесообразность уменьшения числа комплектов защит в сети, защиту от $K_з^{(1)}$ обычно выполняют работающей только на сигнал. Наиболее просто она выполняется с помощью устройств контроля изоляцни, когда поврежденный участок выявляется только поочередным отключением элементов сети. Последнее неудобно, в связи с чем часто защита выполняется с помощью специальных устройств.

Селективная защита (устанавливающая направление, в котором произошло повреждение) часто осуществляется с помощью специальных высокочувствительных устройств нулевой последовательности. В сетях, заземленных через дугогасящие реакторы, модуль и фаза основной гармоники тока замыкания на землю могут быть близкими как на поврежденной, так и на неповрежденной линии. Поэтому в настоящее время большое распространение получили селективные устройства сигнализации замыкания на землю, реагирующие на высшие гармоники установившнхся токов замыкания, поскольку для высших гармоник практически отсутствует компенсация емкостного тока током дугогасящего реактора. Используются также устройства, реагирующие иа слагающие переходного процесса замыкания на землю (см. гл. 9).

В сетях, работающих в условиях повышенной опасности для обслуживающего персонала (например, сети 6—10 кВ, питающие торфяные предприятия), защнта от $K_з^{(1)}$ выполняет также функции защитного отключения н по условиям безопасности должна работать без выдержки времени на отключение.

Соотношения токов и напряжений при трансформаторных и автотрансформаторных связях. При рассмотренни функционирования защит, в частности защнт лнний, когда они должны работать как резервные при КЗ за трансформаторами или автотрансформаторами, необходимо знать соотношения токов и напряжений с двух сторон силовых трансформаторов и автотрансформаторов в случае возник-

новения повреждения на одной из них. На другой стороне (где нет повреждения) могут изменяться как фазные соотношения, характерные для места повреждения, так и значения токов и напряжений.

Наибольший интерес представляет при этом часто встречающееся соединение обмоток по схеме У/Д-11. На рис. 1.41 дано выполнение такого соединения с указанием начал (A, B, C, a, b, c) и концов (X, Y, Z, x, y, z) первичной и вторичной обмоток, а также выбранных условных положительных направлений токов. Коэффициент трансформации, равный отношению напряжений холостого хода, принят равным 1,

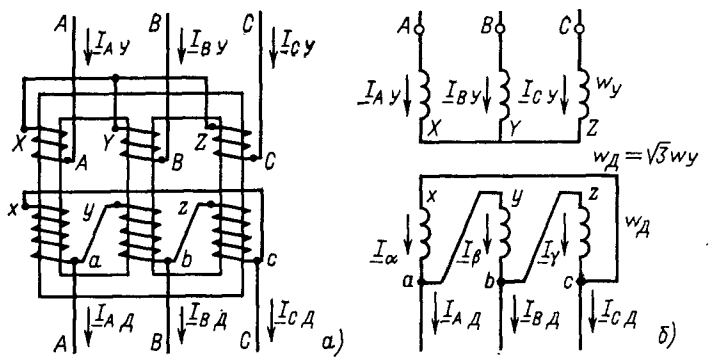


Рис. 1.41. Трансформатор со схемой соединения обмоток У/Д-11

что соответствует приведению напряжений и токов к одной стороне. При этом число витков обмоток, соединенных в треугольник, в $\sqrt{3}$ раз больше числа витков обмоток, соединенных в звезду ($w_Д\sqrt{3}w_У$).

Токи в подводящих проводах со стороны треугольника $\underline{I}_{АД}$, $\underline{I}_{ВД}$ и $\underline{I}_{СД}$ для рассматриваемого случая связаны с токами со стороны звезды $\underline{I}_{АУ}$, $\underline{I}_{ВУ}$ и $\underline{I}_{СУ}$ следующими соотношениями: $\underline{I}_{АД}=(\underline{I}_{АУ}-\underline{I}_{ВУ})/\sqrt{3}$; $\underline{I}_{ВД}=(\underline{I}_{ВУ}-\underline{I}_{СУ})/\sqrt{3}$; $\underline{I}_{СД}=(\underline{I}_{СУ}-\underline{I}_{АУ})/\sqrt{3}$.

Так, например, в случае $K^{(2)}_{BC}$ со стороны звезды при $\underline{I}^{(2)}_{АУ}=0$ и, следовательно, $\underline{I}^{(2)}_{СУ}=-\underline{I}^{(2)}_{ВУ}$ получаем (рис. 1.42, *а*) $\underline{I}^{(2)}_{АД}=-\underline{I}^{(2)}_{ВУ}/\sqrt{3}$; $\underline{I}^{(2)}_{ВД}=2\underline{I}^{(2)}_{ВУ}/\sqrt{3}$; $\underline{I}^{(2)}_{СД}=-\underline{I}^{(2)}_{ВУ}/\sqrt{3}$.

Таким образом, ток в одной из фаз (B) в подводящих проводах на стороне треугольника оказывается в 2 раза больше токов двух других фаз и в $2/\sqrt{3}$ раз больше тока КЗ $I^{(2)}_{ВУ}$, совпадая с последним по фазе. Аналогичные соотношения получаются и при $K^{(2)}$ со стороны треугольника (рис. 1.42, *б*).

При $K^{(1)}$ со стороны звезды на фазе A и при $I^{(1)}_{ВУ}=I^{(1)}_{СУ}=0$ получаем (рис. 1.43) $\underline{I}^{(1)}_{АД}=\underline{I}^{(1)}_{АУ}/\sqrt{3}$; $\underline{I}^{(1)}_{ВД}=0$; $\underline{I}^{(1)}_{СД}=-\underline{I}^{(1)}_{АУ}/\sqrt{3}$, т.е. токи в подводящих проводах со стороны треугольника проходят в двух фазах и в $1/\sqrt{3}$ меньше тока КЗ $I^{(1)}_{АУ}$.

Фазные напряжения со стороны звезды для идеального трансформатора с $\underline{Z}_т=0$ связаны с напряжениями со сто-

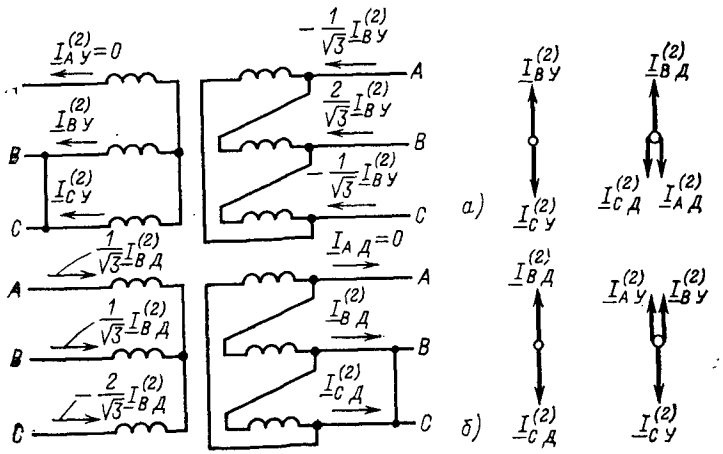


Рис. 1.42. Распределение полных токов при $K^{(2)}$ за трансформатором с соединением обмоток У/Д-11

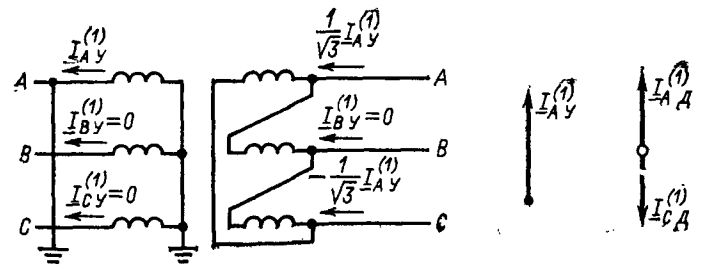


Рис. 1.43. Распределение полных токов при $K^{(1)}$ за трансформатором с соединением обмоток У/Д-11

роны треугольника соотношениями $\underline{U}_{AУ} = \underline{U}_{ACД} / \sqrt{3}$; $\underline{U}_{BУ} = \underline{U}_{BAД} / \sqrt{3}$ и $\underline{U}_{CУ} = \underline{U}_{CBД} / \sqrt{3}$. Таким образом, фазным напряжениям со стороны звезды соответствуют междуфазные со стороны треугольника.

С другой стороны, фазные напряжения по отношению к нейтральной точке системы междуфазных напряжений со стороны треугольника или относительно центра тяжести треугольника междуфазных напряжений связаны с напряжениями со стороны звезды соотношениями $\underline{U}_{AДн} = \underline{U}_{AУ} / \sqrt{3}$; $\underline{U}_{BДн} = \underline{U}_{BСУ} / \sqrt{3}$; $\underline{U}_{CДн} = \underline{U}_{CAУ} / \sqrt{3}$.

Если в системе со стороны треугольника нет напряжения нулевой последовательности $\underline{U}_{0д}$, фазные напряжения по отношению к нейтрали $\underline{U}_{фДн}$ являются и напряжениями фаз $\underline{U}_{фД}$ по отношению к земле. При наличии $\underline{U}_{0д}$ напряжения $\underline{U}_{фД}$ определяются по соотношению $\underline{U}_{фД} = \underline{U}_{фДн} + \underline{U}_{0д}$.

При переходе через трансформатор с соединением обмоток У/Д в случае симметричных $K^{(3)}$ фазные соотношения

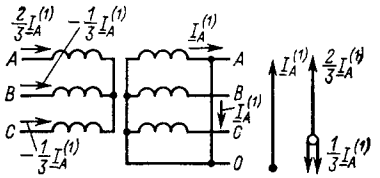


Рис. 1.44. Распределение полных токов при $K^{(1)}$ за трансформатором с соединением обмоток У/У с нейтральным проводом

между токами и напряжениями на каждой из сторон остаются одинаковыми, так как токи и напряжения претерпевают одинаковый по значению и направлению сдвиг по фазе. Иные соотношения получаются при несимметричных КЗ (см., например [16]).

На практике достаточно широкое распространение имеют также понижающие трансформаторы 3,15—10,5/0,4—0,23 кВ с четырехпроводной системой с глухозаземленной нейтралью со стороны 0,4—0,23 кВ. На рис. 1.44 дано выполнение такого соединения в предположении, что коэффициент трансформации равен 1, чему соответствует равенство витков обеих обмоток. В случае $K_A^{(1)}$ (на землю или

четвертый провод) ток на поврежденной стороне проходит по фазе A (при неучете нагрузки) и имеет значение $\underline{I}_A^{(1)} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}$ с равными составляющими всех последовательностей. С питающей стороны составляющие I_0 проходить не могут. Они создают потоки нулевой последовательности, замыкающиеся через бак трансформатора. На комплексной схеме замещения это соответствует прохождению токов I_0 через сопротивление ветви намагничивания трансформатора, что существенно ограничивает ток КЗ $K^{(1)}$ на

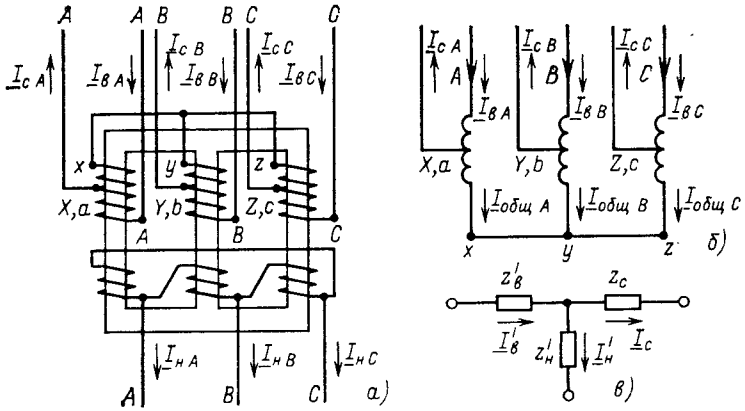


Рис. 1.45. Автотрансформатор

стороне низшего напряжения. На стороне высшего напряжения в поврежденной фазе проходит ток, равный $2I_A^{(1)}/3$, а в двух других фазах — ток $I_A^{(1)}/3$. Таким образом, получающееся токораспределение качественно похоже на распределение токов при $K^{(2)}$ для трансформаторов с соединением обмоток У/Д.

На рис. 1.45, *а* показана схема соединения для автотрансформатора, имеющего отдельную обмотку низшего напряжения, и на рис. 1.45, *б* дано схематическое изображение основной обмотки с указанием начал и концов ее частей, имеющих выводы со стороны высшего напряжения (A, B, C), среднего напряжения (X, a; Y, b; Z, c) и к нейтрали (x, y, z), а также выбранные условные положительные направления токов. При учете только автотрансформаторной связи токи и напряжения на выходах основной обмотки со-

ответственно совпадают по фазе. Соотношение их значений определяется коэффициентом трансформации автотрансформатора, равным отношению полного числа витков основной обмотки (например, между зажимами A и x) к числу витков ее общей части (соответственно между зажимами X, a и x).

При учете обмотки низшего напряжения соответствующие величины получаются из трехлучевой схемы замещения автотрансформатора (рис. 1.45, *в*). Ток в общей части обмотки $I_{\text{общ}}$ непосредственно в рассматриваемой схеме замещения отсутствует. Он определяется в каждой фазе как разность действительных (неприведенных) токов сторон высшего и среднего напряжений: $I_{\text{общ}}=I_{\text{в}}-I_{\text{с}}$ (рис. 1.45, *б*).

Нейтрали автотрансформаторов глухо заземляются для предотвращения появления в системе среднего напряжения повышенных недопустимых напряжений при КЗ на землю в системе высшего напряжения, а также вследствие невысокого уровня изоляции нейтралей самих автотрансформаторов.

Для выполнения защит от КЗ на землю часто используются токи и напряжения нулевой последовательности. Для лучшего выполнения этих защит было бы желательно сети смежных напряжений с глухим заземлением нейтралей иметь как бы «разделенными» по нулевой последовательности.

Появление составляющих нулевой последовательности в сети одного напряжения при КЗ на землю в сети другого обычно имеет место при связи между этими сетями посредством трехобмоточных трансформаторов с соединением обмоток $У_0/У_0/Д$, имеющих глухозаземленные нейтрали (рис. 1.46, *а*), или автотрансформаторов (рис. 1.46, *б*). При выполнении защиты в общем случае приходится учитывать связь по нулевой последовательности между сетями смежных напряжений. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [16].

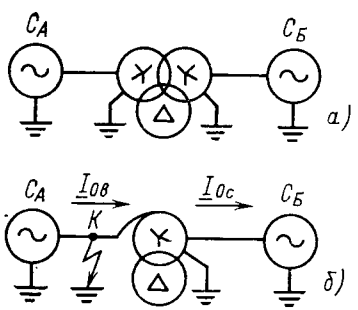


Рис. 1.46. Связь систем двух напряжений

Влияние нагрузок на соотношение электрических величин при повреждениях. Нагрузки системы оказывают влияние на соотношение электрических величин при любых видах повреждений в сетях. При расчетах для защиты повреждений в сетях высокого напряжения нагрузки учитываются приближенно, главным образом для несимметричных режимов. Учет нагрузок типа осветительных, имеющих одинаковые сопротивления во всех последовательностях и не генерирующих ЭДС, прост. Промышленная нагрузка в значительной мере определяется двигателями, преимущественно асинхронными. В начальный момент КЗ они могут переходить из двигательного режима в генераторный, если ЭДС $E_{\text{д}}$ двигателей окажется больше остаточного напряжения на их зажимах. Ток от двигателей быстро, за время, не превосходящее нескольких периодов, затухает, однако на функционирование быстродействующих защит может влиять. Далее двигатели работают как потребители с сопротивлением прямой последовательности $X_{1\text{д}}$, уменьшающимся по мере снижения частоты вращения. При несимметричиых КЗ необходимо учитывать, что реактивное сопротивление обратной последовательности асинхроиных двигателей $X_{2\text{д}}$ значительно меньше, чем прямой, и также зависит от частоты вращения. При остановке двигателя $X_{1\text{д}}=X_{2\text{д}}$.

Синхронные двигатели при сильном снижении напряжения ведут себя подобно генераторам, и при большой мощности их следует выделять из обобщенной нагрузки. Необходимо иметь в виду, что при недостаточно быстром отключении внешнего КЗ синхронные двигатели могут выпадать из синхронизма и при этом их приходится отключать.

В соответствии с разработками и предложениями С. А. Ульяиова [29] (при отсутствии подпитки места КЗ от нагрузки) для обобщеиной нагрузки, в которую входят непосредственно питающие ее линии и понижающие трансформаторы, принимают $X_{1\text{н}}\approx 1{,}2$ и $X_{2\text{н}}\approx 0{,}35$.

Рассмотрение соотношеиий электрических величин при иаличии иагрузки в случае $K^{(2)}$ дает возможность сделать ряд выводов, принимаемых во внимание при выполнении релейной защиты сетей.

1. В неповрежденной фазе A результирующий ток $I_{A\text{н}}=I_{1\text{н}}+I_{2\text{н}}$ имеет конечное значение в отличие от рассмотренного ранее случая $K^{(2)}$ в схеме без нагрузки, когда составляющие, вычитаясь, определяли ток $I_A^{(2)}=0$. Геометрическая сумма токов трех фаз нагрузки равна нулю (I_0 отсутствует вне зависимости от режима заземления нейтралей трансформаторов), и по поврежденным фазам B и C также проходят токи нагрузки.

2. При $X_{\text{к1}\Sigma}=X_{\text{к2}\Sigma}$ токи $I_{A1}=I_{A2}$ и токи нагрузки $I_{B\text{н}}=I_{C\text{н}}=-0{,}5I_{A\text{н}}$. В общем случае токи нагрузкн поврежденных фаз различ-

ны, при этом может даже измениться порядок чередования их фаз (см., например, [1]).

3. Со стороны источника питания в поврежденных фазах нагрузочные слагающие искажают (по сравнению со случаем неучета нагрузок) векторную диаграмму токов, увеличивая полный ток одной фазы и уменьшая другой.

4. Двухфазные КЗ на землю $K^{(1,1)}$ в сети с изолированными нейтралями никакого дополнительного влияния на работу потребителей по сравненню с рассмотренным $K^{(2)}$ не оказывают.

5. Некоторые общие соображения о влиянии нагрузок, приведенные в начале, относятся и к другим видам КЗ.

Учет поперечной проводимости линий в установившихся режимах. Рассмотренные выше соотношения для установившихся токов и напряжений (их действующие и амплитудные значения) не учитывали поперечной проводимости линий. Это обычно допустимо только при расчетах токов и напряжений в случаях КЗ на воздушных линиях в сетях

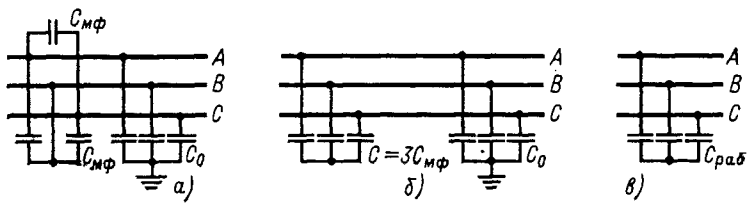


Рис. 1.47. Емкости линии с сосредоточеннымн параметрами

до 110—220 кВ, иногда 330 кВ. Однако и в таких сетях для некоторых режимов работы чувствительной релейной защиты, например при включении защищаемой линии под напряжение, оказывается необходимым учет поперечной (емкостной) проводимости. При длине ВЛ до 150—250 км этот учет можно осуществлять, рассматривая параметры линии R, L и C сосредоточенными (см., например, [32]), по известным Т- или П-образным схемам замещения. Трехфазная линия характеризуется тремя междуфазными емкостями $C_{мф}$ и тремя емкостями фаз C_0 по отношению к земле (рис. 1.47, *а*). Треугольник, образованный $C_{мф}$, преобразуется в эквивалентную звезду с емкостями $C=3C_{мф}$ (рис. 1.47, *б*). В симметричном (рабочем) режиме совокупность C и C_0 образует рабочую емкость $C_{раб}=C+C_0=3C_{мф}+C_0$ (рис. 1.47, *в*).

Для линий значительной длины 330 кВ и выше учитывать поперечные проводимости рассмотренным упрощенным способом нельзя. В этом случае связь между напряжениями и токами в начале участка длиной l (рис. 1.48) U_I, I_I и в конце участка U_{II}, I_{II}, как известно, определяется уравнениями, содержащими гиперболические функции от комплексного аргумента γl:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_I &= \underline{U}_{II}\operatorname{ch}\gamma l + \underline{Z}_c \underline{I}_{II}\operatorname{sh}\gamma l;\\ \underline{I}_I &= \underline{U}_{II}\operatorname{sh}\gamma l/\underline{Z}_c + \underline{I}_{II}\operatorname{ch}\gamma l, \end{aligned}\right\} \qquad (1.18)$$

где $Z_c=\sqrt{z/y}=\sqrt{(r+j\omega L_{уд})(g+j\omega C_{уд}}$ — *волновое* (характеристическое) сопротивление, определяемое удельным продольным сопротивлением z и поперечной проводимостью y; $\gamma=\sqrt{zy}=\alpha+j\beta$ — *коэффициент распространения*, определяемый коэффициентом затухания α и коэффициентом сдвига фаз β — углом сдвига фаз между векторами напряжений или токов на единицу длины линии. Напряжение и ток в

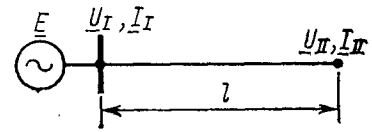


Рис. 1.48. Участок линии с распределеиными параметрами

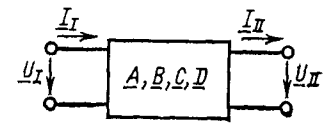


Рис. 1.49. Четырехполюсник, заменяющий линию с распределенными параметрами

каждой точке линии, в том числе в ее начале и конце, в рассматриваемом установившемся режиме синусоидальны, как и ЭДС питающей системы, с угловой частотой $\omega=2\pi f$. Поэтому для напряжений и токов могут быть построены векторные диаграммы.

Уравнения (1.18) представляют собой уравнения пассивного четырехполюсника (рис. 1.49): $U_1=AU_{II}+BI_{II}$ и $I_1=CU_{II}+DI_{II}$, где A, B, C и D — комплексные константы, удовлетворяющие условиям $A=D$ и $AD-BC=1$. В рассматриваемом случае $A=D=\operatorname{ch}\gamma l$, $B=Z_c\operatorname{sh}\gamma l$ и $C=\operatorname{sh}\gamma l/Z_c$. Пользуясь этими выражениями, линию с распределенными постоянными заменяют эквивалентной Т- или П-образной схемой с сосредоточенными постоянными.

Коэффициент сдвига β, представляющий некоторую часть периода переменного тока, может быть выражен также промежутком времени t, необходимым для пробега волной 1 км линии, с/км: $t=\beta/\omega=\beta/2\pi f$. Отсюда следует, что скорость распространения волн, км/с, $v=1/t=\omega/\beta$. Коэффициент β дает также возможность определения длины волны λ, представляющей расстояние между двумя точками линии, в которых в данный момент времени фазы напряжений или токов сдвинуты на угол 360°: $\beta\lambda=360°$, откуда $\lambda=360°/\beta$, км. Для ВЛ скорость v приближается к скорости света (300 тыс. км/с), $\beta\approx 0{,}06$ град/км; при этом длина волны 6000 км. Как будет показано ниже, уже при длинах линий, близких к четверти волны, входные сопротивления $Z_{вх,к}$ при КЗ в

конце участка близки к нулю и, например, обычные дистанционные защиты, реагирующие на отношение U_I/I_I, будут вести себя так, как при повреждении в начале участка линии с сосредоточенными параметрами, т. е. неправильно. На практике длины отдельных участков электропередач сверхвысоких и ультравысоких напряжений составляют сотни километров (<1000 км) и подобных затруднений не возникает.

Существенные упрощения расчетные выражения получают при пренебрежении потерями ($\alpha=0$). В этом случае $\gamma=j\beta=j\omega\sqrt{L_{уд}C_{уд}}$, $\beta=\omega\sqrt{L_{уд}C_{уд}}$, $Z_c=\sqrt{L_{уд}/C_{уд}}=Z_c$ (представляет активное сопротивление), $v=1/\sqrt{L_{уд}/C_{уд}}$, а напряжение и ток определяются не гиперболическими функциями от комплексного аргумента, а тригонометрическими от действительного аргумента. Существуют и другие способы упрощения, например путем замены гиперболических функций первыми слагаемыми из разложения в степенной ряд [32].

Важным, в частности для переходного процесса, является входное сопротивление линии с равномерно распределенными параметрами, определяемое отношением U_I/I_I. При металлическом КЗ на конце ($U_{II}=0$) $Z_{вх,к}=Z_c\text{th}\gamma l$.

В случае, если конец линии нагружен сосредоточенным сопротивлением, $Z_{вх}=Z_c(Z_н+Z_c\text{th}\gamma l)/(Z_н\text{th}\gamma l+Z_c)$.

Учет переходных процессов на линиях с сосредоточенными параметрами R и L подробно рассматривается в соответствующих курсах [29]. Подчеркивается появление в переходных токах апериодических слагающих, которые необходимо учитывать и при выполнении защиты. Здесь рассматриваются только апериодические слагающие в остаточных напряжениях. Например при трехфазном КЗ в сети (рис. 1.50), если

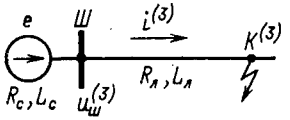


Рис. 1.50. Схема для определения соотношений мгновенных токов и напряжений при $K^{(3)}$ на линии с сосредоточенными параметрами

считать сопротивления линий сосредоточенными, мгновенное значение напряжения в месте включения защиты (шины *Ш*) определяется из двух уравнений: $u_ш^{(3)}=R_л i^{(3)}+L_л di^{(3)}/dt$ и ЭДС $e=(R_c+R_л)i^{(3)}+(L_c+L_л)di^{(3)}/dt$ и равно $u_ш^{(3)}=(R_л L_c-R_c L_л)i^{(3)}/(L_c+L_л)+L_л e/(L_c+L_л)$.

Таким образом, наличие в $u_ш^{(3)}$ апериодической слагающей при периодической ЭДС e системы определяется коэффициентом $(R_л L_c-R_c L_л)/(L_c-L_л)$. При однородных сопротивления Z элементов системы ($L_c/R_c=L_л/R_л$) этот коэффициент равен нулю и даже при наличии в токе $i^{(3)}$ апериодической слагающей напряжения $u_ш^{(3)}$ ее не имеет. Апериодическая слагающая появляется при $L_c R_c \neq L_л R_л$ или других видах КЗ. Однако в напряжениях между поврежденными фазами при небольшой неоднородности элементов системы, что часто можно принять для КЗ, удаленных от источников питания, апериодические слагающие могут быть небольшими.

Учет сосредоточенных поперечных проводимостей при определении переходных значений токов и напряжений также не встречает особых затруднений.

Определение токов и напряжений при переходных процессах на линиях с распределенными постоянными. При рассмотрении выполнения защит для достаточно длинных линий сверхвысоких и ультравысоких напряжений, работающих с временами срабатывания 0,01—0,02 с, необходимо считаться с наличием при КЗ в мгновенных значениях токов и остаточных напряжений кроме апериодических слагающих еще свободных колебательных (знакопеременных) затухающих слагающих; при этом учитывается, что переходные процессы затухают относительно медленно в связи с малыми в них потерями.

Существуют два способа расчетов переходных процессов на линиях большой протяженности. Первый основан на рассмотрении распространяющихся (бегущих) при нарушении режима волн, второй — волн, соответствующих собственным колебаниям в системе.

Способ распространяющихся волн в современном его виде, являющемся развитием способа Бержерона, пригоден в сочетании с ЭВМ для схем любой сложности, на неограниченном интервале времени, как при линейных, так и нелинейных элементах. Основной недостаток способа применительно к условиям защиты заключается в получении результирующих величин без выделения свободных колебательных и апериодических затухающих слагающих.

Второй способ в варианте, разработанном для практического использования С. Б. Лосевым и А. Б. Черниным [33], основан на известной формуле разложения операционного исчисления, в первоначальном виде предложенной в 20-х годах Хевисайдом (Великобритания). С ее помощью электрические величины (токи, напряжения) определяются в виде суммы принужденной (основной) слагающей промышленной частоты, апериодических и свободных колебательных слагающих. Это для подавляющего большинства защит является определяющим преимуществом способа. Он не пригоден для так называемых волновых защит и рассмотрения явлений, происходящих в первые мгновения возникновения нарушений режима. Некоторые недостатки способа устраняются при использовании для расчетов на ЭВМ программ, разработанных в ЭСП.

Использование формулы разложения. При приложении к схеме источника синусоидального напряжения $u(t)=U_m\sin(\omega_н t+\varphi)$ и при

нулевых начальных условиях возникает ток, мгновенное значение которого

$$i(t) = \mathrm{Im}\left[\frac{U_m e^{j(\omega_н t+\varphi)}}{\underline{Z}_\Sigma(j\omega_н)} + \sum_{s=1}^{n} \frac{U_m e^{j\varphi} e^{p_s t}}{(p_s - j\omega)\,\underline{Z}'_\Sigma(p_s)}\right]. \qquad (1.19)$$

Если ток $i(t)$ выражен в комплексной форме $I(t)$, знак Im, указывающий, что берется мнимая часть выражения (1.19), отпадает. Отдельные слагающие выражения (1.19) представляют: $U_m e^{j(\omega_н t+\varphi)}$ — напряжение источника в комплексной форме равно $U_m[\cos(\omega_н t+\varphi)+ +j\sin(\omega_н t+\varphi)]$; $\underline{Z}_\Sigma(j\omega_н)$ — комплексное сопротивление схемы; p_s — корни характеристического уравнения $\underline{Z}_\Sigma(p)=0$, где $\underline{Z}_\Sigma(p)$ — операторное сопротивление схемы; $\underline{Z}'_\Sigma(p_s)$ — производную $\underline{Z}(p)$ при $p=p_s$.

Мнимая часть первого члена формулы (1.19) характеризует принужденную слагающую тока $i_{пр}(t)=U_m\sin(\omega_н t+\varphi-\theta)/Z_\Sigma(j\omega_н)$, где θ — угол $\underline{Z}_\Sigma(j\omega_н)$. Мнимая часть второго члена (1.19) характеризует сумму апериодических $i_а(t)$ и колебательных $i_{кол}(t)$ затухающих слагающих. Таким образом,

$$i(t) = i_{пр}(t) + \sum_{s=1}^{m} i_а(t) + \sum_{s=1}^{\infty} i_{кол}(t). \qquad (1.20)$$

Приведенные выражения непосредственно применимы для металлического трехфазного КЗ. В этом случае активными сопротивлениями часто можно пренебречь. При этом определения амплитуд и фаз могут быть существенно упрощены. Активные сопротивления необходимо при этом учитывать только для определения свободных составляющих. При повреждениях на землю это недопустимо.

При расчетах несимметричных КЗ обычно используется метод симметричных составляющих. При этом напряжения, токи и сопротивления элементов при нулевых начальных условиях выражаются в операторной форме. По найденным при расчете изображениям электрических величин находятся их оригиналы, т. е. величины, выраженные в функции времени.

Проведенные исследования [33] и практические расчеты дали возможность сделать ряд выводов, главные из которых сводятся к следующему: 1) свободные колебательные слагающие имеют, как правило, частоту $\omega_s > \omega_н$, хотя первая из них может быть и близка $\omega_н$ (колебания с $\omega_s < \omega_н$ возникают только на электропередачах с очень редко применяемой продольной емкостной компенсацией). Необходимо подчеркнуть, что использование для колебательных затухающих слагающих названия «свободные гармоники» не очень удачно, так как они не являются периодическими функциями; 2) начальные значения колебательных слагающих зависят не только от угла φ, но и от их частоты ω_s. В связи с этим их начальные значения максимальны при прохождении $u(t)$ в момент КЗ через максимум, а не через нуль, как бывает для основной слагающей с рабочей частотой $\omega_н$ (по этой же причине слагающие с частотой ω_s содержат даже при симметричном КЗ составляющие обратной последовательности); 3) с учетом того, что теоретически число свободных колебательных слагающих равно ∞, приходится принимать меры к снижению их числа до допустимого значения при сохранении приемлемой точности расчета; при этом необходимо иметь в виду, что, как показали исследования В. Г. Плотникова и А. Б. Чернина в ЭСП, для линий, входящих в сеть, в отличие от одиночной линии некоторые последующие гармоники могут иметь амплитуды большие, чем предыдущие; 4) обычно можно учитывать только одну результирующую апериодическую слагающую с коэффициентом затухания, равным R_Σ/L_Σ, где $R_\Sigma=\underline{Z}_\Sigma(0)$ определяется при $j\omega=0$.

Влияние переходных процессов на защиту линий с распределенными постоянными. Измерительные органы защиты линий от КЗ, как указывалось выше, строятся преимущественно с использованием электрических величин промышленной частоты. Их отстройку от свободных затухающих слагающих пытаются осуществлять различно в зависимости от используемой элементной базы. Так, например, при индукционных системах, учитывая их естественные свойства, ограничиваются созданием в системах обмоток специальных контуров, в микроэлектронных устройствах применяют аналоговые фильтры, в программных защитах (на микропроцессорной базе) используют цифровую фильтрацию. Разрешение этого вопроса оказалось, однако, весьма сложным, и его пока нельзя считать окончательно решенным (см., например, [16, 34]).

1.7. ВИДЫ НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ, НА НИХ РЕАГИРУЮЩЕЙ

Основными видами ненормальных режимов работы электрических сетей, учитываемыми при выполнении их релейной защиты, являются: сверхтоки, обусловленные перегрузками или КЗ, возникающими вне защищаемого участка сети; качания и нарушения синхронизма между параллельно работающими в системе машинами; броски тока намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов; токи самозапуска. Особенности ненормальных режимов работы машин и аппаратов рассматриваются ниже применительно к их защитам.

Сверхтоки. Сверхтоки оказывают на линии термическое воздействие, что может привести к ускоренному износу

проводов, особенно в местах установки соединительных зажимов, или даже к повреждениям этих линий.

От сверхтоков, вызванных внешними КЗ, обычно используется защита участка от КЗ, действующая как резервная в случаях отказа защит или выключателей поврежденного смежного элемента. Следует иметь в виду, что в правильно спроектированной и эксплуатируемой распределительной сети недопустимые перегрузки маловероятны и специальная защита от них обычно не устанавливается. Если недопустимые перегрузки вероятны, то может встать вопрос об установке защиты, работающей на сигнал и разгрузку.

Колебания напряжений и токов при качаниях и нарушениях синхронизма. Часто интенсивные качания синхронных машин возникают вследствие недостаточно быстрого отключения КЗ в системе. В наиболее тяжелых условиях возможно возникновение кратковременного или затяжного нарушения их синхронной работы, что, однако, для современных мощных машин обычно не допускается. Этими режимами сопровождаются также используемые иногда в эксплуатации автоматические несинхронные включения.

Соотношения электрических величин при качаниях, возникающих, например, после отключения внешнего КЗ, даются ниже для одиночной линии с двусторонним питанием (рис. 1.51, *а*). В этом случае процессы во всех трех фазах протекают одинаково и их можно рассматривать для одной фазы. Если расхождение углов $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ двух частей системы происходит относительно медленно, то можно с небольшой погрешностью считать, что частота каждой из них остается неизменной, а следовательно, и сопротивления элементов системы одинаковы для обеих ЭДС. Тогда уравнительный ток в линии $АБ$ при угле расхождения δ между $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ (рис. 1.51, *б*) $\underline{I}_{ур}=(\underline{E}_А-\underline{E}_Б)/(\underline{Z}_А+\underline{Z}_л+\underline{Z}_Б)$ отстает от $\underline{E}_А$ — $-\underline{E}_Б$ на угол $\varphi_с=\operatorname{arctg}(\overline{X}_А+\overline{X}_л+\overline{X}_Б)/(\overline{R}_А+R_л+R_Б)$.

Напряжения по концам линии $\underline{U}_А=\underline{E}_А-\underline{I}_{ур}\underline{Z}_А$ и $\underline{U}_Б=$ $=\underline{E}_Б+\underline{I}_{ур}\underline{Z}_Б$. Минимальное напряжение $\underline{U}_д$ в системе при данном угле определяется в изображенном случае длиной перпендикуляра, опущенного из центра диаграммы на вектор $\underline{U}_{АБ}$ падения напряжения в линии. Точка в системе, имеющая при данном δ минимальное напряжение, называется *электрическим центром*. В общем случае электрический центр может занимать различные положения, перемещаясь с изменением угла δ.

В 1940—1941 гг. в МЭИ (Н. А. Моралев) был предложен своеобразный метод рассмотрения соотношения электрических величин при качаниях. Он кратко сводится к тому, что все напряжения и ЭДС диаграммы на рис. 1.51, *б* делятся на ток $I_{ур}$. В этом случае применительно к использованию комплексной плоскости сопротивлений все элементы системы изображаются на этой плоскости (рис. 1.52). В предпо-

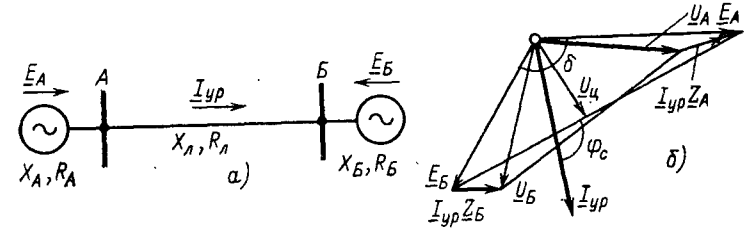


Рис. 1.51. Качания в системе с двумя источниками питания

ложении равенства абсолютных значений ЭДС $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ проводится прямая, перпендикулярная суммарному сопротивлению $\underline{Z}_\Sigma$ системы в его середине. Получающаяся линия $O'O''$ может рассматриваться как линия нулевых потенциалов, а ЭДС $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ — как изменяющиеся (с изменением δ) расстояния от ее точек до концов $\underline{Z}_\Sigma$ (нейтралей систем $А$ и $Б$). При равенстве абсолютных значений $\underline{E}_А$ и $\underline{A}_Б$ линия $O'O''$ заменяется дугами окружностей. Такой подход оказался удобным для анализа поведения при качаниях, в особенности таких защит, как дистанционные. В дальнейшем появились зарубежные и отечественные работы, развивающие такой же метод.

При качаниях угол δ определяется электромеханическими переходными процессами в генераторах системы, причем его изменения во времени имеют колебательный характер. Амплитуды колебания угла δ при качаниях затухают, и наступает установившийся послеаварийный режим. При $|\delta|>180°$ втягивание в син-

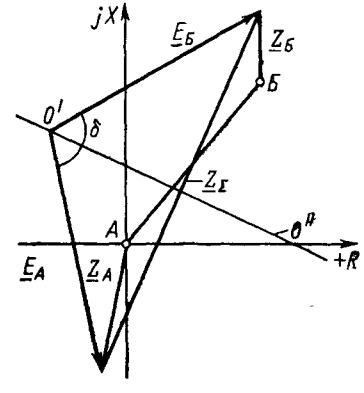


Рис. 1.52. Использование комплексной плоскости сопротивлений для анализа работы защит при качаниях

хронизм оказывается затруднительным и возникает асинхронный режим, когда частоты $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ неодинаковы. Ниже приводится упрощенный анализ режима качаний при быстром изменении угла $\delta=\delta(t)$ и асинхронного режима, если использовать метод наложения. Наиболее наглядно закономерности изменения уравнительного тока можно показать, если принять, что амплитуды тока I_m от каждой из ЭДС одинаковы. Тогда при качаниях уравнительный ток $i_{ур}$ будет равен

$$i_{ур} = I_m \sin \omega_A t - I_m \sin [\omega_A t - \delta(t)] = \\ = 2I_m \cos [\omega_A t - \delta(t)/2] \sin [\delta(t)/2], \qquad (1.21)$$

а при асинхронном режиме с угловыми частотами $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$, равными соответственно $\omega_А$ и $\omega_Б$,

$$i_{ур} = I_m \sin \omega_A t - I_m \sin \omega_Б t = 2I_m \cos \frac{\omega_А + \omega_Б}{2} t \sin \frac{\omega_А - \omega_Б}{2} t. \qquad (1.22)$$

В обоих случаях уравнительный ток имеет вид косинусоиды с амплитудой, зависящей от угла $\delta(t)$ при качаниях и угла $(\omega_А - \omega_Б)t$ при асинхронном режиме. Эти токи достигают амплитуды $2I_m$ при значениях этих углов, равных 180°, и могут быть больше токов КЗ на защищаемых линиях.

Напряжения на линиях в рассматриваемых режимах также пульсируют. Наиболее сильные их колебания происходят в точках системы, расположенных вблизи электрического центра. Ряд защит от КЗ может реагировать на качания и асинхронный режим, поскольку последние сопровождаются повышением токов и понижением напряжений, как и при КЗ, а электрический центр является как бы местом их возникновения. Для многих защит допустимо упрощенное представление процесса, когда считается, что $\underline{E}_А$ и $\underline{E}_Б$ имеют неизменную частоту, но угол δ между ними равномерно изменяется во времени. При асинхронном режиме этот фиктивный угол $\delta=(\omega_А - \omega_Б)t$, а зависимости от него тока $I_{ур}$ и напряжений $U_А$, $U_Б$ и $U_ц$ показаны на рис. 1.53. Если измерительные органы защиты имеют частотно-зависимые цепи, т. е. интеграторы или дифференциаторы, то такое упрощенное представление процесса может привести к серьезным ошибкам при анализе. Например,

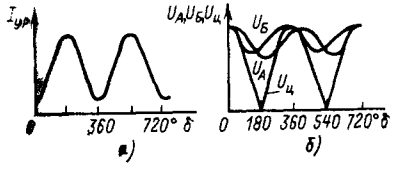


Рис. 1.53. Изменения при асинхронном режиме тока и напряжения в различных точках системы

чувствительные фильтровые органы обратной последовательности, настроенные на частоту $\omega_А$, будут реагировать на небалансы, возникающие от слагающих, изменяющихся пропорционально $\sin[\omega t - \delta(t)]$ [см. (1.21)] или $\sin \omega_Б t$ [см. (1.22)], причем небалансы будут тем больше, чем меньше период качаний [бо́льшая частота колебаний угла $\delta(t)$] или чем больше разница между $\omega_А$ и $\omega_Б$. Более глубокий и полный анализ этого вопроса дан Э. М. Шнеерсоном [15].

Большие уравнительные токи, возникающие при качаниях и асинхронном режиме, могут также вызвать увеличенные погрешности измерительных ТА, что необходимо учитывать при выполнении дифференциальных и фильтровых защит.

Системы должны эксплуатироваться так, чтобы выходы из синхронизма были по возможности исключены. Это, в частности, достигается применением быстродействующих защит, использованием комплексов устройств противоаварийной автоматики. Если, однако, синхронизм оказывается все же нарушенным, систему приходится автоматически делить в определенных, заранее установленных местах на несинхронно работающие части, так чтобы в последних были по возможности сбалансированы генерирующие мощности и мощности, потребляемые в нагрузках.

Срабатывание защит в рассматриваемых режимах является недопустимым, так как может приводить к нарушениям работы системы, разделению ее на части в недопустимых местах, отключениям потребителей. Предотвращение работы защит, подверженных воздействию качаний, достигается соответствующим выбором их параметров срабатывания или применением специальных устройств.

Броски намагничивающего тока трансформаторов и автотрансформаторов. Намагничивающий ток $I_{нам}$ трансформаторов и автотрансформаторов, не превосходящий при нормальной работе нескольких процентов их номинального тока $I_{ном}$, может при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ, и особенно при включении под напряжение, в несколько раз превышать $I_{ном}$. При этом $I_{нам}$ для автотрансформаторов определяется их типовой мощностью, а для многообмоточных трансформаторов — мощностью наиболее мощной обмотки.

Возможности появления больших значений бросков намагничивающего тока $I_{нам.\,бр}$ определяются тем, что при включении под напряжение в неблагоприятный момент времени по напряжению и при наличии остаточного потока в магнитопроводе, совпадающего по знаку с переходным

потоком, стержни магнитопровода полностью в течение первого периода (0,02 с) насыщаются и сопротивление трансформатора (здесь и ниже имеются в виду и автотрансформаторы) кратковременно оказывается весьма небольшим. Типичные кривые бросков $i_{нам,бр}$ для трех фаз приведены на рис. 1.54. Они характеризуются следующим: максимальное значение бросков достигает 6—8-кратных

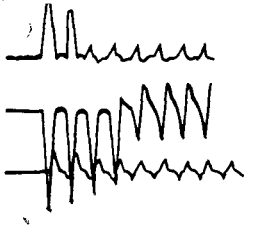


Рис. 1.54. Примерные кривые мгновенных значений бросков намагничивающих токов в трех фазах трехфазного трансформатора

значений амплитуд $I_{ном}$; броски ограничиваются сопротивлениями питающей системы и трансформатора с насыщенным магнитопроводом, но остаются меньшими максимальных переходных токов внешних (сквозных) КЗ; бросок может содержать большую апериодическую слагающую, а также значительный процент высших гармоник (прежде всего второй), в результате чего кривая $i_{нам,бр}$ часто оказывается полностью смещенной относительно оси времени; затухание броска происходит медленнее, чем токов КЗ в системе; для трехфазных трансформаторов (автотрансформаторов) броски в одной из фаз, достигая значений 1—2-кратных амплитуд $I_{ном}$, могут не содержать апериодической слагающей; если нейтраль трансформатора с питающей стороны заземлена (сеть с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ), то с учетом неодновременности замыкания фаз включающего выключателя в цепи заземления нейтрали трансформатора кратковременно появляется ток, замыкающийся через заземленные нейтрали питающей системы и практически исчезающий после завершения включения всех трех фаз.

Исследования бросков проводились как за рубежом, так и, особенно широко и глубоко, в НПИ (А. Д. Дроздовым и его учениками А. С. Засыпкиным, Г. В. Бердовым, В. А. Борисовым и др.). Благодаря авторитету А. Д. Дроздова НПИ совместно с Южным отделением ЭСП (Г. В. Бердов и др.) на базе теоретических и экспериментальных исследований удалось создать методы расчета бросков, по точности приемлемые для техники релейной защиты.

Для защит сетей особенно важны расчеты токов в нейтрали трансформаторов, так как они в виде составляющих нулевой последовательности проходят по защищаемым линиям сети. Широко используемые в сетях с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ токовые защиты и токовые направленные защиты нулевой последовательности, если они не имеют выдержек времени, от этих бросков тока должны отстраиваться, особенно на линиях с ответвлениями.

В указанных выше работах приводится следующее окончательное выражение для броска тока в нейтрали включаемого трансформатора:

$$I^{(к)}_{нам,бр} = U_{ном} C^{(к)}_{бр} / \sqrt{3} X_{расч}, \qquad (1.23)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети; $X_{расч} = X_{1с} + X_{1л} + X^{(к)}_{т}$; (к) — индекс, обозначающий вид включения; $C^{(к)}_{бр}$ — коэффициент броска, учитывающий зависимость действующего значения тока ($I_{нам,бр}$) от характера затухания броска, последовательности включения фаз и сорта стали магнитопровода. В [36] даются конкретные предложения по определению отдельных слагаемых выражения (1.23). Полезны также указания в работе [81].

Токи самозапуска. Токи самозапуска возникают, например, после успешного отключения поврежденного элемента его защитами, успешного автоматического повторного включения элемента, на котором было КЗ, при автоматическом включении резерва и т. д. Токи самозапуска при нагрузке с асинхронными двигателями, резко снижающими свое сопротивление при уменьшении частоты вращения, могут быть в несколько раз бóльшими максимальных рабочих токов защищаемого участка (гл. 14). Они существуют кратковременно, однако должны учитываться при выборе параметров срабатывания защит даже с выдержкой времени.

1.8. ОПИСАНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЕ СХЕМ ЗАЩИТ

Описание и изображение схем защит прежде всего определяется элементной базой, используемой для их осуществления. Программные защиты, реализуемые на микропроцессорной элементной базе, характеризуются алгоритмами их функционирования и выполненной для них программой. Защиты на электромеханической и полупроводниковой элементных базах могут также характеризоваться алгоритмами их функционирования и, описываемыми соответствующими аналитическими выражениями. Однако часто более удобно использовать схемы этих защит. Согласно ГОСТ

эти схемы подразделяются на следующие основные типы: *структурные, функциональные, принципиальные* (полные) и *монтажные*.

Структурная схема включает только основные функциональные части защиты и основные взаимосвязи между ними. На функциональной схеме изображаются отдельные элементы устройства и связи между ними; эта схема не дает, однако, представления, о видах релейной аппаратуры, в частности о том, какие органы (реле) используются — электромеханические с контактами или статические бесконтактные. Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связей между ними и дает, в частности, указание о виде применяемых органов (реле). На монтажной схеме кроме изложенного указываются провода, кабели, которыми выполняются все соединения, а также места их присоединения и ввода (зажимы, разъемы и т. п.). Необходимо отметить, что в ряде случаев не получается четкого разграничения между структурной и функциональной, а также функциональной и принципиальной схемами.

Принципиальные схемы обычно изображаются в однолинейном (однофазном) или в трехлинейном (трехфазном) виде, в совмещенном или разнесенном (развернутом) виде (ГОСТ это допускает и для функциональных схем). В настоящее время, как правило, используются только разнесенные схемы. На разнесенных схемах органы (реле) в целом не показываются. Составляются отдельные схемы для цепей, непосредственно питаемых от *TA*, *TV* и от источников оперативного тока (например, аккумуляторных батарей). При этом части одного и того же органа (реле) или другого аппарата оказываются изображенными на разных схемах или в разных частях одной схемы.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы функции комплекта релейной защиты?
2. Какая защита называется основной и какая резервной?
3. На какие группы подразделяются отказы функционирования защиты?
4. Объясните понятие эффективности функционирования защиты.
5. Какие существуют подходы классификации свойств защиты?
6. На какие основные группы делятся защиты по способам обеспечения селективности при внешних КЗ?

7. Какие основные виды каналов связи могут применяться для выполнения релейной защиты элементов энергосистемы?
8. На какие основные типы подразделяются способы изображения схем защиты?

Глава вторая

ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТНЫЕ БАЗЫ

2.1. ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ И ИХ СВОЙСТВА

Устройства защиты, как указывалось выше (см. рис. В.2), содержат две главные части — измерительную и логическую. Каждая из них в общем случае состоит из нескольких органов. Указанные части и их органы не всегда имеют отдельное конструктивное выполнение. Нередко, например, при электромеханической и особенно микропроцессорной элементных базах некоторые или даже большинство их органически сочетаются и входят в устройство защиты в неявном виде. Однако вне зависимости от используемой элементной базы органы защиты обладают рядом общих или достаточно близких принципиальных свойств.

Измерительным органом (ИО) защиты может быть названа совокупность взаимодействующих функциональных элементов, перерабатывающих воздействующие величины на входе в сигнал на выходе с дискретной величиной, имеющей одно из двух возможных значений, соответствующих условиям — сработал орган или не сработал. Измерительные органы выполняются по возможности быстродействующими. К ним относятся, в частности, электрические реле в случае выполнения их без выдержки времени. Поэтому ряд терминов существующего ГОСТ на реле могут быть использованы, в дополнение к приведенным в § В.1, и для других разновидностей ИО. В соответствии с указанным можно сказать, что к ИО в общем случае подводятся *воздействующие* величины, подаваемые от первичных *TA* и *TV* и представляющие токи и напряжения, необходимые для достижения в заданных условиях функционирования органа, и *вспомогательные воздействующие* величины (подводимые, например, от источника оперативного тока) для выполнения тех же функций.

Характеристической называется величина, являющаяся

функцией воздействующих величин и определяющая функциональный признак органа, например ток — для органа тока, угол между векторами напряжения и тока — для органа направления мощности.

Из воздействующих величин $F(U, I)$, соответствующим образом преобразованных, осуществляется формирование новой величины H для сравнения с заданной $H_{зад}$ или двух H (H_i, H_j) между собой. Первый вариант характерен для органов с одним независимым вектором — одной сравниваемой величиной: током (орган тока), напряжением (орган напряжения); к ним следует также отнести такие более сложные органы, как, например, реагирующие на симметричные составляющие токов или напряжений. Второй вариант характеризует органы с двумя независимыми векторами — двумя сравниваемыми величинами: обычно током и напряжением (органы направления мощности, органы сопротивления и ряд других). Существуют также органы с тремя и более сравниваемыми величинами H, в которых используется соответствующее им число независимых векторов. В таких органах производится предварительное, например попарное, сравнение величин H и только после этого осуществляется окончательное решение о результатах их функционирования. К последним органам сравнения относятся, например, иногда используемые на практике многофазные органы сопротивления.

В технической литературе часто совокупность воспринимающей и преобразующей частей ИО именуют *схемой формирования* (СФ), а сравнивающую и иногда ее совместно с исполнительной — *схемой сравнения* (СС).

Измерительный орган с одной сравниваемой величиной H срабатывает, если ее значение становится равным заданной конечной величине $H_{зад}$. Существуют *максимальные* и *минимальные* ИО. Максимальными называют органы, срабатывающие при $H \geqslant H_{зад}$. Им соответствует значение характеристической величины, называемое *параметром* срабатывания, например ток срабатывания $I_{с,о}(I_{с,р})$.

Измерительный орган с двумя и более сравниваемыми величинами обычно имеет очень малые значения $H_{зад}$, в предельном случае равные нулю. С учетом этого можно положить, что такие органы, например с двумя H, срабатывают, если $H_i \geqslant H_j$ или соответственно $H_i \leqslant H_j$. Их срабатывание обычно характеризуют соответствующим значением характеристической величины, например для органа сопротивления — сопротивлением срабатывания $Z_{с,о}(Z_{с,р})$.

Они также могут быть максимальными и минимальными; органы сопротивления, как правило, выполняются минимальными. Вид преобразования входных величин F в H определяется используемой элементной базой. Так, например, у электромеханических органов (реле) F преобразуется обычно в момент пружины, у полупроводниковых — в напряжение или длительность импульсов; соответственно $H_{зад}$ представляет тогда заданный момент пружины, стабилизированное напряжение или заданный интервал времени.

Измерительные органы имеют *область срабатывания.* Для органа с одной сравниваемой величиной H область срабатывания располагается на числовой оси (рис. 2.1, *а*),

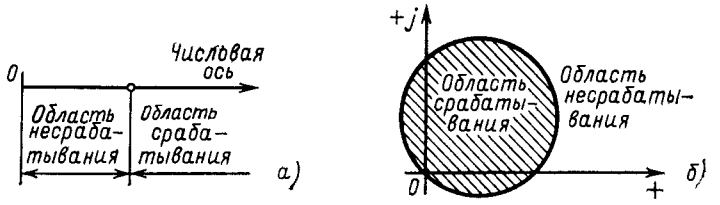


Рис. 2.1. Области срабатывания измерительных органов

для органа с двумя сравниваемыми независимыми величинами — на плоскости (рис. 2.1, *б*), для органа с тремя и более независимыми величинами — в пространстве соответственно с тремя и более координатами. Для органов с двумя величинами область срабатывания ограничивается так называемой *характеристикой,* представляющей линию, отделяющую область срабатывания от области несрабатывания (например, рис. 2.1, *б*). Идеальная (или просто характеристика) характеризуется случаем, когда $H_{зад}=0$. Реальная характеристика учитывает наличие не равной нулю $H_{зад}$ и ряд причин, определяемых типом и свойствами используемой элементной базы, погрешностями *TA* и *TV*, особенно при переходных процессах, и т. д.

Необходимо отметить, что как в зарубежной, так и в отечественной литературе часто говорится о характеристиках срабатывания без подчеркивания того, что они при $H>2$ условны, относятся к частным условиям и справедливы только при $H=2$. Следует обратить внимание и на то, что рассмотренные описания условий срабатывания ИО, называемые обычно *алгоритмами* их срабатывания, могут

иметь весьма различный вид (например, зависящий от элементной базы) и поэтому не могут однозначно характеризовать принцип работы органа.

2.2. МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ И АНАЛИЗА РАБОТЫ ИО

Существует ряд методов описания и анализа работы ИО с числом сравниваемых величин $H \geqslant 2$. К ним относятся следующие: аналитический; с использованием комплексных плоскостей (обычно сопротивлений), элементов векторной и булевой (логики) алгебр, статистических испытаний — моделирования (метод Монте-Карло); с использованием плоскости вольт-амперных характеристик (ВАХ). До 40-х годов обычно применялись аналитические методы в элементарном, несистематизированном виде. В 40-е и последующие годы в отечественной практике и за рубежом широкое распространение получил метод с использованием комплексной плоскости, в том числе и в учебных пособиях по элементам автоматических устройств электроэнергетики [37, 38]. В последние годы, в особенности в связи с намечаемым широким внедрением микропроцессорной техники, вновь большое внимание начинают уделять аналитическому методу в современной его интерпретации [9, 16].

Аналитический метод непосредственно базируется на изложенных выше свойствах ИО. Алгоритм формирования каждой сравниваемой в нем величины H в общем случае записывается в виде функции, ниже называемой Ψ-функцией:

$$H = \Psi(F_1, F_2, \ldots, F_m), \qquad (2.1)$$

где $F_1, F_2, \ldots, F_m$, как указывалось, — воздействующие величины (например, U, I), соответствующим образом преобразованные. В общем случае измерительная часть описывается системой выражений вида (2.1); в частном, но весьма распространенном случае измерительную часть удается описать единственной Ψ-функцией.

Сравнивающая часть производит сравнение значений, сформированных в формирующей части величин, с заданными значениями $H_{зад}$ или между собой и в общем случае описывается системой, состоящей из n функций вида

$$\Phi(H_i, H_j) = \begin{cases} 1 \text{ при } H_i \geqslant H_j; \\ 0 \text{ при } H_i < H_j \end{cases} \qquad (2.2)$$

и одной результирующей логической функцией вида

$$Л(\Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_n) = \begin{cases} 1; \\ 0. \end{cases} \qquad (2.3)$$

Если сравнение производится с заданным значением $H_{зад}$, то $H_i \geqslant H_{зад}$ — условие срабатывания для максимального ИО и $H_i \leqslant H_{зад}$ — для минимального. Аргументы H функции Ф принадлежат множеству действительных чисел. Область значений функции Ф дискретна и включает всего два значения — 1 или 0, отражающих результаты сравнения — соответственно сработал ИО или нет.

При общем числе сформированных и заданных неизменными сравниваемых величин больше двух сравниваемая часть описывается системой функций H вида (2.1). С учетом результатов попарного сравнения принимается окончательное решение о срабатывании или несрабатывании ИО в соответствии с выражением (2.3). Функция $Л$ включает стандартные логические операции, дополненные при необходимости операциями задержек по времени. При общем числе сравниваемых величин не более двух логическая часть $Л$ описывается единственной функцией Ф вида (2.2) и (2.3) отсутствует. Состояние ИО в этом случае соответствует значению функции Ф.

Система функций (2.1), (2.2) и (2.3) дает, таким образом, полное аналитическое описание алгоритма функционирования ИО при условии раскрытия входящих в нее функций и состава аргументов. Некоторые соображения по этим вопросам даны ниже. Использование рассмотренного метода особо необходимо и эффективно при микропроцессорной элементной базе.

Метод может быть распространен и на описание совокупного действия нескольких ИО, а с учетом логической части — и на устройство защиты в целом.

Использование комплексной плоскости. Этот метод является разработанным наиболее полно. Впервые его, по-видимому, использовал в конце 30-х годов Варрингтон. В СССР большую работу по его развитию выполнили В. Л. Фабрикант, а также другие работники МЭИ и РПИ [37, 38]. Последняя по времени работа принадлежит Э. М. Шнеерсону [15]. Здесь же только кратко изложен принцип и дана оценка метода с учетом того, что его элементы используются и при аналитическом подходе. В первую очередь рассматривается схема сравнения ИО с двумя входными синусоидальными (F_1 и F_2) и двумя сформированными (H_1 и H_2) величинами.

Как было показано еще в конце 40-х — начале 50-х годов, сравнение величин H может осуществляться по абсолютному значению или по фазе с получением одинаковых характеристик срабатывания. Величины H_1 и H_2 формируются по выражениям

$$\underline{H}_1 = \underline{k}_1 \underline{F}_1 + \underline{k}_2 \underline{F}_2 \text{ и } \underline{H}_2 = \underline{k}_3 \underline{F}_1 + \underline{k}_4 \underline{F}_2. \qquad (2.4)$$

В ИО защит часто в качестве H_1 и H_2 используются соответственно подобранные U и I; при этом

$$\underline{H}_1 = \underline{k}_1 \underline{U} + \underline{k}_2 \underline{I} \text{ и } \underline{H}_2 = \underline{k}_3 \underline{U} + \underline{k}_4 \underline{I}. \qquad (2.5)$$

Различные характеристики срабатывания можно получать, выбирая соответствующие k_1—k_4. Это важно, в частности, с точки зрения выполнения на одной и той же схеме сравнения различных органов.

Возможно непосредственное сравнение H_1 и H_2 в комплексной плоскости $(+j, +)$, которую принято обозначать W. При сравнении по абсолютному значению идеальной характеристике вне зависимости от угла $\Psi = \widehat{H_1 H_2} = \arg(H_1/H_2)$ соответствует

$$W_c = \left| H_1'/H_2' \right|_c = 1. \qquad (2.6)$$

Она представляет собой окружность с центром в начале координат и радиусом $W_c = 1$ (рис. 2.2, *а*). Области срабатывания заштрихованы.

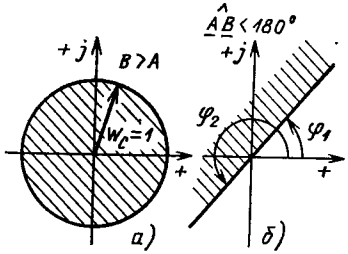


Рис. 2.2. Характеристики схем сравнения в комплексной плоскости $W = A/B$

При сравнении по фазе при заданных углах φ_1 и φ_2 ей соответствуют (рис. 2.2, *б*) условия

$$\varphi_{c1} = \arg\left(H_1'/H_2'\right)_c \text{ и } \varphi_{c2} = \arg\left(H_1''/H_2''\right)_c. \qquad (2.7)$$

При обычно принимаемом $\varphi_{c2} - \varphi_{c1} = \pi$ характеристика, изображается в общем случае двумя лучами, выходящими из начал координат под углами φ_{c1} и φ_{c2}, представляет одну прямую. Область срабатывания заштрихована. Необходимо отметить, что одни и те же характеристики срабатывания получаются при

$$\left.\begin{aligned} H_1' &= 0{,}5\left(H_1'' + H_2''\right) \text{ и } H_2' = 0{,}5\left|H_1'' - H_2''\right| \\ \text{или} \\ H_1'' &= H_1' + H_2' \text{ и } H_2'' = H_1' - H_2'. \end{aligned}\right\} \qquad (2.8)$$

Это еще раз подчеркивает возможность получения одинаковости результатов сравнения по абсолютному значению и фазе при соответствующем выборе формируемых величин. Практически оказывается целесообразным использовать комплексную плоскость не для сравнения H_1 и H_2, а для сравнения входных величин F_1 и F_2. Применительно к комплексной плоскости сопротивлений Z можно говорить о комплексных величинах $Z = U/I$. Существуют математические приемы перехода от использования плоскости W к плоскости Z.

Для сравнения в комплексной плоскости Z абсолютных значений идеальная характеристика срабатывания, если полагать $H_1' \geqslant H_2'$, описывается выражением

$$\left|Z_c - b\right| / \left|Z_c - a\right| = k, \qquad (2.9)$$

где $b = -k_2/k_1$, $a = -k_4/k_3$ — особые точки в плоскости Z; коэффициент $k = k_3/k_1$.

Характеристика представляет собой (рис. 2.3, *а*) геометрическое место точек (концов комплексов Z_c), отношение расстояния которых до двух заданных особых точек a и b постоянно и равно k. Показывается,

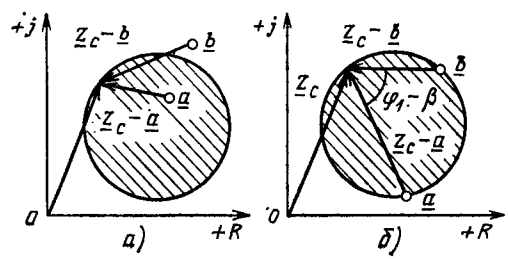


Рис. 2.3. Общий случай определения параметров реле сопротивления, сравнивающих:

а — абсолютные значения величин A и B; *б* — их фазы

что при $k \neq 1$ характеристика представляет окружность, а при $k = 1$ — прямую. При сравнении фаз, учитывая, что $\arg(H_1''/H_2'') = \arg(Z_c - b)/(Z_c - a)$ и $\arg k(Z_c - a) = \arg k + \arg(Z_c - a)$, и обозначая $\arg k = \beta$, для случая $\varphi_{c2} - \varphi_{c1} = \pi$ получаем выражения для идеальной характеристики срабатывания

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{c1} - \beta &= \arg(Z_c - b)/(Z_c - a); \\ \varphi_{c1} - \beta + \pi &= \arg(Z_c - b)/(Z_c - a). \end{aligned}\right\} \qquad (2.10)$$

Аргумент $(Z_c - b)/(Z_c - a)$ представляет угол, на который комплекс $(Z_c - a)$ отстает от комплекса $(Z_c - b)$ (рис. 2.3, *б*). Соотношения (2.10) удовлетворяются, если характеристика срабатывания представляет окружность. В частном случае при $\varphi_{c1} - \beta = 0$ характеристика оказывается прямой линией.

Из изложенного следует, что основным для описания характеристик в плоскости двух независимых сравниваемых величин H_1 и H_2 является целесообразный выбор положения точек a и b и коэффициентов k_1—k_4. При этом необходимо учитывать, что при сравнении абсолютных значений одна из точек a, b должна располагаться в области срабатывания, а другая — вне ее. При сравнении по фазе обе указанные точки располагаются на характеристике срабатывания.

На практике каждая из указанных характеристик часто описывается уравнениями, имеющими разную форму. Ниже приведены три из возможных форм. Уравненне в комплексной форме абсолютных значений: $|Z_c - 0{,}5(Z' + Z'')| - 0{,}5|Z' - Z''| = 0$. Уравнение с разложением Z_c на слагающие R_c и X_c: $(R_c - R_0)^2 + (X_c - X_0)^2 - R^2 = 0$, где R — радиус окружности; R_0 и X_0 — координаты ее центра.

Уравнение в тригонометрической форме при расстоянии ее центра от начала координат ρ, угле φ_p между Z_c и R_c и угле $\varphi_p = \varphi_{p\,max\text{ч}}$ соответствующем максимальному возможному Z_c : $Z_c = 2\rho Z_c \cos(\varphi_p - \varphi_{p\,max\text{ч}}) + \rho^2 - R^2 = 0$.

Всеми приведенными выражениями можно воспользоваться для перехода к уравненням, связывающим воздействующие величины F (напряжения и токи) в условиях срабатывания. Элементы могут быть, как указывалось выше, полезны и при аналитическом методе для формирования величин H. Его основным недостатком является малая пригодность при микропроцессорной базе и при числе независимых сравниваемых величин более двух. Необходимо, однако, отметить, что при ряде допущений метод комплексных плоскостей успешно использовался и для последнего случая в работах С. Я. Петрова, Е. А. Аржанникова, В. А. Шабанова, Э. М. Шнеерсона.

Метод с использованием векториой алгебры. Применительно к сравнению независимых величин H_1 и H_2 по фазе при условии $\varphi_{c2} - \varphi_{c1} = \pi$, если входные величины F непосредственно применяются для сравнения, срабатывание органа определяется с использованием векторов выражением

$$\operatorname{sign}(\underline{F}_1 \times \underline{F}_2) \geqslant 0, \qquad (2.11)$$

где sign — функция «знак», а знак $\times$ означает векторное произведение, соответствующее математическим понятиям векторной алгебры, отличным от принятого в электротехнике произведения двух величин.

Если необходимо, чтобы срабатывание происходило при угле между $\underline{F}_1$ и $\underline{F}_2$ в диапазоне, отличном от естественного, один из векторов следует повернуть на требуемый угол γ, например принимая $\underline{H}_1 = \underline{F}_1$, $\underline{H}_2 = \underline{F}_2 e^{j\gamma}$:

$$\operatorname{sign}(\underline{H}_1 \times \underline{H}_2) = \operatorname{sign}(\underline{F}_1 \times \underline{F}_2\, e^{j\gamma}) \geqslant 0. \qquad (2.12)$$

Правомерность использования векторной алгебры определяется тем, что в электрических цепях векторы, изображающие комплексы, могут рассматриваться как настоящие компланарные векторы — лежащие в одной плоскости и отнесенные к одному общему началу.

Как известно, различают векторное (рассмотренное) и скалярное произведения двух векторов. Последнее также может быть использовано для рассматриваемых целей. При этом необходимо отличать понятия простого алгебраического перемножения скаляров, например амплитуд, действующих значений (например, $F_1 F_2 = UI$) от скалярного произведения векторов $F_1 \cdot F_2 = F_{1m} F_{2m} \cos\varphi$, где F_{1m} и F_{2m} — модули векторов; точка $(\cdot)$ — знак их произведения, а φ — угол между ними. Скалярное произведение в зависимости от φ может быть как положительным, так и отрицательным.

В РПИ (В. Л. Фабрикант) [11] были предложены общие критерии срабатывания ИО с числом независимых сравниваемых величин $H > 2$. Эти критерии с использованием, например, векторных произведений величин $H_1, H_2, \ldots, H_n$ и алгебры логики имеют форму неравенств и четко определяют область срабатывания. Эти критерии далее уточнялись Эль-Хадиди (Египет) на кафедре РЗиА в МЭИ и впоследствии другими авторами. Рассмотренный метод особенно эффективен при $H > 2$. Он также может использоваться и при сравнении двух H, а также в аналитическом методе при формировании сравниваемых величин.

Метод статистических испытаний (моделирования), иногда называемый методом Монте-Карло, применительно к вопросам релейной защиты разработан в РПИ (А. С. Саухатас и др.). Он дает общий подход к решению разных вопросов, в том числе и к анализу поведения разного рода ИО. Однако метод обладает и некоторыми недостатками. К ним можно отнести отсутствие гибкости, наглядности. Задача решается вся целиком, поэтому затруднены оценка влияния отдельных факторов, а следовательно, и определение целесообразности мер по обеспечению более эффективного выполнения ИО, упущены мероприятия, более легко выявляемые при непосредственном формировании ИО из подаваемых на него воздействующих величин. Методом успешно пользуются в РПИ и некоторых других организациях с привлечением для расчетов ЭВМ. Широкого распространения метод не получил.

Метод с использованием плоскости U, I (ВАХ). Метод разработан во ВНИИЭ Я. С. Гельфандом [9]. Он предусматривает изображения в прямоугольной системе координат зависимостей $U_{пр} = f(I_{пр})$, где $U_{пр}$ — напряжение на шинах защищаемого присоединения (линии) от проходящего по нему тока, например тока КЗ в разных режимах работы, в том числе при КЗ через переходные сопротивления $R_п$, и характеристик срабатывания простых защит, например токовых, полного сопротивления с $Z_{с.о} = \text{const}$. Их совместное рассмотрение дает возможность определения защищаемых зон, удобного согласования чувстви-

тельностей указанных защит между собой и решения некоторых других задач. Не являясь универсальным, метод заслуживает более широкого применения, чем тот, который пока имеется, например для согласования параметров защит смежных элементов с относительной селективностью, имеющих различные принципы выполнения [9].

2.3. СВОЙСТВА ЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНОВ

Логическими органами (ЛО), как и измерительными, могут быть реле, поэтому для них используются некоторые термины и определения ГОСТ на реле.

Функционирование ЛО определяется воздействующей величиной, представляющей обычно напряжение источника оперативного тока, которое нормируется по допустимым пределам отклонений от некоторого (например, номинального) значения.

Логические органы преобразуют дискретную входную информацию, представляемую сочетанием входных сигналов от ИО, в дискретную же выходную. По характеру функционирования во времени рассматриваемые органы, называемые в некоторых случаях также автоматами, делятся на комбинационные — однотактные без памяти и последовательные — многотактные с памятью (конечные автоматические выключатели).

Функционирование однотактных органов полностью определяется сочетанием входных сигналов в данный момент времени, а многотактных — дополнительно их внутренним состоянием в момент времени, предшествующий данному, т. е. сигналами, поступившими на вход раньше; это достигается обычно с помощью промежуточных элементов, реализирующих различные временные операции.

Логические органы иногда используются для ИО непосредственно, например для осуществления органов, предложенных в ИЭИ (О. В. Лебедев) и в МЭИ (В. В. Будкин). Такие ИО могут быть названы *логическими*. Простые ЛО могут также являться элементами ИО, например в ИО с числом независимых сравниваемых величин больше двух.

Алгоритм функционирования совокупности ЛО, образующих логическую часть устройства защиты, аналитически описывается системой логических функций, по структуре аналогичных (2.3). При этом аргументами являются переменные, отражающие состояние ИО и, в общем случае, состояние коммутационной аппаратуры (например, выключателей).

Определяющее значение для анализа и синтеза работы ЛО и логической части защиты в целом имеет аппарат алгебры логики. Алгебра логики является исторически первым направлением математической логики. Ее основы были разработаны в середине прошлого века английским ученым Д. Булем, отсюда название — булева алгебра. В этой алгебре все независимые переменные и функции могут принимать только два значения: истинно или ложно, есть или нет. Для обобщенного описания эти значения принимаются соответственно равными 1 и 0. Большие работы по использованию алгебры логики и ее дальнейших разновидностей для релейной защиты в последние десятилетия были проведены в УПИ (В. Е. Поляков и др.) [13].

Основными элементарными логическими операциями являются дизъюнкция (ИЛИ), конъюнкция (И) и инверсия (НЕ). Операция ИЛИ представляет логическое сложение: $y=x_1+x_2+...+x_n$. Знак сложения обозначают через «+» или «$\vee$». Зависимая переменная y принимает значение 1, когда 1 равна одна из независимых переменных, или часть их, или все они. Операция соответствует параллельной работе элементов схемы. Операция И представляет логическое умножение $y=x_1 \cdot x_2 \cdot ... \cdot x_n$. Знак умножения обозначают через «$\cdot$» или «$\wedge$». Переменная y принимает значение 1, когда x_1, x_2 и т. д. равны 1. Операция соответствует последовательной работе элементов схемы. Операция НЕ представляет логическое отрицание: $y=\bar{x}$. Переменная y принимает значение 1, когда $x=0$ и, наоборот, $y=0$ при $x=1$. Таким образом, операция осуществляет инверсию x.

Три рассмотренные элементарные операции дают возможность реализации любой более сложной функции. Они связаны между собой законами инверсии, по которым $\overline{x_1+x_2}=\bar{x}_1\bar{x}_2$ и $\overline{x_1 x_2}=\bar{x}_1+\bar{x}_2$. Законы инверсии позволяют, в частности, производить замену одной логической операции, например И, схемой, содержащей элементы НЕ и ИЛИ, и т. п.

Непосредственное использование для многотактных логических органов булевой алгебры невозможно. Потребовалось расширение основ этой алгебры. Одна из первых работ в этой области опубликована в 1953 г. в США Э. Беркли. В частности, им был введен оператор D временной задержки. Часто используемым является элемент, осуществляющий задержку появления сигнала $D_1^{\uparrow}$, — сигнал появляется спустя время t_1 после подачи входного сигнала. Опе-

ратор D может быть, например, реализован в виде элемента или органа выдержки времени. Используя его совместно с элементами ИЛИ, И и НЕ, можно создавать и другие временные элементы.

Основные законы булевой алгебры остаются справедливыми и для многотактных органов. Имеется, оказывается, возможность выражения каждого временного оператора через любой другой (не только $D_1^{\uparrow}$) с использованием логических функций ИЛИ, И и НЕ. Развитие математической логики привело к созданию ряда высших логических функций, таких как пороговые, симметричные, комбинированные и др. (см., например, [13]). Использование этих функций, возможно, обеспечит лучшее осуществление логических частей релейной защиты. Практическая реализация рассмотренных основных логических операций осуществляется в зависимости от используемой элементной базы: при электромеханической — на контактах реле, при полупроводниковой — специальными элементами, при микропроцессорной — самими микропроцессорами.

2.4. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Общие свойства. Электромеханическая элементная база использует в качестве органов реле с контактами. Их работа основана на относительном перемещении механических элементов под воздействием тока, проходящего по обмоткам реле.

В реле электромагнитная энергия поля преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части. Часто используется угловое перемещение α; при этом рассматривается вращающий момент (а не сила) $M_{эм\,t}$ (мгновенное значение), выражение для которого вытекает из уравнений Лагранжа, являющихся уравнениями динамики системы

$$M_{эмt} = dW_{эмt}/d\alpha, \qquad (2.13)$$

где $W_{эм\,t}$ — электромагнитная энергия поля для момента времени t.

Практически используется только изменение магнитной составляющей энергии. Она может быть представлена в следующем виде:

$$W_{эмt} = 0{,}5\sum_{p=1}^{n} L_p\, i_p^2 + \sum_{p=1}^{n-1}\sum_{k=p+1}^{n} M_{pk}\, i_p\, i_k, \qquad (2.14)$$

где i_k, i_p — токи в контурах k и p устройства; L_p и M_{pk} — коэффициенты самоиндукции и взаимоиндукции контуров этих токов.

Электромеханические системы могут использоваться для создания реле с одной, двумя и несколькими воздействующими электрическими величинами.

В реле с одной воздействующей величиной (измерительное или логическое реле) осуществляется сравнение вращающего момента $M_{эм}$ с заданным противодействующим моментом $M_{пр}$, как правило, создаваемым пружиной. Приходится также учитывать момент $M_{тр}$, определяемый трением, который, как и $M_{пр}$, препятствует срабатыванию реле, но в отличие от последнего препятствует и возврату.

В реле с двумя и более воздействующими величинами применительно к измерительным реле осуществляется сравнение сформированных из них величин между собой. Принципиально для таких реле $M_{пр}$ вреден, так как требует для срабатывания бо́льших значений входных величин. Однако практически $M_{пр}$ иногда создается (безмоментной пружиной) для обеспечения четкого положения подвижной части реле в начальном состоянии (при отсутствии воздействующей величины).

Для срабатывания и возврата электромеханического реле на всем пути перемещения подвижной части должны выполняться соответственно условия $M_{эм,с} \geqslant M_{пр} + M_{тр}$ и $M_{эм,с} \leqslant M_{пр} - M_{тр}$. Возможные при работе реле соотношения моментов в функции угла поворота α показаны на рис. 2.4, *а*. Момент $M_{тр}$ принят не зависящим от угла α $M_{пр} = M_{пр,н} + k(\alpha - \alpha_н)$, а $M_{эм,с}$ — нарастающим с увеличением α и имеющим при $\alpha = \alpha_к$ избыточное значение $M_{изб}$ над суммой $M_{пр} + M_{тр}$. Принятый характер изменения $M_{эм,с}$ обеспечивает «опрокидывание» подвижной части (начав движение, она не задерживается в промежуточном состоянии) и необходимое нажатие в контакте реле. При этом говорится о наличии положительной обратной связи — $M_{эм,с}$ возрастает при притягивании якоря, а сам режим называется релейным. Такое же целесообразное опрокидывание обеспечивается и при возврате.

Важным коэффициентом, характеризующим рассматриваемую работу реле как ИО, является его *коэффициент возврата* $k_в$, определяемый отношением значения величины возврата к значению величины срабатывания. Для максимальных реле (органов) $k_в$, определяемый для точки $\alpha_к$, как соответствующей завершенному срабатыванию, будет характеризоваться отношением

$$M_{эм,в,к}/M_{эм,с\,к} = M_{пр,к} + M_{тр} + (M_{пр,к} - M_{тр})/M_{изб}. \qquad (2.15)$$

Коэффициент $k_в$ для ИО, как будет видно из дальнейшего, в целях повышения чувствительности защит желательно иметь по возможности близким к единице. Его отклонение от единицы определяется $M_{изб}$ и $M_{тр}$.

Для часто используемых на практике электромагнитных реле тока типа РТ-40 соответствующие зависимости даны на рис. 2.4, *б*.

Для логических реле значение $k_в$ является не столь существенным, как для измерительных. Это определяется тем, что при возврате логи-

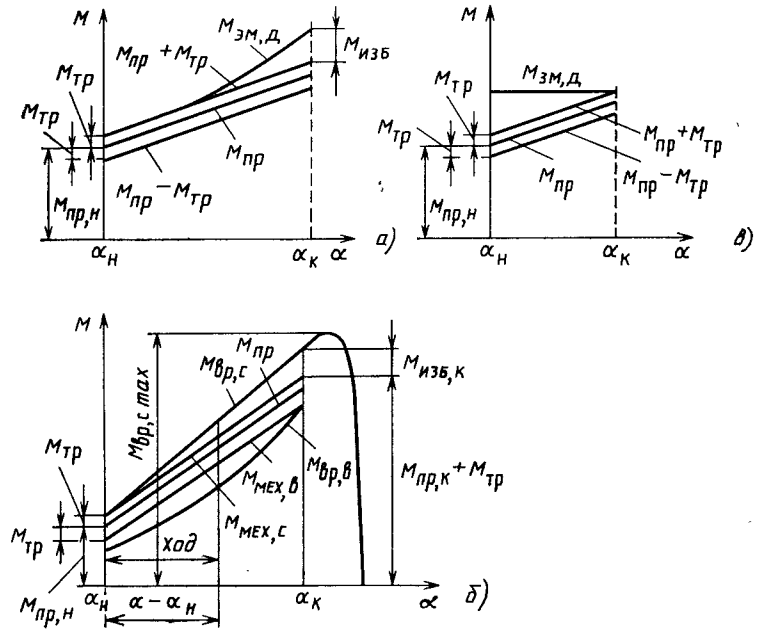


Рис. 2.4. Зависимостн моментов от угла поворота подвижного элемента реле

ческих реле, который обычно происходит после возврата измерительных реле, $M_{эм,в}=0$.

Необходимо отметить, что имеется ряд разновидностей измерительных реле, у которых затруднительно обеспечить «опрокидывающий» характер зависимости $M_{эм}=f(\alpha)$ (рис. 2.4, *в*). Это является, как следует из изложенного, их недостатком. Практически это бывают индукционные реле с цилиндрическим ротором с двумя и более воздействующими величинами, которые принципнально не нуждаются в противодействующей пружине. Угол поворота $\alpha_к$—$\alpha_н$ выбирается при этом весьма небольшим. Все это определяет у таких реле приемлемые условия работы и $k_в$.

Значения вращающих электромагнитных моментов определяются выполнением магнитной системы и МДС $F=I_р w$ обмоток; под обмоткой при этом понимается совокупность витков w с одним и тем же током.

Промышленность стремится использовать одни и те же магнитные системы для осуществления измерительных реле с разными характеристиками. Поэтому большое внимание обращается иа принципы размещения обмоток на заданных магнитных системах. Научное рассмотрение

выполнения различных измерительных реле на одной и той же магнитной системе, что было важно для организации их производства, было теоретически показано А. Д. Дроздовым в 1937 г. Исчерпывающие исследования были выполнены в 40—50-е годы В. Л. Фабрикантом [3]. Для осуществления электромеханических реле преимущественно используются электромагнитные и индукционные системы.

Использование электромагиитых систем. Электромагнитными называются реле, работа которых основана на воздействии магнитных полей неподвижных обмоток на подвижный ферромагнитный элемент (якорь). Вращающий момент $M_{эм\,t}$ определяется первым членом выражения (2.14), так как его второй член в данном случае равен нулю.

Энергия магнитного поля, например, измерительного реле тока с одной обмоткой и током в ней $i_р$ в соответствии с (2.14) $W_{эм\,t}=0{,}5i_р^2 L$. Ток $i_р$ как поступающий от ТА, являющегося источником тока, не зависит от параметров электромагнита и положения якоря, характеризуемого углом его поворота α. Поэтому при повороте якоря изменяется только коэффициент самоиндукции L, и с учетом (2.13)

$$M_{эмt} = \partial W_{эмt}/\partial\alpha = 0{,}5i_р^2\, dL/d\alpha. \qquad (2.16)$$

Из (2.16) следует, что направление $M_{эм\,t}$ не зависит от знака тока $i_р$. Поэтому электромагнитные системы могут использоваться для работы как на переменном, так и на постоянном токе с одной воздействующей величиной.

Значение $M_{эм\,t}$ в предположении, что ток $i_р$ синусоидален, равно

$$M_{эмt} = 0{,}5I_{mр}^2 \sin^2\omega t\, dL/d\alpha = k_1 I_р^2\, dL/d\alpha - k_1 I_р^2 \cos 2\omega t\, dL/d\alpha. \qquad (2.17)$$

Первый член (2.17) не зависит от времени и дает среднее за период зиачение $M_{эм}$; второй член представляет собой гармоническую составляющую удвоенной частоты. В результате на якорь реле переменного тока действует $M_{эм\,t}$, измеияющийся во времени (рис. 2.5) от нулевого до максимального значения с удвоенной частотой. С учетом инерционности системы приближенно считается возможным использование для анализа среднего момента $M_{эм}=k_1 I_р^2 dL/d\alpha$, определяемого

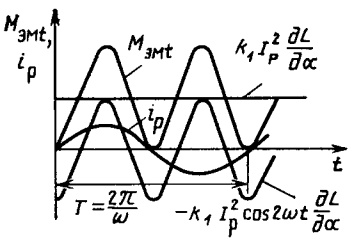


Рис. 2.5. Зависимость мгновенных значений вращающего момента и его слагающих от времеии для электромагнитного реле тока

действующим значением тока $I_р$. Среднее значение электромагнитного момента пропорционально квадрату МДС обмотки.

В реле на электромагнитных системах обычно осуществляется сравнение одной электрической величины с заданной (моментом противодействующей пружины).

В момент времени, когда $M_{эм\,t}<M_{мех}$, якорь имеет тенденцию отходить от полюсов и снова возвращаться в моменты, соответствующие $M_{эм\,t}>M_{мех}$. С якорем связан подвижный элемент контакта. Возможная вибрация якоря может поэтому приводить к недопустимой вибрации контакта.

Трансформаторы тока токовых защит при КЗ в защищаемых зонах, например в начале линий, за счет больших кратностей токов КЗ могут глубоко насыщаться. При этом вторичный ток TA сильно искажается по форме и содержит кроме основной высшие гармоники. За счет последних переменная составляющая $M_{эм\,t}$ может существенно возрастать, усиливая вибрацию контактов. Для устранения вибрации контактов электромагнитных реле предусматривается ряд мероприятий. Время срабатывания электромагнитных реле бывает невелико и обычно не превышает 0,01—0,02 с.

Использование индукционных систем. Индукционными называются реле, работа которых основана на взаимодействии переменных магнитных полей неподвижных обмоток с токами, индуктированными этими полями в подвижном неферромагнитном элементе (барабане или диске). Вращающий момент $M_{эм\,t}$ определяется вторым членом выражения ((2.14), так как индуктивность L при перемещении подвижного элемента не изменяется. Токи, индуктированнные в подвнжном элементе одним из потоков, $M_{эм\,t}$ не создают. Поэтому для создания $M_{эм\,t}$ индукционная система имеет не менее двух магнитных потоков, сдвинутых пространственно; они должны быть сдвинуты и по фазе. Система пригодна только для реле переменного тока.

Энергия магнитного поля и вращающий момент, например, реле с двухпоточной четырехполюсной системой с токами i_1 и i_2 в двух обмотках с учетом того, что поворот барабана на токи i_1 и i_2 не влияет, и выражений (2.13) и (2.14) равны $W_{эм\,t}=M_{12}i_1di_2/dt+M_{21}i_2di_1/dt$ и $M_{эм\,t}=i_1(di_2/dt)(dM_{12}/d\alpha)+i_2(di_1/dt)(dM_{21}/d\alpha)$. Поэтому

$$M_{эмt}=k'(i_2\,di_1/dt-i_1\,di_2/dt). \qquad (2.18$$

Если магнитная система реле не насыщена (ее магнитные потоки Φ_t пропорциональны токам) и токи i_1 и i_2 представляют собой синусоидальные величины одной частоты с фазным углом γ между ними, то получаем $di_1/dt\equiv d\Phi_{1t}/dt=I_{1m}\cos\omega t$ и $di_2/dt\equiv d\Phi_{2t}/dt=I_{2m}\cos(\omega t-\gamma)$. С учетом этого

$$M_{эмt}=kI_{1m}I_{2m}\sin\gamma. \qquad (2.19)$$

Выражения (2.18) и (2.19) дают возможность сделать следующие выводы.

1. В симметричной индукционной системе в отличие от электромагнитной момент $M_{эмt}$ при синусоидальных токах одной частоты неизменен во времени и равен среднему моменту за период.

2. Если токи i_1 и i_2 имеют неодинаковые частоты f_1 и f_2, то момент $M_{эм\,t}$ в соответствии с (2.18) содержит низкочастотную (f_1-f_2) и высокочастотную (f_1+f_2) слагающие. Постоянная слагающая момента отсутствует. Наличие переменной слагающей момента может привести к вибрации контактов реле.

3. Индукционная система по принципу действия обеспечнвает в рассматриваемом выполнении сравнение по фазе двух сформированных величин H_1 и H_2, характеризуемых токами i_1 и i_2 (потокамн Φ_{1t} и Φ_{2t}). В идеальном случае система срабатывает, если $0°\leqslant\gamma\leqslant180°$.

4. Постоянные составляющие токов i_1 и i_2 могут оказывать слабое влияние на индукционную систему, а высшие гармоники в общем случае — повышенное.

5. Использование многопоточных четырехполюсных и особенно восьмиполюсных индукционных систем дает возможность создания реле с числом $M_{эм\,t}$, бо́льшим двух, и таким образом расширяет возможности создания измерительных реле, удовлетворяющих самым различиым требованиям.

6. Обеспечивая малый угол поворота барабана при срабатывании, удается создавать реле с временами срабатывания, примерно равными одному периоду.

У индукционных систем с подвижным элементом в виде диска два магнитных потока, сдвинутых пространственно и во времени, часто образуются путем расщепления полюсов одного электромагнита на две части, на одну из которых насаживаются короткозамкнутые витки в виде медных колец. Системы с диском обычно используются для более простых реле с одной воздействующей величиной, которые работают с выдержкой времени.

Мощности, потребляемые электромеханическими реле, относят к номинальным условиям или условиям срабатывания. Для логических реле условия срабатывания обычно соответствуют примерно номинальным. Поэтому для них мощности потребления даются для номинальных условий. Для измерительных реле характерной является мощность, потребляемая в условиях срабатывания, которая обычно отличается от иоминальной.

Для реле с одной обмоткой (например, измерительного реле тока, питаемого током одного TA) мощность в условиях срабатывания $S_{ср}$ определяется значением электромагнитного момента $M_{эм,с}$; последний для электромагнитных и индукционных систем пропорционален квадрату МДС $F_с^2=w^2I_{ср}^2$. Поэтому $S_{ср}=k_zF_с^2$.

Для реле с двумя обмотками с разными токами I_1 и I_2 (ин… ониая система) условие срабатывания определяется произведени… ков I_1 и I_2, создающих пропорциональные им МДС F_1 и F_2. Мощ… потребляемые обмотками в условиях срабатывания, S_1 и S_2 проп… циальны квадратам соответствующих МДС. Поэтому срабатывани… сматриваемого реле характеризуется соотношением $S_{c1}S_{c2}=kF_{c1}^2$ … $\approx$ const.

В соответствии с этим можно перераспределить мощности … требляемые цепями двух обмоток, изменяя их МДС.

Осуществление логической части защит, логических реле, исполнительных и сигнальных органов на электромеханической базе. Для выполнения логической части защит, а также функций исполнительного органа могут использоваться контакты измерительных реле. Иногда, в особенности для последних целей, применяются специальные логические реле на более для этого подходящем электромагнитном принципе.

Специальные логические реле, обычно называемые промежуточными, бывают необходимы для размножения контактов измерительных реле (последние обычно выполняются с одним, максимум с двумя контактами), усиления мощности передаваемых сигналов измерительных реле (особенно необходимо для действия на электромагниты отключения выключателей защищаемого элемента, потребление которых может достигнуть нескольких киловатт), гальванической развязки цепей логической части и цепей отключения и т. д.

Для создания задержек (если они требуются в логических реле) применяются дополнительные контуры RC к обмоткам или дополнительные короткозамкнутые обмотки, надеваемые на магнитопровод реле (часто с якорем в виде клапана).

К специальным логическим реле относятся также указательные реле, предназначенные для указания срабатывания защиты или ее отдельных частей и органов.

Для создания реле времени используются электромагнитный пусковой механизм с замедляющим маятниковым устройством или специальные микродвигатели переменного тока. Контакт реле обычно состоит из неподвижного и подвижного элементов. Требуются многие разновидности контактов: замыкающие, размыкающие и др. Принятые условные изображения разных типов контактов приведены в табл. В. 1. Согласно ГОСТ на контакты закреплено отнесение видов контактов к условиям перехода реле из начального состояния в конечное; это отвечает распространенному на практике понятию начального нахождения реле в обесточенном состоянии. Необходимо подчеркнуть, что на схемах указывается только вид контакта; его возможные положения в условиях работы защиты изображены быть не могут.

Три классические логические операции ИЛИ ($y=x_1+x_2+x_3$), И ($y=x_1\cdot x_2\cdot x_3$) и НЕ ($y=\bar{x}$) с добавлением задержек и элементов выдержки времени (реле времени) дают возможность выполнения логической части любой защиты.

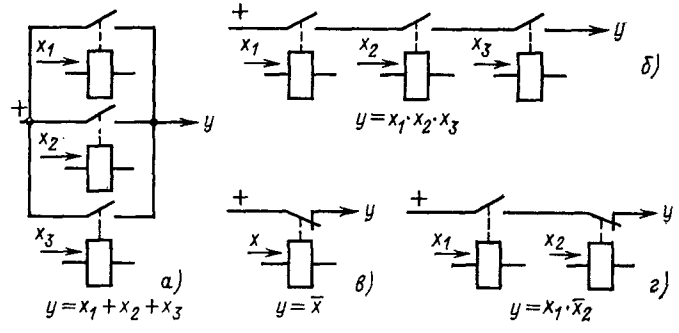


Рис. 2.6. Реализация логических операций на контактах электромеханических реле

На рис. 2.6, $а-г$ приведено выполнение указанных логических операций, а также часто встречающейся операции ЗАПРЕТ ($y=x_1\cdot\bar{x}_2$) на контактах реле. Для операций ИЛИ и И использованы замыкающие контакты, для операции НЕ — размыкающий, для операции ЗАПРЕТ — замыкающий и размыкающий.

Некоторые электромагнитные реле используются при осуществлении защит и на других элементных базах. Так, например, защиты на полупроводниковой элементной базе часто имеют выходные органы в виде промежуточных электромагнитных реле с контактами, способными коммутировать большие мощности цепей отключения; для гальванической развязки в логической части этих защит применяют *герконовые реле* — специальную разновидность электромагнитных реле с магнитоуправляемым контактом.

Общая оценка использования электромеханической базы для осуществления релейной защиты. На рассмотренной электромеханической элементной базе, реализуемой в виде электромеханических реле, могут быть осуществлены все функциональные части, органы и элементы защиты. Реле на этой базе пока широко используется на практике и, очевидно, будет еще применяться и далее для осуществления простейших защит в системах электроснабжения потребителей, когда нет необходимости в применении защит на полупроводниковой и микропроцессорной базах.

Недостатками электромеханических реле являются:

обычно большие мощности, потребляемые от первичных измерительных преобразователей (*TA* и *TV*), что обусловливает как большие габариты самих электромеханических реле, так и необходимость применения *TA* и *TV* большей мощности;

наличие подвижных элементов в магнитных системах и контактов, обусловливающих соответствующие требования к эксплуатации, ограничивающих сроки работы реле без проведения восстановительных работ и влияющих на надежность функционирования защит;

относительно низкая вибростойкость измерительных и некоторых логических органов, например выдержки времени.

2.5. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ (МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ) ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Общие свойства. Полупроводниковая элементная база может использоваться для осуществления всех функциональных частей и органов защиты. Ее внешней отличительной особенностью является отсутствие подвижных элемеитов и контактов.

Полупроводниковая технология в последние десятилетия быстро развивается, и для выполнения как измерительной, так и логической части защиты появляются все новые возможности. Была также рассмотрена возможность осуществления измерительных органов с использованием специфического явления, открытого в 1979 г. и получившего названия «эффект Холла». Разработанные в СССР (В. К. Сиротко) на его основе органы по своим принципиальным свойствам аналогичны индукционным системам с цилиндрическим ротором. Однако несмотря на некоторые достоинства в релейной защите они не получили применения. Большое значение при применении полупроводниковых схем придается реализации логической части, так как измерительные органы в современных исполнениях не имеют контактов, которые могли бы осуществлять логические операции. Первыми начали использоваться для защит диодные схемы сравнения. За ними появились диодно-транзисторные и транзисторные защиты, но они не полностью оправдали возлагавшиеся на них надежды в части потребляемых мощностей от первичных измерительных преобразователей и надежности. Положение существенно изменилось при внедрении в релестроении интегральной микроэлектроники, совершенствование которой относится к 60-м годам.

Интегральные микросхемы (ИМС) представляют собой микроэлектронные изделия, выполняющие определенные функции преобразования и обработки сигналов и имеющие высокую плотность «упаковки» электрически соединенных элементов в кристалле.

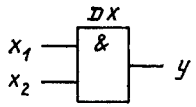
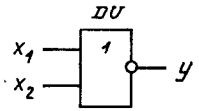
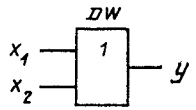
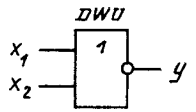
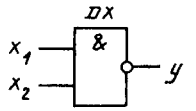
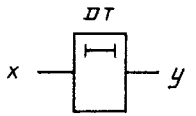
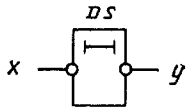
В зависимости от функционального назначения интегральные схемы делятся на две основные категории — аналоговые и цифровые.

Аналоговые микросхемы предназначены для преобразования и обработки непрерывных сигналов. Примером аналоговой схемы являются *операционные усилители*, в настоящее время широко используемые в измерительных органах релейной защиты. *Цифровые микросхемы* предназначены для преобразования и обработки сигналов, выраженных в двоичном или другом цифровом коде. Операции с двоичным кодом описываются рассмотренными выше соотношениями алгебры логики. Поэтому иногда цифровые микросхемы для выполнения простейших логических операций именуются логическими микросхемами. Цифровые схемы используются, в частности, для осуществления логической части современных устройств релейной защиты, выполненных на базе интегральной микроэлектроники. Принятые условные изображения различных типов логических элементов приведены в табл. 2.1.

Использование операционных усилителей. Аналоговые микросхемы, как правило, в интегральном исполнении, предназначены для обработки непрерывных сигналов, изменяющихся во времени по различным законам. Из этого класса ИМС наиболее важными являются операционные усилители, предоставляющие широкие возможности их использования в устройствах релейной защиты.

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой

Таблица 2.1

Функции некоторых логических элементов	Графические изображения элементов
И	
НЕ	
ИЛИ	
ИЛИ — НЕ	
ЗАПРЕТ	
Задержка на срабатывание	
Задержка на возврат	

транзисторный усилитель с большим ($k = 10^4 \div 10^5$) коэффициентом усиления, большим входным ($R_{вх} = 10^5 \div 10^6$ Ом) и малым выходным ($R_{вых} = 10 \div 10^2$ Ом) сопротивлениями, малыми (10^{-6}—10^{-7} А) входными токами, с частотным диапазоном от 0 до 10^5—10^6 Гц, малыми шумами и дрейфом.

Операционный усилитель содержит несколько десятков транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов, при помощи особой технологии отделенных друг от друга изоляционными слоями и соединенных по заданной схеме на одной полупроводниковой пластине площадью от 1 до 10 мм². Он питается от двух источников питания $E_п$ (рис. 2.7) противоположной полярности (обычно ±15 В) с общей нулевой шинкой (0), от которой отсчитываются входные и выходные напряжения. Он имеет два входа и обычно один выход и производит усиление напряжения $u_{вх}$, приложенного между входами усилителя, а если один из них подключен к общей шинке, то усиление напряжения по отношению к общей шинке (далее без специальных оговорок просто напряжение).

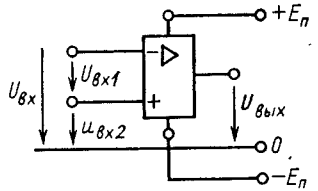


Рис. 2.7. Условное изображение операционного усилителя

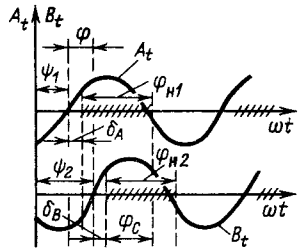


Рис. 2.8. Диаграмма работы ИО со сравнением фаз на времяимпульсной схеме

Один из входов ОУ является инвертирующим, и при подаче на него положительного напряжения (другой вход подключен к общей шинке) выходное напряжение отрицательно и наоборот (часто И-вход, обозначается на схеме знаком «—»). Второй вход ОУ является неинвертирующим (инвертирующий вход в этом случае подключен к общей шинке), поскольку для него знак входного и выходного напряжений одинаков (часто Н-вход, обозначается на схеме знаком «+»).

Обычно собственно ОУ потребляет от источников питания не более 0,2 Вт и не более половины этой мощности может быть отдано в нагрузку.

Само понятие «операционный усилитель» связано с первоначальным его применением в аналоговых вычислительных машинах для решения операторных уравнений. При соответствующей отрицательной обратной связи ОУ может вы-

полнять операции алгебраического суммирования, диф
ренцирования, интегрирования и т. д.

В настоящее время выпускается большое количес
ОУ различных типов, которые могут работать в диапаз
температур —60°÷+125 °С и имеют высокую точно
В технике релейной защиты обычно применяются ми
левые стандартные ОУ с комплексом хороших пара
и минимальной себестоимостью в производстве.

Как и любой транзисторный усилитель, ОУ мож
пользоваться в линейном режиме, когда выходное и
ное напряжения связаны определенной непрерывной
симостью, и в ключевом режиме, когда при заданно
чении входного напряжения выходное скачкообразно
няется от максимального положительного до максим
го отрицательного или наоборот.

Для реализации этих режимов ОУ используется
мах с цепями отрицательной или положительной обр
связи, а в некоторых случаях — без этих цепей. Под
обратной связи понимается двухполюсник или четы
люсник, преимущественно из пассивных элементов, ко
передает часть выходного напряжения (тока) ОУ
входные цепи. Под отрицательной обратной связью (
понимается такая связь, которая стремится умен
входное напряжение, вызвавшее увеличение выходно
пряжения. Положительная обратная связь (ПОС) на
лена на увеличение входного напряжения, вызвавше
личение выходного напряжения. Обратная связь тем
ше, чем большая часть выходного напряжения (ток
дается во входные цепи.

Схемы с ООС обычно предполагают использовани
в линейном режиме, схемы с ПОС или без обратной
используют ОУ либо в ключевом режиме, либо в ре
генератора периодических колебаний.

Помимо входных цепей и цепей обратной связи
ряде случаев дополняется корректирующими RC-це
включенными между предусмотренными для этого вы
ми схемы ОУ, которые предупреждают его самовозбуж
ние (генерацию), т. е. самопроизвольное (вне зависимост
от входных сигналов) генерирование периодического вы
ходного напряжения.

Для большинства схем, где используются современные ОУ, их входные токи могут считаться пренебрежимо малыми, входное сопротивление — бесконечно большим, а выходное — бесконечно малым по сравнению с сопротивлением внешних резисторов; коэффициент усиления также может считаться бесконечно большим.

Это позволяет при анализе схем с применением ОУ использовать понятие идеального ОУ, имеющего $k=\infty$, $R_{вх}=\infty$ и $R_{вых}=0$. Если идеальный ОУ работает в линейном режиме, то в схеме автоматически и практически безынерционно устанавливается режим с таким соотношением токов через входные элементы и элементы ООС, что напряжение между входами ОУ равно нулю. Если ОУ работает в ключевом режиме, то считается, что для его переключения достаточно бесконечно малого напряжения соответствующего знака. Для упрощения ОУ показан без цепей коррекции и обратной связи.

Использование логических интегральных микросхем. Логические ИМС работают при двух дискретных значениях входных и выходных сигналов, отсчитываемых от общей (отрицательной) шинки питания, — низкого уровня, составляющего малую долю напряжения питания ИМС и называемого условно нулевым сигналом (уровнем), и высокого уровня, близкого к напряжению питания и называемого условно единичным сигналом.

Промышленностью выпускаются различные типы логических ИМС, каждая из которых имеет преимущественную область применения.

На логических ИМС выполняются как все виды логических операций, так и различные элементы задержки при действии или отпускании (на единицы и десятки миллисекунд), от которых не требуется высокой точности.

В сочетании с операционными усилителями на ИМС выполняются также органы выдержки времени с нормируемым временем, например с мостовой схемой, имеющей времязадающую активно-емкостную цепь; в первоначальном виде такой орган был разработан в СРЗиУ ТЭП (Ю. А. Гаевенко).

Общая оценка устройств релейной защиты, выполненных на ИМС. Использование ОУ и логических элементов на ИМС позволяет создавать все современные устройства релейной защиты. Последние по сравнению с устройствами защиты на электромеханических реле более технически совершенны, имеют меньшие габариты.

Интегральная микроэлектроника предоставляет, в частности, дополнительные возможности для создания разнообразных схем сравнения (СС). Одна из первых попыток систематизации таких схем была предпринята О. В. Лебе-

девым (ИЭИ) при двух воздействующих величинах для СС по фазе с широко используемыми теперь косвенными признаками относительного расхождения фаз. Обычно применяется при этом *времяимпульсный* способ, заключающийся в следующем (рис. 2.8). Сигнал на выходе устройства при его срабатывании появляется при угле совпадения $\varphi_c=\omega t_c$ областей $\varphi_{н1}=\omega t_{н1}$ и $\varphi_{н2}=\omega t_{н2}$, большем заданного угла $\varphi_{гр}=\omega t_{гр}$ ($\varphi_c \geqslant \varphi_{гр}$), т. е. $t_c > t_{гр}$.

Таким образом, для сравнения требуется некоторое, обычно весьма небольшое время $t_{гр}$, составляющее долю периода. Устройства, выявляющие момент срабатывания, называются *нуль-органами*. Они выполняются на ОУ без обратной связи, переключаясь от весьма малого мгновенного значения входного напряжения, причем соответствующего знака (обеспечивается направленность действия). Необходимо отметить, что времяимпульсный способ получил распространение и для СС с одной H, сравниваемой с $H_{зад}$.

Сочетанием конструктивных мероприятий и методов контрольных испытаний, принятых в международной практике, удается обеспечивать устойчивость защиты к импульсным перенапряжениям и помехам. Использование усилительных свойств ОУ позволяет существенно снизить потребление от первичных *ТА* и *TV*. Однако при этом имеются ограничения, обусловленные тем, что в воспринимающей части ИО необходимо применение изолирующих и согласующих *ТА* и *TV*, их мощности намагничивания бывают на 2—3 порядка выше мощности, необходимой для управления схемами формирования и сравнения.

В устройствах, выполненных на ИМС, более просто, чем в электромеханических устройствах, осуществлять непрерывный, тестовый или диагностический контроль. Это в ряде случаев позволяет упростить обслуживание и эксплуатацию устройств релейной защиты, повысить их надежность.

Основными недостатками устройств релейной защиты на ИМС являются пока достаточно большое количество разнотипных узлов и блоков, необходимых для выполнения различных функций защиты, и значительное количество элементов схем из-за сравнительно небольшой степени интеграции в ОУ и логических ИМС.

2.6. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Общие вопросы. Функционирование измерительной и логической частей защиты, как было показано выше, математически может быть представлено системой аналитических соотношений — их алгоритмами. Это позволяет рассматривать органы защиты как систему арифметико-логического преобразования информации, содержащейся в воздействующих и вспомогательных величинах, которая может быть представлена в цифровом виде. В рассматриваемом случае выполнение органов и защиты в целом осуществляется цифровой вычислительной машиной (ЭВМ) и алгоритмы их функционирования задаются программами, хранимыми в запоминающем устройстве ЭВМ. Программа определяет очередность и вид выполняемых в соответствии с алгоритмом операций. Для изменения алгоритма достаточно заменить программу, сохраняя при этом все элементы ЭВМ и связи между ними. Это является существенным преимуществом микропроцессорной элементной базы. Выполняемые таким образом защиты предложено называть *программными*.

Первые варианты программных защит были выполнены в конце 60-х годов. В СССР разработки программных защит были начаты во ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд, Л. С. Зисман), в МЭИ (В. Г. Дорогунцев, В. В. Бабыкин), Коми филиале АН СССР (Н. А. Манов, М. И. Успенский) и в ЭСП.

При этом необходимо отметить, что в МЭИ с самого начала было решено базироваться на выделении из воздействующих величин переходных процессов при КЗ на линиях слагающих промышленной частоты, что в дальнейшем стало широко использоваться. Теперь в МЭИ работы выполняются под руководством В. П. Морозкина (В. Н. Новеллой, Ю. А. Барабановым и др.). В настоящее время работы в рассматриваемых направлениях развиваются и в ряде других организаций (например, под руководством Б. С. Стогния в ИЭД АН УССР).

Ниже основное внимание уделено особенностям выполнения программных защит, реализуемых на ЭВМ специального вида — микроЭВМ или многопроцессорных системах, основным элементом которых является микропроцессор. Под последним обычно понимают универсальную цифровую интегральную микросхему большой степени интеграции с программируемой логикой или функцией.

Упрощенная структурная схема программной защиты приведена на рис. 2.9, *а*. Вся обработка информации по алгоритмам защиты осуществляется микроЭВМ, которая выполняет операции над величинами, значения которых представлены в цифровом виде. Поэтому необходимы соответствующие устройства: аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, осуществляющие согласование формы представления сигналов в микроЭВМ и во внешних по отношению к ней устройствах:

измерительных преобразователях (ИП) тока и напряжения и ис тельных органах защиты. В соответствии с существующими опр ниями аналого-цифровые преобразователи следует отнести к рующей части измерительных органов. В результате выпо алгоритмов релейной защиты вырабатывается признак о ее сра нии или несрабатывании, который через цифроаналоговые пре вателн поступает из микроЭВМ в виде управляющих сигналов полнительные органы защиты. Существенным является то, что а мы выполняются в реальном масштабе времени.

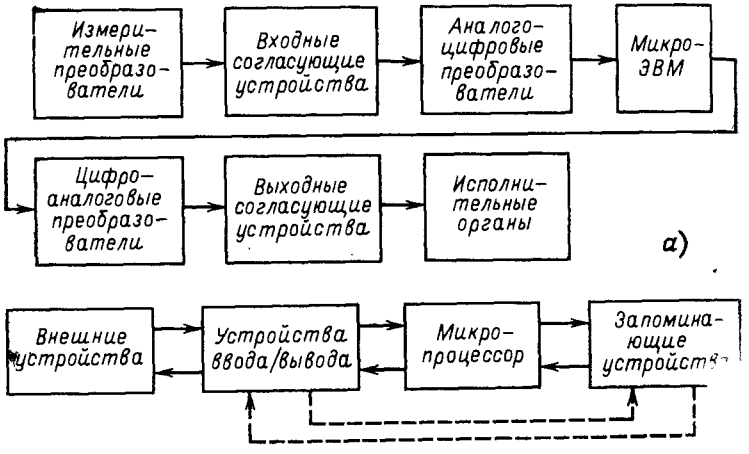


Рис. 2.9. Структурная схема программной защиты (*а*) и упрощ структурная схема микроЭВМ (*б*)

Представление информации в микроЭВМ. В микроЭВМ информация о значениях обрабатываемых данных и командах программ представлена в двоичных кодах. В двоичной системе счисления возможны только две цифры — 0 и 1. При записи программ и данных осуществляется перевод чисел, обычно представленных в традиционной десятичной системе счисления, в двоичную и обратно. Удобно для перевода использование таблицы весов, которая для двоичной системы счисления имеет вид... $2^4 2^3 2^2 2^1 2^0$, $2^{-1} 2^{-2} 2^{-3} 2^{-4}$... Значимость каждой позиции, что то же самое, разряда в числе определяется его весом. Например, десятичному числу 25 в двоичной системе соответствует число 11001, обратно — двоичному числу 11001 соответствует десятичное число $1\times2^4+1\times2^3+0\times2^2+0\times2^1+1\times2^0=25$.

В вычислительной технике используют понятия бит, байт, машинное слово (ниже просто слово), массив. Под битом понимают двоичный разряд. В приведенном примере число 11001 содержит 5 бит. Восемь двоичных разрядов образуют байт. Указанная выше информация хранится в имеющихся в микроЭВМ регистрах и ячейках. Число разрядов в них (длина разрядной сетки) кратно восьми, т. е. имеет побайтную структуру. Полное число разрядов в разрядной сетке образует слово. Массив — это несколько слов.

В микроЭВМ выполняются операции над цифровыми данными, представленными числами с фиксированной или с плавающей запятой. При представлении чисел с фиксированной запятой обычно старший (крайний слева) раздел слова отводится для записи знака числа, остальные — для записи самого числа. Множество чисел ограничено длиной разрядной сетки. Например, при 8-разрядной сетке можно представить числа от $-2^7=-128$ до $+2^7-1=+127$ (положительных чисел на одно меньше с учетом записи нуля). Вследствие этого возможны большие погрешности в представлении чисел, значительно отличающихся от некоторого среднего уровня. Например, число, записанное в двоичном коде как 1100000011, что соответствует десятичному числу 1539, при размещении в 8-разрядной сетке младших разрядов за счет потери двух старших разрядов будет представлено как 00000011, что соответствует десятичному числу 3.

Числа с плавающей запятой состоят из мантиссы (числовая часть) и порядка числа, определяющего вес разрядов мантиссы. Порядок определяется так, что первая цифра в мантиссе значащая. Например, в десятичной системе счисления число 0,00273 будет представлено как $0{,}273\cdot10^{-2}$, а число 175 — как $0{,}175\cdot10^{3}$. Одна часть слова отводится для записи мантиссы, другая — для записи порядка, при этом по одному (обычно старшему) разряду в обеих частях отводится для записи знака мантиссы и порядка. Представление чисел с плавающей запятой позволяет значительно расширить допустимый диапазон их изменения. Следует, однако, отметить, что микроЭВМ ориентирована обычно на выполнение арифметических операций над числами с фиксированной запятой. При этом операции над числами с плавающей запятой выполняются по специальным подпрограммам, включающим ряд дополнительных преобразований, что увеличивает время их выполнения.

Структура микроЭВМ. Различные модификации микроЭВМ могут иметь значительные различия в конструктивном исполнении, что обусловлено их функциональным назначением, возможностями, технологией изготовления и другими причинами. Вместе с тем можно выделить некоторые общие функции, выполняемые всеми микроЭВМ независимо от их исполнения, а также соответствующую им структурную схему (рис. 2.9, *б*). Стрелками на рис. 2.9 указано направление передачи информации между элементами микроЭВМ.

Микропроцессор (МП) предназначен для выполнения арифметических и логических операций над поступающими на его вход данными

в соответствии с заданной программой вычислений, хранимой в запоминающем устройстве. Микропроцессор может выполнять арифметические операции типа сложения, вычитания, умножения, деления; логические операции типа конъюнкции, дизъюнкции, инверсии и т. д. Реализация той или иной операции осуществляется путем последовательного выполнения ряда элементарных команд. Они обеспечивают поступление в МП данных, над которыми должна выполняться операция, собственно исполнение требуемой операции и выдачу полученного результата во внешние по отношению к МП устройства (устройства ввода/вывода, запоминающие устройства). Набор выполняемых МП команд в различных модификациях микроЭВМ задается при конструировании ЭВМ.

Основными элемеитами МП являются арифметико-логическое устройство, в котором собственно и выполняются операции над данными, а также разного рода регистры, используемые для хранения информации о значениях величин, над которыми необходимо выполнение тех или иных операций (команд) в данный момент, о виде очередной выполняемой операции, а также некоторая вспомогательная информация.

Микропроцессор содержит в качестве составных элементов достаточно простые типовые элементы ограниченной номенклатуры, предназначенные для обработки сигналов, принимающих всего два возможных значения — 0 или 1: разного рода триггеры, логические элементы И, ИЛИ, инверторы и т. д. (в некоторых специальных случаях используют логические элементы с тремя состояниями). Возможность такого построения МП обусловлена тем, что информация, поступающая в него для хранения и обработки, представлена двоичнымн кодами, в которых каждому биту соответствует сигнал 0 или 1. При помощи комбинаций типовых элементов выполняются все узлы МП. Например, регистр для хранения слова длиной n бит выполняется на n триггерах.

Функционирование МП, организация его взаимодействия с другими частями микроЭВМ осуществляется специальным устройством управления. В большинстве случаев устройство управления конструктивно входит в состав МП, иногда оно оформлено в виде самостоятельного блока. В устройство управления введеи генератор тактовых импульсов высокой частоты, по сигналу которого разрешаются изменения состояния любых логнческих элементов МП, чем достигается синхронизация работы всех его элементов, а также виешних устройств.

Запоминающие устройства (ЗУ) предназначены для хранения программ расчетов по алгоритмам защиты, а также нтоговых и необходимых в процессе вычисления промежуточных результатов расчетов.

Запоминающие устройства состоят из ячеек, в каждую из которых может быть записано одно слово. Число ячеек (объем ЗУ) иногда достигает десятков и сотен тысяч. Каждая ячейка (иногда их группа) имеет свой адрес, по которому обеспечивается обращение к ней МП для записи или считываиия информации. Одна микроЭВМ может содержать несколько независимых ЗУ различного исполнения и назиачеиия. Допускается наращивание в иекоторых пределах ЗУ до нужного в каждом конкретном случае объема путем подключения дополнительиых блоков ЗУ. При заданных алгоритмах реализуемых защит нетрудно подсчитать необходимый объем ЗУ.

По назначению различают оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) и внешиие ЗУ. Оперативные ЗУ являются осиовным видом памяти и применяются во всех типах микроЭВМ. Они имеют непосредственную связь с МП, что обеспечивает высокую скорость записи и считывания информации при обращении МП к ОЗУ. Как правило, ОЗУ имеют небольшой объем. Внешние ЗУ предназначены для хранения больших массивов информации, не разместившихся в ОЗУ: библиотек программ, массивов данных и т. д. Внешние ЗУ выполняются на магнитных лентах, дисках, барабанах. Запись и считывание информации осуществляется через специальные интерфейсные устройства массивами, содержащими сотни слов. Обращение к внешним ЗУ занимает много больше времени, чем обращение к ОЗУ, но они значительно дешевле и имеют больший объем. В микроЭВМ, осуществляющих функции релейной защиты, использование внешних ЗУ в силу их инерционности и небольшого объема программ защиты ограничено.

По выполнению ОЗУ делятся на запоминающие устройства с произвольной выборкой (ЗУПВ), постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и перепрограммируемые запоминающие устройства (ППЗУ). Микросхемы ЗУПВ выполняются обычно полупроводниковыми. Для хранения каждого бита информации используется триггерный элемент (биполярная логика) либо металлоокисный транзистор (МОП-логика). Некоторые разновидности ЗУПВ используют конденсаторные ячейки, информация в которые записывается путем заряда конденсаторов. Запоминающие устройства с произвольной выборкой допускают в произвольный момент времени как запись, так и считывание информации. Информация хранится в таком ЗУ до тех пор, пока оно подключено к источнику питания, отключение которого приводит к потере содержимого ячеек. В ПЗУ и ППЗУ возможно в процессе счета только считывание информации. Запись в ПЗУ допускается только однократная и выполняется обычно в процессе изготовления, например путем пережигаиия соответствующих связей в диодной матрице. В отличие от ПЗУ перепрограммируемые ЗУ допускают несколько циклов перезаписи информацин с использованием специального оборудования, например обработкой ППЗУ электромагнитным излучением для инжекции зарядов в окисную ловушку иад входной областью МОП-транзисторов, образующих матрицу. По сравнению с ЗУПВ постоянные и перепрограммируемые ЗУ имеют то преимущество, что записанная в них информация не теряется при потере питания. Кроме того, они дешевле и имеют больший объем в одиой микросхеме интегрального выполне-

ния. Их использование целесообразно для хранения неизменной информации, такой как программы релейной защиты. При этом изменяющиеся данные: промежуточные и итоговые результаты расчетов, исходные данные для расчетов (текущие значения токов, напряжения) — хранятся в ЗУПВ. Такая организация памяти данных и программ позволяет после восстановления прерванного питания микроЭВМ автоматически возобновить счет по программам релейной защиты, начиная с некоторого начального шага, заключающегося, например, в сборе исходных данных для расчета.

Устройства ввода/вывода служат для организации обмена информацией между МП и внешними устройствами. В некоторых модификациях микроЭВМ возможен непосредственный обмен через устройства ввода/вывода между запоминающими и внешними устройствами — прямой доступ к памяти (изображено на рис. 2.9, *б* пунктиром). Состав внешних устройств достаточно разнообразен. При реализации защиты это прежде всего ИП тока и напряжения защищаемых элементов с аналого-цифровыми преобразователями, исполнительные органы защиты с цифроаналоговыми преобразователями, а также алфавитно-цифровые печатающие устройства и экранные пульты (дисплеи), служащие для отображения информации и регистрации функционирования защит.

Программирование и отладка программ. Алгоритмы, выполняемые микроЭВМ, записываются в виде программ. Для их записи используются языки программирования. Языки включают набор символов (алфавит) и правила образования из них тех или иных конструкций (фраз), указывающих, какие операции и над какими данными необходимо выполнять.

Существует, как известно, значительное число языков программирования, ориентированных на разные области использования. Особо следует остановиться на машинно-ориентированных языках, учитывающих структуру вычислительной машины, что позволяет иметь более оптимальные программы. Типичным представителем этой группы является язык АССЕМБЛЕР. Программирование на таких языках является более сложным и трудоемким процессом, требует от программиста более высокой квалификации. Однако разработку программ релейной защиты целесообразно все же проводить на машинно-ориентированных языках. Это определяется:

относительной простотой и малым объемом программ, реализующих отдельные органы защиты, в связи с чем сложность программирования проявляется в меньшей степени;

стабильностью программ, которые разрабатываются однажды при реализации органов защиты и практически не меняются на значительных периодах ее эксплуатации;

возможностью разработки программ, близких к оптимальным по времени выполнения и объему, что важно для релейной защиты, особенно для алгоритмов измерительных органов быстродействующих защит.

Программа, записанная на языке программирования, переводится (транслируется) на машинный язык, непосредственно воспринимаемый микроЭВМ.

Особенности выполнения программных защит. При выполнении программных защит из-за специфичности элементной базы приходится многие вопросы реализации решать иначе, чем при электромеханической и полупроводниковой базах. Возникает и ряд дополнительных задач [16]. В частности, необходимо обращать внимание на следующее: 1) требуется более четкое и исчерпывающее описание алгоритмов функционирования, так как они являются единственным путем учета реальных физических процессов, происходящих в ИО; 2) Ψ-функции, характеризующие формирование величин, записываются для дискретных моментов времени и должны содержать только арифметические операции; 3) должно обращаться внимание на снижение погрешностей, обусловленных погрешностями квантования значений входных величин, а также округлением результатов расчета, вследствие ограниченной длины разрядной сетки, используемой для записи чисел; 4) для ИО, реагирующих на основную слагающую промышленной частоты, для быстродействующих защит обычно необходима частотная фильтрация и т. д., представляющая задачу, пока полностью не решенную.

Многопроцессорные вычислительные системы (ВС). Многопроцессорная ВС в отличие от микроЭВМ включает несколько вычислительных элементов, в числе которых могут быть МП с необходимыми дополнительными устройствами, или микроЭВМ, объединенных внутрисистемными каналами связи. Каналы предназначены для обмена информацией между элементами ВС. В системе могут объединяться десятки вычислительных элементов. Иногда указанная многопроцессорная система бывает конструктивно оформлена в одном корпусе и без необходимых оговорок также называется микроЭВМ.

Отдельные вычислительные элементы системы способны проводить параллельную, одновременную обработку информации как по независимым программам, так и по независимым на отдельных участках программы ветвям. Получаемые результаты, необходимые для дальнейшего проведения расчетов, передаются в соответствующие вычислительные элементы по каналам связи.

Объединение вычислительных элементов в систему преследует обычно две цели:

повышение эквивалентной производительности за счет одновременного выполнения параллельных ветвей программы рядом вычислительных элементов;

повышение надежности, которая достигается введением в ВС ре-

зервных элементов, а также перераспределением функций отказавшего элемента между оставшимися работоспособными.

На возможность и целесообразность параллельной обработки информации для повышения производительности было указано еще в начале 50-х годов С. А. Лебедевым. В дальнейшем исследования по созданию ВС были развиты в работах советских ученых Э. В. Евреинова и В. В. Прангишвили. Такие ВС получили распространение и за рубежом. В настоящее время известно большое число многопроцессорных ВС, предназначенных для различных применений и отлнчающихся элементным составом, структурой связей между элементами, организацией вычислительного процесса и т. д.

Работы в области использования многопроцессорных ВС для релейной защиты были начаты в середине 70-х годов в МЭИ (Ю. А. Барабанов и др.) [16, 39]. Они особенно важны для повышения надежности микропроцессорной техники массового (а не специального) изготовления с учетом того, что надежность этой техники кроме общих причин определяется еще и таким специфическим вндом нарушений, как сбои.

Некоторые общие вопросы по использованию микропроцессориой элемеитной базы. Разработка программных защит, реализуемых иа базе микропроцессорной вычислительной техники, является в настоящее время перспективным направлением в области релейной защиты. Преимущества, ожидаемые от использования программных защит, по сравнению с ее аналоговыми реализациями заключаются в возможном повышении технического совершенства защит за счет применения трудно реализуемых в аналоговом варианте алгоритмов, упрощения модернизации и замены алгоритмов защиты, что сокращает сроки внедрения новых решений, в перспективе — в возможности повышения надежного функционирования защиты.

Вместе с тем работы по выполнению программных защит не вышли еще из стадии отдельных разработок и опытной эксплуатации, а выполняемые защиты пока не имеют широкого применения на практике. Это обусловлено, с одной стороны, относительно небольшим периодом проведения работ в рассматриваемой области и отсутствием иа начальном этапе приемлемых для релейной защиты типов вычислительных машин, с другой — сложностью возникающих вопросов, находящихся на стыке различных областей техники. В частности, отсутствуют пока достаточно обоснованные математические методы построения программных ИО защит, теория выбора оптимальных для реализации алгоритмов защит структур ВС, а также другие вопросы, требующие своего разрешения (например, отстройки от разного рода помех).

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные функциональные части защиты.
2. Объясните понятие характеристической величины, области срабатывания и характеристики ИО.
3. Какие существуют элементарные логические операции, что они собой представляют?
4. Что называется коэффициентом возврата ИО и как он может влиять на чувствительиость защиты?
5. Какие преимущества приносят интегральные микросхемы для выполнения устройств релейной защиты по сравнению с электромеханическими реле?

Глава третья

ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИХ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ С НАГРУЗКОЙ

3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Назначение. Наиболее распространенными измерительными преобразователями (ИП) являются электромагнитные трансформаторы тока (*ТА*) и напряжения (*TV*). Имеются и другие их исполнения. По своему назначению *ТА* разделяются на предназначенные для устройств измерений и для релейной защиты, поскольку к точности их работы при различных кратностях первичного тока предъявляются разные требования.

Основным режимом *ТА* для измерений является нормальный рабочий; в пределах изменения рабочих токов должна обеспечиваться необходимая точность трансформации, характеризуемая классом точности. Работа же *ТА* в схемах многих типов релейной защиты происходит в аварийных режимах, когда токи КЗ могут значительно превосходить нормальные рабочие. Иногда, при соответствующем выполнении, вторичные обмотки *ТА* могут одновременно использоваться для обоих случаев применения.

Рассмотренного разделения для *TV* нет, и они могут одновременно применяться для различных видов вторичной нагрузки.

Общие принципы, положенные в основу работы ИП защит. Электромагнитные *ТА* и *TV* являются разновидностя-

ми обычных трансформаторов — индуктивных преобразователей, с помощью которых переменный ток или напряжение преобразуется соответственно в ток (с номинальным значением 5, иногда 1 А) или в напряжение (с номинальным значением 100 В). Поэтому хотя режимы работы *ТА* и *TV* весьма различны, они характеризуются некоторыми общими свойствами трансформаторов.

На рис. 3.1 приведена принципиальная схема выполнения двухобмоточного трансформатора. Его первичная обмотка с током i_1 и числом витков w_1 включается на первичное напряжение *(TV)* или ток *(TA)*. Вторичная обмотка с током i_2 и числом витков w_2 включается на нагрузку. Вторичных обмоток у *TV* может быть несколько, у *ТА* — только одна, так как первый является практически идеальным источником напряжения, а второй — тока.

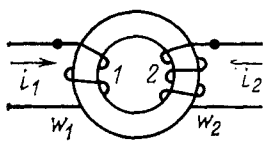


Рис. 3.1. Совершенный трансформатор

Для совершенного трансформатора (замыкание магнитных потоков, определяемых МДС i_1w_1 и i_2w_2, и результирующего магнитного потока Ф только по сердечнику с постоянной магнитной проницаемостью μ) потокосцепление каждой из обмоток представляет функцию токов i_1 и i_2: $\Psi_1=L_{11}i_1+M_{12}i_2$ и $\Psi_2=L_{22}i_2+M_{21}i_1$, где L_{11} и L_{22} — собственные индуктивности обмоток *1* и *2*, определяемые выражениями $L_{11}=[\Psi_1/i_1]_{i_2=0}$ и $L_{22}=[\Psi_2/i_2]_{i_1=0}$, а M_{12} и M_{21} — их взаимные индуктивности, причем $M_{12}=[\Psi_1/i_2]_{i_1=0}$ и $M_{21}=[\Psi_2/i_1]_{i_2=0}$. Для рассматриваемого случая они одинаковы и равны $M=\sqrt{L_{11}L_{22}}$. Индуктивности всегда положительны. Взаимоиндуктивности в зависимости от взаимного направления намотки обмоток *1* и *2* могут иметь разные знаки. При направлении намотки по рисунку и направлении мгновенных токов i_1 и i_2, когда они определяют (по правилу «штопора») вычитающиеся потоки, M отрицательны. Зажимы обмоток, соответствующие указанным условиям, называются одноименными и отмечены на рис. 3.1 точками. Далее они обозначаются соответственно *Н, н* и *К, к*.

Условное изображение рассматриваемого трансформатора приведено на рис. 3.2, *а*. При принятых положительных направлениях величин связь между ними определяется выражениями $u_1=d\Psi_1/dt=L_{11}di_1/dt-Mdi_2/dt$ и $u_2=d\Psi_2/dt=L_{22}di_2/dt-Mdi_1/dt$. Им соответствует удобная для рассмотрения электрическая схема замещения трансформатора на рис. 3.2, *б*.

Непосредственное использование схемы для определения соотношений токов и напряжений неудобно, поэтому все величины в ней приводятся к одной стороне (в технике релейной защиты — обычно вторичной) с помощью коэффициента приведения k: $\underline{U}_1'=\underline{U}_1k$, $\underline{I}_1'=\underline{I}_1/k$, $M'=kM$ и $L_{11}'=k^2L_{11}$. Коэффициент k, вообще говоря, может быть любым, что не подчеркивается обычно в электротехнических курсах. Как правило, его принимают равным отношению чисел витков обмоток w_1/w_2 или w_2/w_1 — при приведении ко

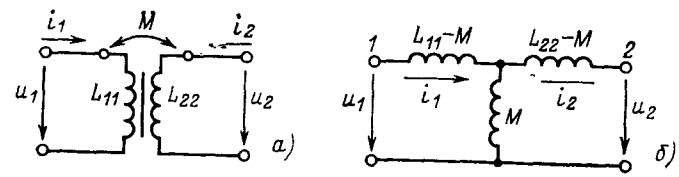


Рис. 3.2. Условное изображение (*а*) и схема замещения (*б*) совершенного трансформатора

вторичной стороне. Для *ТА* принимают $k=w_2/w_1$, и он представляет коэффициент трансформации *ТА*. Рассматривая схему замещения трансформатора как результат использования общей теории пассивного четырехполюсника, получаем (см., например, [16]) те же результаты. Таким образом, реальный трансформатор вне зависимости от реального распределения в нем потоков с учетом того, что они по пути от одной обмотки к другой могут рассеиваться, может быть, не касаясь конкретного его выполнения, представлен рассмотренной схемой при внесении в нее слагающих, учитывающих активное сопротивление обмоток (R_1, R_2) и потери в стали магнитопровода (R_0). В результате расчетная электрическая схема трансформатора при приведении ко вторичной стороне приобретает вид, данный на рис. 3.3.

Необходимо отметить, что часто при рассмотрении работы трансформаторов исходят не из соотношений четырехполюсника, а из теории, разработанной еще в начале 20-х годов Роговским (Германия). Согласно этой теории магнитное поле трансформатора состоит из трех независимых друг от друга потоков — основного, определяемого со-

вокупным действием МДС i_1w_1 и i_2w_2 и сцепленного
ным числом витков w_1 и w_2, и двух потоков рассеяни
ходящих по воздуху и сцепленных соответственн
и w_2. Этим условиям соответствует также Т-образна
ма замещения, только внешне схожая с рассмотренн
ше. В ветвях этой Т-образной схемы фигурируют т
зываемые сопротивления рассеяния, которые в некото
конструкциях оказываются отрицательными. Это сви
тельствует о том, что они представляют не физические
только расчетные величи

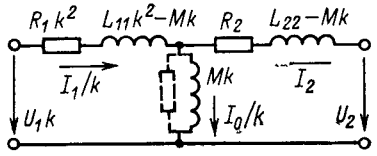


Рис. 3.3. Схема замещения трансформатора

Серьезные работы
правильному учету элект
магнитного рассе
(Э. А. Меерович и др.)
опубликованы еще в
30-х годов. Современ
следования даны в р
ВЗИ (Л. В. Лейтес)
ВНИИЭ (М. Х. Зихе

3.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА И ИХ РАБОТА В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Общие условия. По принципу преобразования тока ИП делятся на электромагнитные, оптико-электронные (см., например, [41]) и некоторые другие. К последним относятся так называемые магнитные и дискретные, обычно на базе магнитных (разрабатывались под руководством В. Е. Казанского [17]). Ниже рассматриваются в основном электромагнитные преобразователи, называемые просто трансформаторами тока.

Расчетное сопротивление в ветви Т-образной схемы замещения с первичной стороны практически не влияет на токи в схеме замещения (рис. 3.3). Поэтому оно из рассмотрения исключается и схема замещения *ТА* с нагрузкой, приведенная ко вторичной обмотке, приобретает Г-образный вид (рис. 3.4, *а*). Величина $L_{2s}=L_{22}-Mw_2/w_1$ с размерностью индуктивности, не имеющая в общем случае явного физического смысла, может иметь в некоторых конструкциях отрицательное значение, но в литературе часто называется индуктивностью рассеяния вторичной обмотки. Трансформаторы тока работают в режимах, близких к КЗ на вторичных зажимах. Поэтому индуктивность нагрузки $L_н$ может быть соизмерима с расчетной L_{2s} и правильное

определение последней может быть существенно для оценки работы *ТА*. Этот режим *ТА* определяет также ненадобность в защите его вторичных цепей от КЗ в них.

Условные положительные направления токов. В технике защиты в отличие от некоторых других областей положительные направления токов в ИП обычно принимаются противоположными (рис. 3.4, *б*): в одной — от *Н* к *К*,

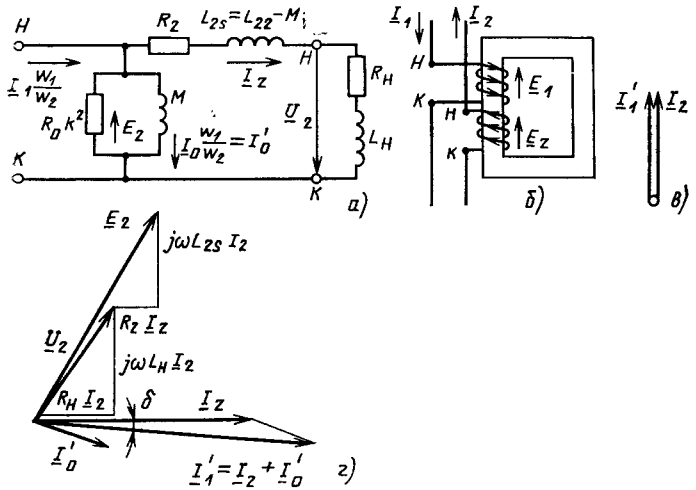


Рис. 3.4. Расчетная схема замещения *ТА* (*а*), принятые условные положительные направления токов (*в*) и их упрощенная векторная диаграмма (*б*), полная векториая диаграмма *ТА* (*г*); на рис. $M'=Mk$

в другой — от *к* к *н*. При этом, пренебрегая намагничивающим током, имеем $\underline{I}_1w_1-\underline{I}_2w_2=0$ и $\underline{I}_2=(w_1/w_2)\underline{I}_1=\underline{I}_1'$, где $\underline{I}_1'$ — это $\underline{I}_1$, приведенный к числу витков w_2. Соответствующая упрощенная диаграмма токов дана на рис. 3.4, *в*. Угол $\widehat{\underline{I}_2\underline{I}_1'}=0°$, $|\underline{I}_2|=|\underline{I}_1'|$, и такой упрощенной диаграммой можно пользоваться как для I_1, так и для I_2, что более компактно, удобно.

Векторная диаграмма *ТА*. Векторные диаграммы строятся для синусоидальных электрических величин и при линейности всех сопротивлений. Однако даже при синусоидальности I_1 вторичные величины за счет нелинейности характеристик намагничивания магнитопроводов *ТА* оказы-

ваются несинусоидальными. Поэтому используется
эквивалентных синусоид, согласно которому действи
ные величины заменяются эквивалентными им по дей
ющему значению, синусоидальными. Необходимо, од
отметить, что при сильных насыщениях магнитопр
этот прием оказывается недопустимо неточным и во ВН
(Я. С. Гельфанд) [9] предложены другие решения воп

Диаграмма на рис. 3.4, *г* может строиться по расч
схеме замещения на рис. 3.4, *а* (предположено, что L
ложительна). Полезны также некоторые соотношени
рис. 3.4, *б* в части ЭДС, наводимых в обмотках [1]. З
ходный принят вектор тока I_2. Отдельные величины
чают следующее: $\underline{U}_2=(R_н+j\omega L_н)\underline{I}_2$ — напряжение н
жимах *нк* вторичной обмотки; $\underline{E}_2=\underline{U}_2+(R_2+j\omega L_2$
ЭДС, индуктируемая во вторичной обмотке и равная
же вектору напряжения на ветви схемы с сопротивле
$j\omega M w_2/w_1$ (для ЭДС принято удобное положительно
правление, противоположное $\underline{I}_1$); $\underline{I}_0'$ — ток, проход
в схеме через параллельно соединенные сопротив
$R_0(w_2/w_1)^2$ и $j\omega M w_2/w_1$; он отстает от E_2 на угол, нес
ко меньший 90°, и определяется выражением $\underline{I}_0'=\underline{I}_1 w_1$
$-\underline{I}_2$; ток $\underline{I}_0'$ принято называть *намагничивающим*, а вет
которой он проходит, — ветвью намагничивания. Таки
разом, при обычно активно-индуктивной нагрузке вт
ный ток немного меньше $\underline{I}_1'$ и опережает его на угол
рактеризующий угловую погрешность *ТА*.

Погрешности работы *ТА*. В соответствии с ГОСТ р
чают токовую, полную и угловую погрешности *ТА*. Эт
грешности принято оценивать для одиночно работак
ТА, что для защиты, включаемой на токи двух или
фаз одного или даже нескольких элементов электро
новки, в общем случае является неточным по ряду пр

При соединении *ТА* в группы считается обязател
определять нагрузки на них с учетом этих соединени

Токовая погрешность f_i определяется арифметич
разностью I_2 и приведенного через номинальный ко
циент трансформации *ТА* $K_{Iном}=I_{1ном}/I_{2ном}$ тока I_1
защиты обычно $K_{Iном}=w_2/w_1$, так как специальных ко
ций, выполняемых при нагрузке в виде измерительных
боров, здесь не осуществляется. Учитывая это, имеем

$$f_i=(I_2-I_1')\,100/I_1'=(I_2 w_2/w_1-I_1)\,100/I_1.$$

При активно-индуктивной нагрузке, как указывалось, I_2 меньше I_1'. Поэтому погрешность оказывается отрицательной. *Полная погрешность* ε определяется геометрической разностью тех же токов:

$$\varepsilon=|\underline{I}_2-\underline{I}_1'|\,100/|\underline{I}_1'|=|\underline{I}_0'|\,100/|\underline{I}_1'|. \qquad (3.2)$$

Полная погрешность ε, таким образом, больше f_i. Для определения ε применяется и более общее выражение (см., например, [16]).

Из векторной диаграммы на рис. 3.4, *г* наглядно видно также, что в течение малой доли периода ток i_2 действует на магнитопровод в том же направлении, что и ток i_1.

Допустимые значения ε, f_i. В настоящее время для оценки точности работы *ТА* в схемах релейной защиты преимущественно используется полная погрешность ε, хотя для ряда защит (максимальных токовых, дистанционных и некоторых других) важна погрешность f_i. Это определялось рядом причин, одной из которых явилось стремление к унификации задаваемых характеристик для *ТА* с учетом того, что ε обычно несколько больше f_i и ее применение дает некоторый запас в расчетах, например, допустимых для *ТА* нагрузок.

Для многих типов защиты (например, ступенчатой токовой) определенная точность работы необходима в первую очередь при токах КЗ, равных параметрам их срабатывания. Для других защит (например, дифференциальных токовых) это могут быть максимальные значения сверхтоков (КЗ, качаний). Считается достаточным иметь в этих режимах $\varepsilon\leqslant 10\,\%$. Для некоторых защит имеет значение и угловая погрешность δ; угол δ при $\varepsilon=10\,\%$ оказывается не превосходящим нескольких градусов, что является приемлемым.

Рассмотренный подход к определению требований к достаточно точной работе *ТА* не исключает возможности их работы со значительно большими погрешностями. Так, например, при близких КЗ со значительными кратностями тока магнитопровод *ТА* защиты может насыщаться и ε превышать 10 %. Такие режимы должны учитываться, с тем чтобы повышенные погрешности не приводили к отказам измерительных органов защиты, для которых устанавливаются обычно экспериментально, максимально допустимые ε или f_i (см., например, [42]).

Кратность первичного тока. Различают *предельную номинальную кратность* $K_{10ном}=|I_{1max}/I_{1ном}|_{\varepsilon=10\%}$; , гаранти-

руемую поставщиком, при которой ε при номинальн нагрузке с cos φ2=0,8 не превосходит 10 %, и просто *пр дельную кратность* K_{10}, отличающуюся от номинальн тем, что она соответствует любой нагрузке. Последняя ш роко используется на практике для определения макс мальных допустимых нагрузок на *ТА*. Соответствующ расчеты производятся по кривым, даваемым, например, з водами-поставщиками при cos φ2=0,8. Примерный вид с ной из таких кривых, которые строятся (начиная с K_{10}, п которых еще не наступила точка перегиба кривой $B_{m\,расч}=f(H)$ при малых H [16]) в логарифмическом масштаб приведен на рис. 3.5. Одна из точек этой кривой принцип

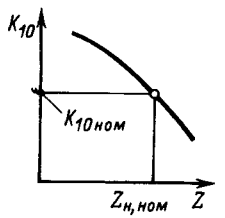


Рис. 3.5. Кривая кратностей $K_{10}=f(Z_н)$ в логарифмическом масштабе

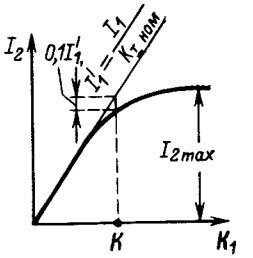


Рис. 3.6. Зависимость $I_2=f(K_1)$

ально должна была бы соответствовать $K_{10ном}$, однак ставщики обычно дают $K_{10ном}$ со значительным зап Необходимо также отметить, что погрешности ε при $=I_{1ном}$ оказываются, как правило, меньшими, чем при дельных кратностях, что для некоторых защит дает во ность выбора меньших значений параметров срабатыв

Зависимость вторичного тока I_2 от кратности перви $K_1=I_1/I_{1ном}$. Примерный вид такой зависимости да рис. 3.6. При небольших кратностях I_2 примерно проп онален I_1. При некотором значении K_1 I_2 оказывается шим I_1' на $f_I=10$ %. Далее скорость нарастания I_2 вс вие насыщения магнитопровода начинает резко умень ся и ток I_2, как говорят, достигает значения I_{2max}. Со ствующая ему индукция насыщения условно приним для электротехнических сталей примерно 2 Тл. Форма вой I_2 при этом оказывается сильно искаженной.

Работа ТА при глубоких насыщениях магнитопровода. Как уже отмечалось выше, использование метода эквивалентных синусоид для анализа работы *ТА* при глубоких насыщениях неэффективно. Используются другие подходы. В СССР работы проводились в НПИ, ИЭД АН УССР, МЭИ, ЭСП (А. Д. Дроздов, И. М. Сирота, В. Е. Казанский и их ученики, Э. М. Либерзон и др.). Основные разработки были связаны с применением разных аппроксимаций кривой намагничивания $B_{max}=f(H)$. Наиболее простым и часто приемлемым является метод, использующий прямоугольные характеристики намагничивания, — метод ПХН, подробно проработанный в [17, 42].

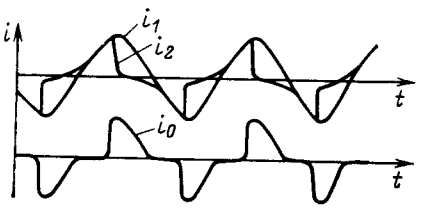


Рис. 3.7. Осциллограммы токов *ТА* при его глубоком насыщении и активной нагрузке

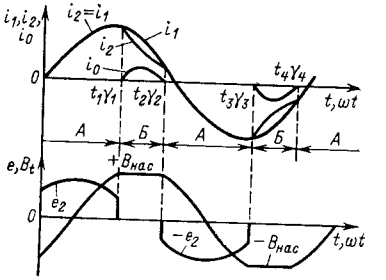


Рис. 3.8. Расчетные зависимости электрических величин при глубоком насыщении *ТА*

Основой для рассматриваемого метода является своеобразный характер изменения мгновенных значений вторичного тока i_2 во времени (например, по рис. 3.7). В каждый полупериод процесс трансформации может быть разбит на участки времени с достаточно точной трансформацией тока и участки, когда трансформация практически отсутствует и ток i_2 близок к нулю. В первом случае индуктивность в ветви схемы замещения велика, во втором мала. Этим условиям и соответствует прямоугольная аппроксимация кривой намагничивания. Пример соответствующих ей расчетных зависимостей электрических величин дан на рис. 3.8. Обращает на себя внимание, что индукция B в магнитопроводе достигает индукции насыщения не немедленно при появлении тока i_1, а через некоторое время, поскольку, как известно, ее мгновенное значение пропорционально площади, ограниченной кривой

ЭДС $e_{2t}(e_{2t} \equiv \int_0^t e_2(t)dt)$. Как было показано разработ
ками метода ПХН, весь процесс во времени при глуб
насыщении можно для данного *ТА* описать при зада
нагрузке и кратности первичного тока K_1, определив
этого отношение $B_{нас}/B_{трасч}$, где $B_{нас}$ — принятое у
ное значение индукции насыщения, а $B_{трасч}$ — расче
максимальное значение индукции в предположении о
ствия насыщения. Этот коэффициент обычно имену
обобщенным параметром ТА и в литературе обознача
через C или A_z. Он имеет значения, меньшие 1; прие
мые результаты для ТА с магнитопроводами из хол
катаной стали получаются при $A_z < 0{,}9 \div 0{,}95$.

При практических расчетах важно определять доп
мое для данных измерительных органов исскажение i
глубоких насыщениях. Оно обычно характеризуется
симально допустимой погрешностью $f_{i\,доп}$ по действу
му значению I_2. В [42] предложено определять f_i при
боких насыщениях, используя обычно известные кр
предельной кратности $K_{10} = |I_{1max}/I_{1ном}|_{\varepsilon=10\%}$.
этом K_{10} корректируют повышающим коэффициентом
$= |I_{1max/нас}|/|I_{1max}|$. В результате получают $K_{max} =$
На рис. 3.9 приведена получающаяся с учетом работ
АН УССР универсальная зависимость $f(A)$ от $f_{i\,нас}$, у
ная для расчетов, но требующая дополнительной
верки.

Практически почти все выпускаемые в настоящее
мя промышленностью электромеханические и полупров

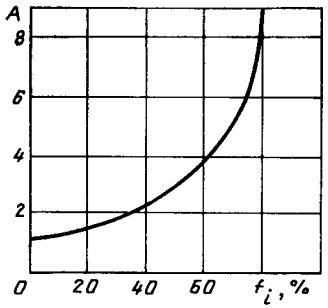


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента A от f_i

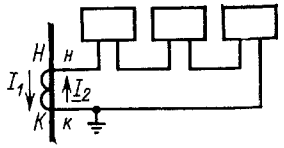


Рис. 3.10. Присоединение нагру
ко вторичной обмотке *ТА*

никовые измерительные органы допускают в дополнительных расчетных режимах работу с $f_{i\,доп} \leqslant 50$ %. В случае, если при известном $f_{i\,доп}$ K_{max}/A оказывается больше K_{10}, за расчетную кратность, например при определении допустимой нагрузки на *ТА*, предлагается принимать не предельную кратность K_{10}, а K_{max}/A.

При рассмотрении влияния насыщения *ТА* на работу ИО защиты учитывается, что кривые i_2, как и i_0, в рассматриваемом установившемся режиме являются периодическими функциями, симметричными относительно оси времени t. Поэтому они, разложенные в ряд Фурье, содержат нечетные гармоники (1, 3, 5 и т. д.).

Функционирование *ТА* в разных условиях работы их вторичной цепи. Фаза защищаемого элемента, в которую последовательно включается первичная обмотка *ТА*, является для последнего, как уже отмечалось, идеальным источником тока. Нагрузка *ТА*, характеризуемая $R_н$ и $L_н$, имеет весьма малое значение по сравнению с индуктивностью Mw_2/w_1 ветви намагничивания (рис. 3.4). В этих условиях *ТА* работает обычно в режиме, близком к режиму КЗ на его вторичных зажимах, и сам может рассматриваться как источник тока, питающий свою нагрузку. Поэтому нагрузки, обычно определяемые сопротивлениями ИО, должны включаться (в отличие от нагрузок на силовые трансформаторы и первичные ИП напряжения) последовательно (рис. 3.10). При размыкании вторичной обмотки весь ток I_1 оказывается намагничивающим. В результате магнитопровод *ТА* может сильно перегреваться, а мгновенные значения напряжения на вторичных зажимах, примерно пропорциональные $\sqrt{I_{m1}}$, могут быть недопустимо большими прежде всего по условиям изоляции вторичных цепей. С учетом изложенного режимы работы *ТА* с разомкнутой вторичной обмоткой являются, как правило, недопустимыми уже при $I_1 = I_{1ном}$, а работа с закороченной обмоткой может рассматриваться как частный случай нормальной работы. Недопустимо высокие U_2 могут появляться иногда также при больших значениях токов КЗ и нагрузок $Z_н$. Это учитывается при определении допустимых значений нагрузок.

По правилам электробезопасности вторичная цепь *ТА* должна заземляться у возможного места пробоя, т. е. у места установки *ТА* (рис. 3.10). Однако иногда допускается как более рациональное заземление вторичной цепи у места установки устройства защиты. Необходимо так-

же отметить, что рассматриваемое заземление никак с ответственно не влияет на появление недопустимых н пряжений на вторичных зажимах, а само может на шаться в системах с глухозаземленными нейтралями п прохождении по нему первичных токов КЗ.

В некоторых случаях, например при оперативнременном токе (см. гл. 4), возникает необходимость чения от *ТА* максимальной мощности вне зависимо возникающей при этом большой погрешности тра мации f_i. Мощность, отдаваемая *ТА*, $S_2=U_2I_2=I_2^2Z$ линейной схеме замещения *ТА* с нагрузкой $Z_н$ макс ная отдаваемая ность достигается, к вестно, при прим равенстве сопроти ветви намагничива вторичной ветви новном $Z_н$). При если углы сопроти одинаковы, $f_i\approx 50$ % нелинейной схеме получается при соотношениях соп лений. Возможные

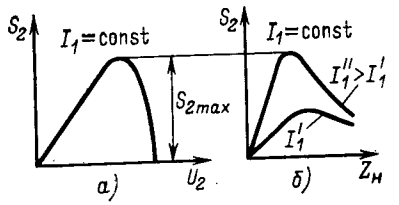


Рис. 3.11. Зависимость мощности S_2, отдаваемой *ТА* при заданном I_1 от U_2 (*а*) и $Z_н$ (*б*)

симости S_2 от $Z_н$ или U_2 при заданном неизменном т приведены на рис. 3.11. Уже при $I_1=I_{1ном}$ мощность S_2 многих исполнений *ТА* может достигать сотен вольт-амп при номинальных мощностях *ТА* в десятки вольт-ампер.

3.3. РАБОТА ИП ТОКА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Устройства основной релейной защиты от КЗ час ботают без выдержки времени. Собственные времен батывания таких защит для быстродействующих нений, применяемых в системах сверхвысоких и у высоких напряжений, обычно не превышают 0,02 держки времени вторых ступеней защит с относит селективностью также бывают весьма небольш обычно не превышают нескольких десятых долей се Поэтому при выполнении защит и питающих их т цепи *ТА* часто оказывается необходимым учитыва никающие при КЗ, а иногда и при разного рода пе чениях не успевшие затухнуть электромагнитные пе ные процессы. Как было рассмотрено в гл. 1, они

теризуются наличием в электрических величинах (токах) кроме основных гармоник с частотой 50 Гц апериодических и затухающих знакопеременных слагающих (не гармоник), характеризуемых условно частотами, большими основной, но часто имеющих слагающие, близкие к последней. Приходится также считаться с переходными процессами, возникающими в самих устройствах защиты. Применительно к работе *ТА* основное внимание было, естественно, уделено влиянию на эту работу апериодических слагающих. Первые существенные исследования в этом направлении были проведены в конце 20-х годов для *ТА* с линейными характеристиками. В дальнейшем они уточнялись, в том числе и отечественными специалистами. В целях упрощения учитывалась только основная гармоника тока и соответствующая ей апериодическая слагающая. В этих условиях при возникновении КЗ аварийная слагающая тока $i_1=I_{m1}\cos(\omega t-\delta)-I_{m1}\cos\delta\exp(-t/T_1)$ или $i_1=i_{1пер}-i_{1а}$, где δ — угол, характеризующий фазу I_1 в момент $t=0$, $I_{m1}\cos\delta$ — начальное значение апериодической слагающей $i_{1а}$, T_1 — ее постоянная времени, определяемая отношением L/R цепи, в которую включен *ТА*. При $\delta=90°$ $i_{1а}$ вообще не возникает и *ТА* работает в ранее рассматривавшихся установившихся режимах. При $\delta=0°$ $i_{1а}$ имеет максимальные значения. Процесс его изменения во времени показан на рис. 3.12, *а*. На рис. 3.12, *б* приведен возможный режим трансформации i_1 и $i_{1а}$ для этого случая, полученный решением соответствующих дифференциальных или операторных уравнений. Его рассмотрение дает возможность сделать следующие выводы:

1. Трансформируются как $i_{1пер}$, так и $i_{1а}$, поскольку второй также изменяется во времени, однако характер этой трансформации для $i_{1а}$ совсем другой, чем для $i_{1пер}$. Ток $i_{1пер}$ распределяется в схеме замещения *ТА*, как известно, обратно пропорционально сопротивлениям $Z=R+j\omega L$, а ток $i_{1а}$ — обратно пропорционально $R-L/T_1$. Чем больше T_1, тем большим оказывается $i_{0а}$. В результате намагничивающие токи i_0 могут во много раз превосходить их значения в установившемся режиме. Особенно плохо $i_{1а}$ трансформируется при многофазных КЗ вблизи шин мощных станций, когда T_1 бывают максимальны, достигая нескольких десятых долей секунды.

2. В контуре схемы замещения в цепи с током i_0 появляется дополнительно свободная апериодическая слагающая $i_{0св,а}$, поскольку в цепи с индуктивностями ток мгновенно

появиться не может. Она затухает с постоянной времени T_2 этого контура и может иметь значения как большие T_1, так и соизмеримые с ним. Это определяет характер изменения во времени результирующего тока i_0. Рисунок 3.12, *б* соответствует случаю $T_2 > T_1$ ($T_1 = 0{,}05$ с, $T_2 = 1$ с). Чем больше T_1 и T_2, тем медленнее затухает переходный процесс. В некоторый момент времени i_0 приобретает максимальное значение.

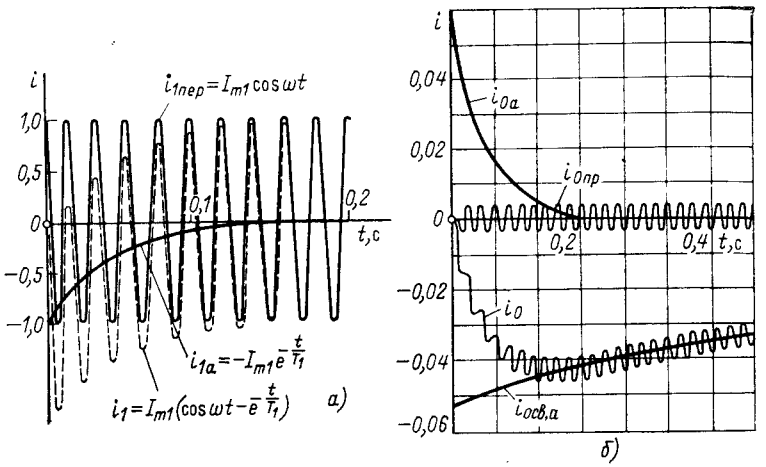


Рис. 3.12. Изменение во времени мгновенных значений токов в *ТА*:
а — первичного тока; *б* — намагничивающего тока

Значительно более сложными являются переходные процессы в *ТА* со стальными магнитопроводами, когда последние при КЗ даже при относительно небольших кратностях тока, содержащего i_{1a}, могут глубоко насыщаться. Первые серьезные исследования в этой области в СССР были проведены в начале 30-х годов в лаборатории им. А. А. Смурова (Н. Н. Поташев и др.). В частности, была показана вероятность существенного влияния на начальные значения i_2 и i_0 остаточного намагничивания магнитопроводов. В дальнейшем эти работы проводились во ВНИИЭ, ИЭД АН УССР и других организациях. Для расчетов применяются разные способы — аппроксимации кривых намагничивания (как и для расчетов установившихся режимов с глубоким насыщением), методы

физического и математического моделирования; в рекомендациях МЭК по расчетам переходных процессов в *ТА* использовался метод наклонных характеристик намагничивания (см., например, [42]). Метод физического моделирования получил развитие в работах ИЭД АН УССР (Б. С. Стогний и др.). Метод математического моделирования, наиболее универсальный, использовался на аналоговых машинах во ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд), в НПИ (Э. В. Подгорный, С. Д. Хлебников и др.) и в БПИ (В. И. Новаш и др.), на цифровых машинах — в МЭИ (К. С. Дмитриев и др.) и других организациях.

В общем случае для переходных режимов могут использоваться примерно те же виды погрешностей ε и f_i, что и для *ТА*, работающих в установившихся режимах. При этом учитывается, что большинство типов релейной защиты предназначается для реагирования на периодические слагающие первичного тока и что эти погрешности будут различными в разные периоды переходного процесса. Угловые погрешности δ могут определяться при этом по основным гармоникам тока.

Возможные пути улучшения работы *ТА* в переходных режимах. Для улучшения работы *ТА* в переходных режимах, что особенно важно для обеспечения эффективной работы быстродействующих защит, предлагался ряд решений. Основным из них, относящимся к собственно *ТА*, является использование в их магнитопроводах немагнитных зазоров с размерами, достаточными для обеспечения характеристики, линейной в пределах возможных значений токов КЗ с учетом их апериодических слагающих. Применение таких зазоров практически устраняет и значительные остаточные индукции. Использование *ТА* с немагнитным зазором в СССР было предложено еще в начале 50-х годов в ТПИ (И. Д. Кутявин). В дальнейшем большой вклад в разработку таких *ТА* внес ИЭД АН УССР (И. М. Сирота, Б. С. Стогний), который довел эти разработки до практической реализации в системах напряжением выше 500 кВ. Использование *ТА* с зазором приводит при заданной вторичной нагрузке к увеличению сечения магнитопроводов. Поэтому их применение более эффективно при относительно небольших нагрузках; такие нагрузки могут обеспечиваться при использовании защит, построенных на микроэлектронной или микропроцессорной элементной базе. При оценке областей применения *ТА* с немагнитным зазором основным остается

вопрос о вероятности появления значительных апери
ческих слагающих, которые могут возникать в цепях с
обладающей индуктивностью только в моменты КЗ с
лыми значениями мгновенных напряжений, что в сист
сверхвысоких напряжений маловероятно. Следует т
отметить выявившиеся затруднения использования
с немагнитным зазором для защит с несколькими гру
ми *ТА* разного типа (с зазором и без зазора). Поэт
рассматриваемый вопрос требует дальнейшего уточне
Возможным путем улучшения работы *ТА* в перехо
режимах является использование быстродействующих
щит, работающих в самом начале возникновения К
доли четверти периода промышленной частоты, когда э
тромагнитные *ТА* работают в линейном режиме (насы
ние не началось). Способ был предложен за рубежом
менительно к защитам на микроэлектронной элемен
базе. У нас пока не реализован.

Другие способы отстройки от неблагоприятного в
ния апериодических слагающих (использование раз
рода фильтрации и т. п.), применяемые на практике, о
сятся уже не к выполнению *ТА*, а к ИО защиты.

3.4. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИП ТОКА

Как уже указывалось выше, на практике, как правило, пока широко применяются электромагнитные ИП — *ТА*. Они выполняются на все номинальные напряжения, выдают информацию о первичном токе в аналоговой форме, имеют одну первичную и одну, две или более вторичных обмоток, каждая из которых должна располагаться на отдельном магнитопроводе, хотя номинальный коэффициент трансформации у всех у них одинаков. Номинальные вторичные токи — 5 или 1 А (последний — обычно при сверхвысоких напряжениях, когда имеются большие расстояния между местом установки устройств защиты и ИП и необходимо снижение потерь мощности в соединительных проводах, пропорциональных I_2^2). С той же, в частности, целью в зарубежной практике используются шунты-резисторы, включаемые на зажимы вторичных обмоток *ТА*, с которых берется часть напряжения, пропорциональная I_2, для передачи информации по соединительным проводам. Используются также *ТА*, встроенные во втулки со стороны высшего напряжения трансформаторов (автотрансформаторов) и во втулки масляных выключателей

на высокие напряжения. Стоимость, габариты, материалоемкость отдельно устанавливаемых *ТА* резко возрастают с увеличением номинальных напряжений. Возникают также и технические затруднения с их использованием (например, в СССР на сверхвысокие напряжения они выполняются каскадными). Поэтому в послевоенные годы было обращено внимание на другие исполнения ИП с лучшими технико-экономическими показателями. К ним относятся оптико-электронные *ТА* (ОЭТА), трансреакторы, магнитные зонды, дискретные *ТА*.

Оптико-электронные *ТА*. Вариант такого *ТА* с использованием магнито-оптического эффекта Фарадея [41] был предложен в ВЭИ (Г. В. Голодолинский) еще в начале 60-х годов. Его основу представляет (рис. 3.13, *а*) преобразование светового сигнала монохроматического источника света ИС, находящегося на потенциале земли, в новый световой сигнал с помощью магнитооптического модулятора Фарадея МОМ. Последний установлен на высоком потенциале провода с током и находится под воздействием магнитного поля последнего. Сигнал от ИС передается на МОМ по оптико-волоконному (из стекловолокна) каналу *ОК1* и возвращается обратно на потенциал земли к оптико-электронному преобразователю *ОЭП* по второму такому же каналу *ОК2*. На выходе *ОЭП* формируется электрический сигнал, несущий информацию о первичном токе, которая может использоваться и для измерительной части защиты. На базе разработок ЛПИ, НИИПТ, завода «Электроаппарат» (г. Ленинград) были в свое время выпущены пробные образцы *ТА* на рассматриваемом принципе, которые должны были быть конкурентоспособны с громоздким, материалоемким электромагнитным *ТА*. Однако их весьма ограниченные мощности, сложность выполнения, неподготовленность элементной базы защиты не дали возможности внедрения их в эксплуатацию. В настоящее время, при широком применении микроэлектроники, вопрос о целесообразности для сверхвысоких напряжений использования *ОЭТА* вновь может оказаться актуальным. При этом внимание разработчиков привлекает другой вариант выполнения таких *ТА*, в котором источник питания также находится на потенциале провода. Структурная схема такого *ТА* приведена на рис. 3.13, *б*. В состав *ТА* входят *ИП* тока *ИПТ* на основе, например, обычного *ТА*, электрооптический преобразователь *ЭОП*, оптический канал связи *ОК* и оптико-

электрический преобразователь *ОЭП*. Блок с *ИП* и *ЭОП* находятся на потенциале провода. Аналоговые сигналы от *ИПТ* поступают в *ЭОП* и преобразуются в оптические сигналы, обычно дискретные. По *ОК* эти сигналы поступают в *ОЭП*, установленный на потенциале земли, и преобразуются в электрические сигналы, например дискретные. Точность *ТА* по второму варианту ограничивается

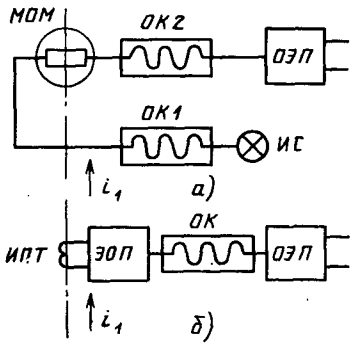


Рис. 3.13. Варианты структурных схем выполнения оптико-электронных *ТА*

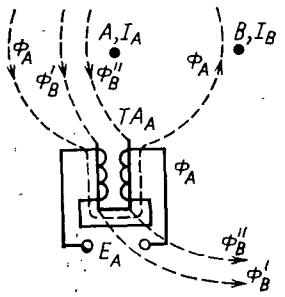


Рис. 3.14. Принцип действия магнитного *ТА*

точностью работы ИПТ и поэтому ниже. Его недостатком является также необходимость иметь специальный блок питания (на схеме не показан), располагаемый около *ЭОП*. Однако конструктивное выполнение такого *ТА* в целом, по-видимому, следует считать более перспективным.

Трансреакторы (*TAV*). Они представляют информацию о первичном токе i_1 в виде вторичного напряжения u_2, а не ток i_2, как у *ТА*. Напряжение $u_2 \equiv di_1/dt$. Коэффициент трансформации $K_{I,U\text{ном}} = I_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$. Сопротивление нагрузки *TAV* выбирается настолько большим, что он работает в режиме, близком к холостому ходу. Поэтому $K_{I,U\text{ном}}$ в значительно большей мере, чем у *ТА*, зависит от сопротивления магнитопровода. Для получения необходимой точности трансформации магнитопровод *TAV* выполняется с большим немагнитным зазором, значение которого должно быть точно отрегулировано и неизменно. Использование *TAV* неоднократно предлагалось для защит на микроэлектронной базе, имеющих большие входные сопротивления, с учетом того, что использование *TAV* обеспечивает естественную отстройку от апериодических слагающих в токе i_1 и снятие затруднений с выбором сечений соединительных проводов. Однако для высоких и сверхвысоких напряжений *TAV* распространения не получили из-за их громоздкости, возможных технологических затруднений в изготовлении и присоединении нескольких нагрузок. Для установок напряжением до 6—10 кВ [43] нашли применение *TAV* с использованием ферритовых магнитопроводов. Трансформаторы тока, работающие в режиме *TAV*, применяются для выполнения простых и дешевых магнитных ИП, являющихся разновидностью магнитных зондов.

Магнитные зонды и их разновидности. Они устанавливаются в магнитном поле измеряемого тока i_1 на возможно малом воздушном расстоянии от провода с током i_1, целиком располагаясь на потенциале земли. Их первая предложенная разновидность, названная магнитным ИП тока, представляет собой зонд индукционного типа. Его основным элементом является обмотка, устанавливаемая таким образом, чтобы ее коэффициент взаимоиндукции с проводом фазы, по которому проходит i_1, был постоянным и по возможности большим, а взаимоиндукция с двумя другими фазами трехфазной системы, обуславливающими помехи, была минимальной. Удачный вариант, названный дифференциальным магнитным *ТА*, имеющим разомкнутую магнитную систему, разработанный в ОРГРЭС под руководством В. Е. Казанского [17], приведен на рис. 3.14. Как видно из рисунка, магнитный поток, определяемый измеряемым током одной фазы, наводит в двух катушках магнитопровода складывающиеся ЭДС, а поток от тока другой фазы — вычитающиеся ЭДС; складывающиеся ЭДС характеризуют измеряемый ток, а вычитающиеся — помехи. Магнитные *ТА* нашли применение на подстанциях 110 кВ с упрощенными схемами электрических соединений (например, без выключателей со стороны высшего напряжения) для питания разного рода токовых защит, а также в ряде других случаев [44]. Защиту при этом следует устанавливать непосредственно около ИП, учитывая его малую мощность и необходимость уменьшения наводок в соединительных проводах.

Магнитные зонды с использованием датчиков Холла были разработаны в ЭНИН под руководством Э. А. Меерович. На практике они в настоящее время применяются очень редко.

Дискретные *ТА*. Информация о первичных токах пе-
редается от ИП, как правило, в аналоговой форме. В сво
время В. Е. Казанский высказал убедительные соображе
ния о целесообразности в ряде случаев использовани
дискретных форм передачи этой информации. Дискретны
сигналы менее чувствительны к помехам, особенно про
мышленной частоты, не предъявляют, как аналоговы
жестких требований к сопротивлениям соединительны
проводов. Удачным оказалось создание дискретных *ТА* н
базе магнитных *ТА*, в которых в качестве выходных пара
метров используются интегральные (не мгновенные) зн
чения электрических величин, их средние значения за п
риод. При этом аналого-цифровые преобразователи о
зываются достаточно простыми по использова
устанавливаются у места расположения ИП и дают
можность значительно более широко применять ма
ные *ТА* и выполнять на их базе защиты разного прин
действия [44]. Имеются сведения о выполнении зару
ными фирмами дискретных *ТА*, у которых собственно
блок оперативного питания и аналого-цифровой пре
зователь находятся на потенциале первичного тока.
формация о мгновенных значениях i_1 с большой част
дискретизации в них передается последовательным дв
ным кодом по оптико-волоконному каналу непосредс
но к микропроцессорным устройствам защиты. Дискре
форма передачи информации может, конечно, оказыва
весьма полезной и для оптико-электронных *ТА*, а при
пиально и для обычных *ТА*.

3.5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ РАБОТА В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Основы выполнения. Основными видами ИП напр
ния являются электромагнитные ИП (рис. 3.15, *а*), и
ваемые часто просто трансформаторами напряжения
и емкостные *ТV* (рис. 3.15, *б*). Упрощенной разнови
стью последних являются устройства отбора напр
ния — ПИН (приспособления для измерения напр
ния), известные еще с начала 30-х годов. Они в нас
щее время образуются конденсаторными обклад
втулок выключателей или вводов высшего напряж
трансформаторов и автотрансформаторов (110—500
Все они обычно дают информацию о первичных u_1 в
логовой форме. В некоторых случаях используются

циальные разновидности ИП напряжения (оптико-электронные, антенные и др.) с соответствующими формами представления информации. Электромагнитные *ТV* для очень высоких напряжений получаются громоздкими и дорогими. Особые трудности возникают при выполнении их внутренней изоляции. Поэтому уже при $U_{ном} \geqslant 110$ кВ они осуществляются ступенчатыми (с индукционными делителями). При $U_{ном} \geqslant 500$ кВ электромагнитные *ТV* не используются. Вместо них применяются емкостные *ТV*. Они имеют (рис. 3.15, *б*) емкостные делители напряжения, сочетаемые с электромагнитными трансформаторами *Т*. Емкостные делители одновременно используются как конденсаторы связи высокочастотных каналов по проводам линий сетей (см. гл. 1).

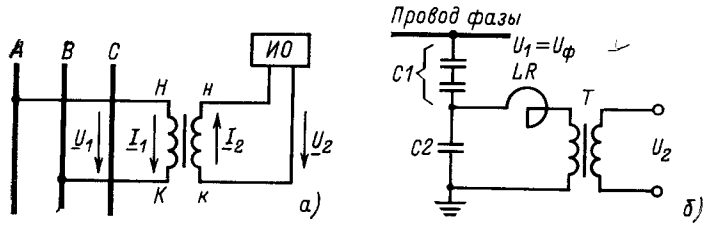


Рис. 3.15. Условные изображения электромагнитного (*а*) и емкостного (*б*) *ТV*

При помощи емкостного делителя измеряемое напряжение понижается в $(C_1+C_2)/C_1$ раз (обычно до 12 кВ) и питает трансформатор *Т*, к вторичным зажимам которого присоединяются нагрузки. Реактор *LR* с индуктивностью *L* компенсирует вместе с индуктивностью рассеяния *Т* падения напряжения в делителе от токов нагрузки.

Расчетную схему замещения *ТV* принимают Т-образной (рис. 3.16, *а*) подобно изображенной на рис. 3.3, с коэффициентом приведения $k=w_2/w_1$. Обычно $w_1 \gg w_2$ и сопротивление *ТV*, отнесенное к числу витков w_1 первичной обмотки, весьма велико по сравнению с эквивалентным сопротивлением электрической системы, в которую он включен. Поэтому напряжение U_1 в любых режимах работы *ТV* не зависит от сопротивления последнего и может рассматриваться как идеальный источник напряжения (с внутренним бесконечно малым сопротивлением). При изменении нагрузки вторичное напряжение U_2 остается

практически неизменным. Изменяются только погрешности измерения f_U, δ, которые должны находиться в допустимых пределах. По изложенным соображениям *TV* в отличие от *TA* может иметь несколько вторичных обмоток (обычно две), расположенных на общем магнитопроводе, и нуждается в защите вторичных цепей от КЗ в них, осуществляемой предохранителями или автоматическими выключателями. При принятых условных положительных направлениях $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$, пренебрегая потерями напряжения в ветвях первичной и вторичной обмоток, имеем $\underline{U}_1' = \underline{U}_2$ (рис. 3.16, *б*). Нагрузки (ИО, измерительные приборы)

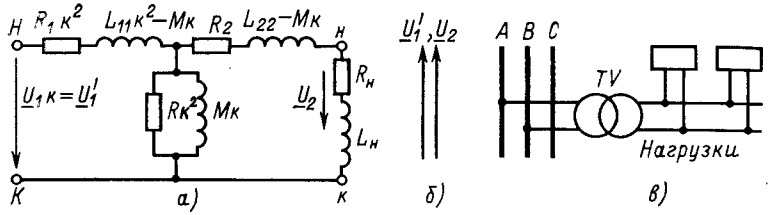


Рис. 3.16. Расчетная схема замещения *TV* (*а*), упрощенная векторная диаграмма напряжений (*б*) и присоединение нагрузки (*в*)

включаются на *TV*, как и на силовые трансформаторы (рис. 3.16, *в*). Соотношения величин внутри емкостных *TV* естественно отличаются от таковых для электромагнитных *TV*. Однако ряд общих положений относится и к ним.

Точность работы ИП напряжения и отдаваемые ими мощности. Одним из основных параметров *TV* является его номинальный коэффициент трансформации $K_{U\text{ном}} = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$. Он не в точности равен, например для электромагнитного *TV*, отношению w_1/w_2 (как у *TA*), так как обычно предусматривается коррекция витков $w_1 (w_1 \gg w_2)$ для обеспечения необходимого класса точности. Погрешность по напряжению

$$f_U = (U_2 - U_1/K_{U\text{ном}})/(U_1/K_{U\text{ном}}) \qquad (3.3)$$

определяется для *TV* наличием потерь напряжения в ветвях первичной и вторичной обмоток и значением витковой коррекции. Угловая погрешность δ определяется сдвигом по фазе между U_2 и U_1. Для емкостных *TV* погрешности определяются бо́льшим числом факторов. Для ПИН, выполняемых в настоящее время только силами энергосистем, погрешности вообще не нормируются, и они используются на практике преимущественно для таких целей, как, например, фиксация наличия напряжения при автоматическом повторном включении (АПВ) и т. п.

При увеличении нагрузки (уменьшении ее сопротивления) сверх номинальной погрешности f_U обычно увеличиваются. Поэтому один и тот же *TV* может отдавать бо́льшие мощности, работая в более низком классе точности. Максимальная мощность, которую они могут отдавать длительно, работая вне класса точности, определяется условиями нагрева. Напряжения, подводимые к ИО защиты, оказываются меньшими на значения потерь в соединительных проводах. Поэтому допустимые значения указанных потерь нормируются.

Типичными для ИП напряжения, используемых для защиты, являются условия работы при КЗ, когда напряжения U_1 у места включения *TV* могут быть много меньше $U_{1\text{ном}}$. Однако погрешности в этих режимах ГОСТ не нормируются. Практически считают, что f_U при пониженных напряжениях обычно не превосходит значений при номинальных напряжениях.

3.6. РАБОТА ИП НАПРЯЖЕНИЯ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Анализу работы ИП напряжения в переходных режимах в отличие от *TA* обычно уделяется меньшее внимание. Это определяется в основном следующими причинами: 1) значительные апериодические слагающие в u_1 при КЗ появляются значительно реже, чем в i_1 (в системах с сосредоточенными R и L, как было рассмотрено в гл. 1, при $L_с/R_с \approx L_л/R_л$ их вообще почти нет); 2) емкостными *TV* они практически не трансформируются, при электромагнитных *TV*, как показали исследования НПИ (Э. В. Подгорный и др.), их влияние на трансформацию основной гармоники невелико; 3) знакопеременные колебательные слагающие (если они значительны) трансформируются *TV*, как и *TA*, хорошо, но борьба с их отрицательным влиянием осуществляется уже в ИО защиты.

Необходимо отметить, что при близких КЗ, когда остаточное U_1 в пределе может снижаться до нуля, вторичное напряжение на емкостном *TV* снижается замедленно, так как требуется время для рассеивания энергии, запасенной при нормальной работе во всех его реактивных элементах. Некоторые ИО могут при этом функциониро-

вать неправильно. Поэтому к емкостным *TV* предъявляются специфические требования. Так, согласно требованиям МЭК U_2 остаточное после снижения U_1 до нуля через 0,02 с не должно превосходить 0,1 $U_{1ном}$.

Возникновение феррорезонансных колебаний и борьба с ними. Возможность возникновения устойчивых феррорезонансных колебаний приходится учитывать при использовании как емкостных, так и электромагнитных *TV*. У емкостных *TV* такие режимы могут возникать, например, при отключении КЗ во вторичной ненагруженной цепи, когда в емкостях и индуктивностях запасается наибольшая энергия. Для подавления таких феррорезонансных колебаний ко вторичным зажимам трансформатора жестко подключают резистор и резко снижают рабочую индукцию в трансформаторе *T* (см. рис. 3.15, *б*). По разработкам ВНИИЭ (М. Х. Зихерман и др.) для рассматриваемых целей предложено использовать быстронасыщающийся реактор *LR* (см. рис. 3.15, *б*), активное сопротивление которого выполняет роль резистора. У электромагнитных *TV* феррорезонансные устойчивые колебания, как показали опыт эксплуатации и исследования (см., например, [48]), могут возникать как в сетях с $U_{ном}=6\div10$ кВ, так и в сетях 110—220 кВ. В первом случае они обусловлены возникновением феррорезонанса между индуктивностью силовых трансформаторов и емкостью питающей сети при разрывах в ней фаз. Под воздействием возникающих перенапряжений первичная обмотка *TV* при глухом заземлении ее нейтрали (в основном для получения вторичного напряжения нулевой последовательности, необходимого для сигнализации возникновения $K_з^{(1)}$) может недопустимо перегреваться повышенными намагничивающими токами. Поэтому в эксплуатации идут даже на разземление указанной нейтрали. Во втором случае феррорезонансные колебания могут возникать по той же причине, что и в первом случае, или, что может быть иногда более вероятным, вследствие феррорезонанса между индуктивностью *TV* и емкостями конденсаторов, шунтирующих разрывы контактов воздушных выключателей при отключении шин с *TV* всеми выключателями (рис. 3.17). Для исключения этого в эксплуатации принимают меры, предотвращающие возможность появления подобных опасных режимов.

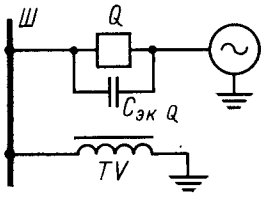


Рис. 3.17. Эквивалентная схема системы в режиме, когда возможны феррорезонансные перенапряжения

3.7. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ИП И ЦЕПЕЙ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ

Устройства защиты обычно выполняют вторичными — получают входные $I_р$ и $U_р$ от вторичных обмоток *TA* и *TV*. Полная характеристика электрических величин защищаемого элемента часто (например, для защиты линий) определяется тремя фазными токами и тремя фазными напряжениями. Поэтому, если все они или их симметричные составляющие требуются для функционирования защиты, необходимо включение *TA* и *TV* во все три фазы; при этом *TA* выполняются однофазными, а *TV* на $U_{ном}\leqslant35$ кВ часто бывают трехфазными. В некоторых случаях для действия защиты требуются полные токи только двух фаз (например, для токовых защит при $U_{ном}\leqslant35$ кВ), тогда *TA* устанавливаются в двух фазах. Иногда требуются только междуфазные напряжения, тогда два однофазных *TV* включаются на междуфазные напряжения.

При микропроцессорной элементной базе все необходимые слагающие (например, полные аварийные) и симметричные составляющие всех последовательностей могут получаться расчетным путем при известных полных токах и напряжениях фаз. При электромеханической и полупроводниковой (интегральной микроэлектронике) элементных базах симметричные составляющие нулевой последовательности обычно получаются непосредственно путем соответствующего соединения вторичных обмоток *TA* и *TV*, а симметричные составляющие прямой, обратной последовательностей и полные аварийные слагающие — в специальных вторичных устройствах.

Современные ИО, выполненные с использованием интегральной микроэлектронной базы, предъявляют к входным величинам $U_р$ и $I_р$ особые требования — их нельзя присоединять, как электромеханические органы, непосредственно к вторичным обмоткам электромагнитных *TA* и *TV*, имеющих номинальные вторичные величины — токи 5 или 1 А и напряжения 100 В. Особые трудности возникают для цепей тока, в которых нормальный режим работы близок к КЗ вторичных обмоток *TA*, в то время как входное сопротивление микроэлектронной схемы весьма вели-

ко. Поэтому возникает вопрос согласования цепей ИО с вторичными цепями *ТА* и *TV*. Согласование осуществляется, например при аналоговой форме передачи информации, применением промежуточных *ТА* и *TV*, трансреакторов, резистивных делителей и т. д. При этом учитывается, что применение промежуточных трансформаторов и трансреакторов осуществляет полезное гальваническое разделение вторичных цепей ИП и микроэлектронной схемы. В результате осуществляемого согласования нагрузка первичных *ТА* находится в допустимых пределах. Ниже полагается, что эти вспомогательные устройства входят в измерительную часть защиты.

3.8. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ *ТА* И ЦЕПЕЙ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ, ВКЛЮЧАЕМЫХ НА ПОЛНЫЕ ТОКИ ФАЗ

В сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ, в которых не бывает однофазных КЗ, защиты линий целесообразно выполнять с двумя *ТА* (двухфазные схемы), обычно включаемыми во всей сети в одноименные фазы (*А* и *С*). В сетях с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ, которые работают с глухозаземленными нейтралями трансформаторов (автотрансформаторов), для защит необходимо иметь *ТА* во всех трех фазах (трехфазные схемы) прежде всего для обеспечения их работы при $K^{(1)}$. Таким образом, получаются следующие схемы соединений *ТА* (рис. 3.18): неполная звезда (рис. 3.18, *а*), полная

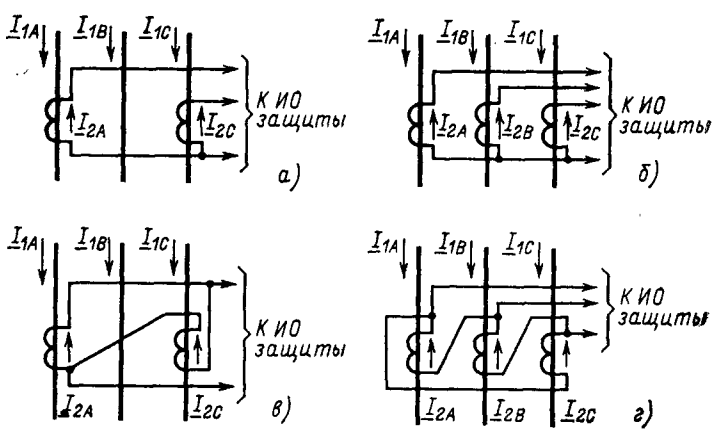


Рис. 3.18. Схемы соединений *ТА*

звезда (рис. 3.18, *б*), неполный треугольник (рис. 3.18, *в*) и полный треугольник (рис. 3.18, *г*). Обратный провод в схеме неполной звезды необходим для создания пути вторичному току $\underline{I}_A+\underline{I}_C \neq 0$ в рабочих режимах, при $K^{(3)}$, $K^{(2)}_{AB}$ и $K^{(2)}_{BC}$, при некоторых случаях $K^{(1,1)}_{дв}$; обратный провод в схеме полной звезды необходим для создания пути вторичному току $\underline{I}_A+\underline{I}_B+\underline{I}_C \neq 0$ при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, а также для получения составляющих нулевой последовательности $3\underline{I}_0=\underline{I}_A+\underline{I}_B+\underline{I}_C$.

Типичными схемами соединений *ТА* и цепей тока ИО защит являются следующие (рис. 3.19):

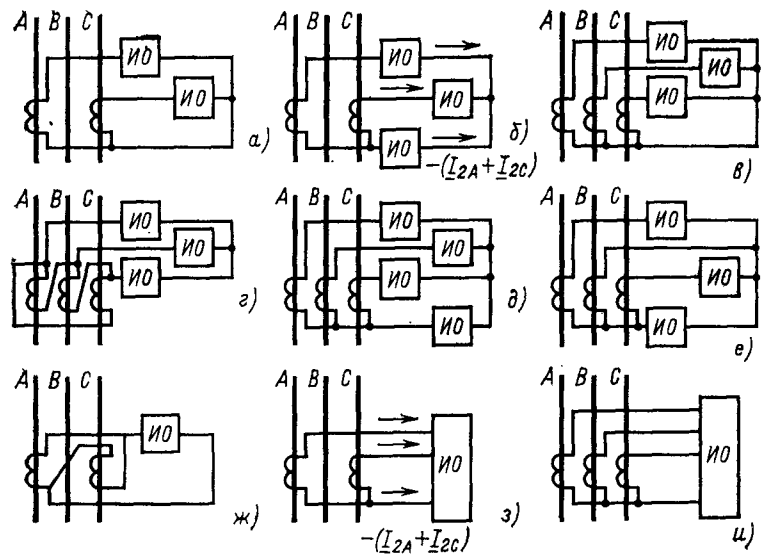


Рис. 3.19. Схемы соединений *ТА* и цепей тока пофазных ИО защит

1) при *многосистемных защитах* (с несколькими ИО) — двухфазная схема с двумя ИО (рис. 3.19, *а*) или тремя ИО (рис. 3.19, *б*), в которой третий орган включен на сумму токов двух фаз; трехфазные схемы с тремя ИО (рис. 3.19, *в* и *г*) или четырьмя ИО (рис. 3.19, *д*) с включением четвертого ИО на сумму токов трех фаз ($3I_0$). Возможно также включение ИО на $3I_0$ по схеме на рис. 3.19, *е*;

2) при *односистемных защитах* (с одним ИО) — двухфазная схема с жестким включением ИО на разность токов двух фаз (рис. 3.19, *ж*) или автоматическим включением ИО, например с помощью максиселектора (или подобных этому схем с операционными усилителями, см., например, [57]) на больший из подводимых токов (рис. 3.19, *з*); трехфазная схема с автоматическим включением ИО на больший из подводимых токов (рис. 3.19, *и*).

В настоящее время ЧЭАЗ по разработке ВНИИР для схем по рис. 3.19, *з*, *и* выпускает ИО (реле) тока с использованием операционных усилителей (см., например, [45]). Схемы с такими органами являются прогрессивными и должны получить применение.

Возможное техническое преимущество двухфазных схем в сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ иллюстрирует случай (рис. 3.20), когда при повреждениях фаз *B* и *C* (или *B* и *A*) на разных линиях, отходящих от шин питающей подстанции, будет отключаться только одна из двух поврежденных линий — с поврежденной фазой *C* (или соответственно *A*), в которую включен *ТА* защиты; КЗ при этом прекращается и остается только $K_з^{(1)}$ на другой линии, которое может даже самоликвидироваться. Такая ликвидация КЗ будет, очевидно, возможна, если *ТА* на линиях установлены в одноименных фазах.

Достоинство двухфазной схемы с использованием в ИО токов двух фаз и тока в обратном проводе иллюстрирует случай $K^{(2)}$ за трансформатором с соединением обмоток У/Д (или Д/У), когда в *ТА* питающей линии могут оказаться токи $I^{(2)}$ в 2 раза меньшие, чем в третьей фазе (гл. 1). По обратному проводу и в ИО в нем в этом случае будет проходить сумма токов фаз с *ТА*, равная току в третьей фазе, тем самым повысится чувствительность защиты линии, питающей трансформатор. Необходимо отметить, что рассмотренный случай токораспределения будет также возникать при $K^{(1)}$ в четырехпроводной сети 380/220 В трансформатора с соединением обмоток У/У с заземлением его нейтрали с питаемой стороны (см. гл. 1).

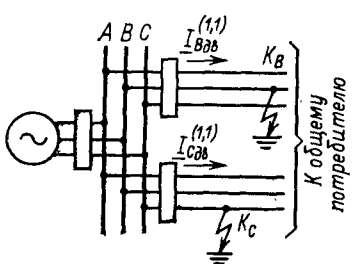


Рис. 3.20. Двойные замыкания на землю на разных линиях

Схема по рис. 3.19, *ж* для действия при рассмотренных случаях КЗ за трансформаторами не пригодна, так как ток в ее ИО $I_{ио} = \underline{I}_{2A} - \underline{I}_{2C}$ может быть равен нулю. Кроме того, схема имеет сильно пониженную чувствительность при некоторых видах $K^{(2)}$ на защищаемой линии (см. гл. 4). Поэтому в связи с появлением указанных выше органов ее применение в дальнейшем окажется ограниченным.

Необходимо отметить, что применительно к защитам линий схема полного треугольника, обеспечивающая получение разностей токов фаз, обычно осуществляется не на самих *ТА*, а в цепях ИО.

3.9. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ *ТА* И ЦЕПЕЙ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Схема выполняется с включением ИО на фильтр токов нулевой последовательности. Часто, как указывалось выше, фильтр осуществляется непосредственно на *ТА* трех фаз, вторичные обмотки которых соединяются на сумму вторичных токов (рис. 3.21). В целях экономии сердечников *ТА* схема обычно объединяется со схемами защит от многофазных КЗ, включаемых на полные токи фаз, например со схемой на рис. 3.19, *д* или *е*.

Мгновенное значение тока в органе нулевой последовательности $i_р = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}$. Вторичный ток *ТА* $i_2 = i_1' - i_0' = (i_1 - i_0) w_1/w_2$. Ниже индекс 0 для намагничивающего тока в целях отличия его от тока нулевой последовательности заменяется на «нам». Принимая w_1/w_2 для всех *ТА* фаз в точности одинаковыми, получаем

$$i_{ИО} = (i_{1A} + i_{1B} + i_{1C}) w_1/w_2 - (i_{Aнам} + i_{Bнам} + i_{Cнам}) w_1/w_2. \quad (3.4)$$

В общем случае $i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 3 i_0$; токи $i_{нам}$ при этом содержат составляющие всех трех последовательностей. Составляющие $i_{0нам}$ нулевой последовательности в $i_{нам}$ да-

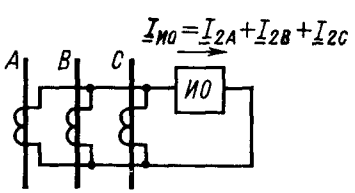


Рис. 3.21. Схема фильтра токов нулевой последовательности

ют в сумме примерно $3\,i_{0нам}w_1/w_2$, а сумма составляющих $i_{нам}$ прямой и обратной последовательностей с учетом возможно неодинаковых полных ε и угловых δ погрешностей трех *ТА* образует *вторичный ток небаланса фильтра* $i_{нб,в}$. В результате [10]

$$i_{ИО} \approx 3\,(i_0 - i_{0нам})/K_{I ном} - i_{нб,в(i_0\neq 0)}. \qquad (3.5)$$

Необходимо отметить, что иногда ошибочно называют вторичным током небаланса второй член выражения (3.5). Это справедливо только для случая, когда в первичных токах фаз нет составляющих i_0. Понятие об $i_{нб,в}$ при $i_0=0$ получило широкое применение. Значение $i_{нб,в}$ зависит от нагрузки фильтра. Поэтому использование этой величины при расчетах часто неудобно. В 40-е годы ЧЭАЗ (А. М. Бреслер) было предложено ввести понятие о действующем *первичном токе небаланса* $\underline{I}_{нб,п}$, представляющем собой ток $3\underline{I}_0$, полностью компенсирующий $\underline{I}_{нб,в}$ и поэтому получающийся не зависящим от нагрузки фильтра. В настоящее время величиной $\underline{I}_{нб,п}$ обычно пользуются в расчетах. В этом случае ток в защите $\underline{I}_з \approx 3\underline{I}_0 - \underline{I}_{нб,п}$. При достаточно точной работе *ТА* иногда в ориентировочных расчетах для установившихся режимов принимают $\underline{I}_з \approx 3\underline{I}_0$.

При номинальных первичных токах *ТА* токи $I_{нб}$ невелики и обычно не превосходят 2—3 % $I_{ном}$. При возрастании первичных токов возрастают $I_{нам}$ и соответственно $I_{нб}$. Особенно большие $I_{нб}$ появляются при переходных процессах в *ТА*, когда $I_{нам}$ могут приобретать весьма большие значения. Пиковые значения могут достигать в таких случаях многих десятков процентов первичных токов. Однако столь большие $i_{нб}$ существуют кратковременно и поэтому должны учитываться для защит или ступеней защит, работающих без выдержки времени или с небольшой выдержкой времени. Ток небаланса электромагнитных *ТА* в установившемся симметричном режиме, как это было показано, например, в работах А. А. Воскресенского (Горэнерго) конца 40-х годов, состоит из первой и высших гармоник, при небольших первичных токах — в основном из первой гармоники и при значительных токах (насыщении магнитной системы) — в основном из третьей гармоники. В общем случае $I_{нб} = \sqrt{I^2_{нб1} + I^2_{нб3}}$, где $I_{нб1}$ — первая гармоника небаланса, равная геометрической сумме

первых гармоник намагничивающих токов *ТА* трех фаз; $I_{нб3}$ — третья гармоника тока небаланса, равная арифметической сумме третьих гармоник тех же токов (являются составляющими нулевой последовательности).

Более полная картина изменений токов небаланса была дана в последующих работах (см., например, [17]).

Рассмотренная схема используется для выполнения защит, действующих при $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$ и $K^{(1,1)}_{дв}$.

В кабельных сетях фильтры токов нулевой последовательности обычно осуществляются не с помощью трех *ТА*, а однотрансформаторными, магнитопровод которых охватывает все три фазы первичной цепи. Его преимуществами являются простота выполнения и отсутствие слагающей в токе небаланса, определяемой суммой токов намагничивания *ТА* трех фаз. Выполнение таких *ТА* рассматривается в гл. 9. Они применяются также для специальных защит от $K^{(1)}_з$ генераторов, работающих на сборные шины, когда охватывают своим магнитопроводом также отрезки шин, соединяющих генераторы со сборными шинами.

Для этого указанные отрезки должны иметь пофазную изоляцию, подобную изоляции фаз статорной обмотки (см. гл. 12).

3.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК НА ИП ТОКА

Для одиночно работающего *ТА* нагрузка определяется полным сопротивлением $Z_н$ его вторичной цепи, состоящим из последовательно включенных сопротивлений цепи ИО, сопротивлений прямого и обратного соединительных проводов $R_{пр}$ и переходных активных сопротивлений в местах соединений. Она выражается в омах или вольтамперах, отнесенных к $I_2 = I_{2ном}$ с указанием $\cos\varphi_н$.

Для *ТА*, работающего в схеме защиты трехфазной цепи, $Z_н$ в общем случае зависит от схемы соединений *ТА* и ИО, вида КЗ и сочетания поврежденных фаз. Принципиально оно может быть определено как расчетная величина $\underline{Z}_н = \underline{U}_2/\underline{I}_2$. Здесь $\underline{U}_2$ и $\underline{I}_2$ — напряжение на зажимах вторичной обмотки *ТА* и ток в ней. Так, например, при включении органа на разность токов фаз *A* и *C* и $K^{(2)}_{AC}$ $Z_{н,расч} = Z_н I_{ИО}/I_2 = 2Z_н$, так как $I_{ИО} = 2I_2$. Используя такой подход к определению нагрузки, можно выразить ее через сопротивления всех элементов, питаемых через дан-

ный TA. Соответствующие выражения для $Z_{н,расч}$ приводятся в справочной литературе (см., например, [42]). Расчетным является наиболее тяжелый для работы TA случай.

Для уменьшения нагрузки $Z_{н,расч}$ иногда применяется последовательное соединение двух вторичных обмоток одного и того же TA (например, небольшой мощности, встроенных во втулки масляных выключателей) с одинаковым $K_{I ном}$. Коэффициент $K_{I ном}$ схемы остается при этом прежним. Сопротивление нагрузки, приходящейся на каждую вторичную обмотку (один сердечник) TA,

$$U_2/I_2 = 0{,}5\,(Z_{ИО} + 2R_{пр})\,I_2/I_2 = 0{,}5\,(Z_{ИО} + 2R_{пр}).$$

Таким образом, нагрузка на каждую обмотку снижается примерно вдвое.

Сопротивления ИО могут сильно зависеть от кратности тока и других факторов. В этих случаях могли бы определяться их значения для расчетных режимов. Однако, как это было показано, например, в [42], при использовании для определения нагрузок кривых предельных кратностей, построенных для линейных нагрузок, получается только некоторый запас.

Расчеты по определению допустимых нагрузок ведутся с использованием только периодических установившихся слагающих токов КЗ. Введение к расчетным кратностям токов КЗ повышающих коэффициентов для учета влияния переходных значений токов является нецелесообразным и на практике не применяется.

Допустимой является нагрузка $Z_{н,расч}$, при которой прежде всего погрешности TA не превышают предельно допустимых значений (обычно $\varepsilon = 10\,\%$ в расчетных точках по выбору параметров срабатывания и f_i составляет несколько десятков процентов при близких КЗ, когда требуется только обеспечение четкой работы ИО). Дополнительным условием является ограничение напряжений во вторичных цепях TA при максимальных токах КЗ в защите.

По окончательно установленной максимальной допустимой $Z_{н,расч}$ при известных сопротивлениях ИО и их соединений, а также длине вспомогательных проводов определяется минимально необходимое сечение жил последних.

3.11. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ИП НАПРЯЖЕНИЯ И ЦЕПЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Основной, универсальной схемой соединений ИП напряжения и ИО является схема соединений первичных обмоток в звезду с заземленной нейтралью и двух вторичных обмоток соответственно в звезду и в разомкнутый треугольник (рис. 3.22). В последнем случае подобно тому, что рассматривалось для TA, необходимо считаться с наличием напряжений небаланса $U_{нб}$, не превосходящих нескольких процентов $U_{ном}$. Вторичные обмотки TV (как и TA) заземляются (защитное заземление). Рассматривае-

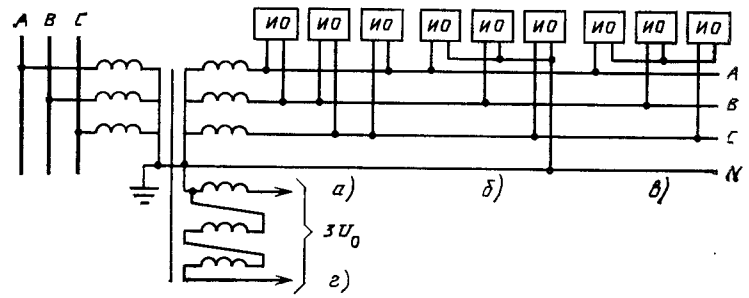


Рис. 3.22. Схема соединения обмоток однофазных TV в звезду с включением нагрузки и в разомкнутый треугольник

мая схема дает возможность подключать ИО на вторичные напряжения U_2, пропорциональные первичным междуфазным напряжениям (рис. 3.22, $а$), фазным напряжениям (рис. 3.22, $б$), напряжениям фаз по отношению к нейтральной точке системы (рис. 3.22, $в$), а также напряжениям нулевой последовательности (рис. 3.22, $г$). При $U_{ном} \geqslant 35$ кВ ИП обычно выполняются однофазными, при $U_{ном} = 6 \div 10$ кВ для такой схемы — трехфазными пятистержневыми. Если не требуется измерять фазные напряжения и напряжения нулевой последовательности, возможно применение схемы соединений первичных и вторичных обмоток двух однофазных трансформаторов в неполные треугольники (рис. 3.23).

Вторичное номинальное напряжение TV обычно 100 В. При этом фазное напряжение равно $100/\sqrt{3}$ В. Коэффи-

циент трансформации $K_{U\text{ном}}$ для обмоток, соединенных разомкнутый треугольник, выбирается таким образом чтобы $3U_{0max}/K_{U\text{ном}}=100$ В. В этом случае для сетей с глухозаземленными нейтралями $K_{U\text{ ном}}=(U_{\text{ном,мф}}/\sqrt{3})/100$, а для сетей с $U_{\text{ном}}\leqslant 35$ кВ (например, с изолированными нейтралями) $K_{U\text{ном}}=(U_{\text{ном,мф}}/\sqrt{3})/(100/3$ (учитывается повышение $U_{1\text{ф}}$ до $\sqrt{3}U_{\text{ф,раб}}$ и сложение в разомкнутом треугольнике трех вторичных напряжений).

В некоторых частных случаях напряжение нулевой последовательности получают заземлением нейтрали систе-

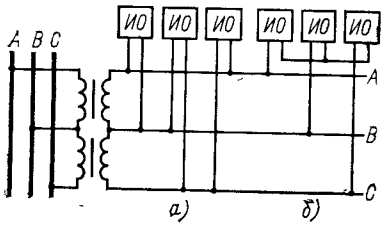


Рис. 3.23. Схема соединения обмоток однофазных *TV* в неполный треугольник

мы (например, нейтрали генератора) через однофазный *TV* (рис. 3.24). При замыкании на землю нейтраль получает смещение, равное U_0. Способ иногда используется в системах с $U_{\text{ном}}\leqslant 20$ кВ.

Питание цепей напряжения при отсутствии *TV* в защищаемой сети. Взамен напряжения нулевой последователь-

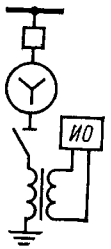


Рис. 3.24. Схема для получения напряжения нулевой последовательности

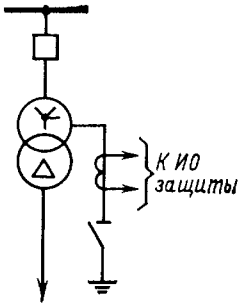


Рис. 3.25. Питание цепей напряжения ИО защиты от *TA* в цепи заземления нейтрали силового трансформатора

ности можно использовать ток нулевой последовательности, проходящий через глухозаземленную нейтраль двухобмоточного трансформатора подстанции (например, при $U_{\text{ном}}=110$ кВ), учитывая, что $\underline{U}_0=-\underline{I}_0\underline{Z}_{0\text{т}}$ (рис. 3.25). При автотрансформаторах и трехобмоточных трансформаторах с группой соединений $У_0/У_0/Д$-12-11, связывающих сети с глухозаземленными нейтралями, использование тока I_0 по схеме, аналогичной схеме на рис. 3.25, недопустимо [16]. Последнее было отмечено в 50-е годы в ТЭП (Б. И. Розенбергом). Полные напряжения фаз могут подаваться со стороны низшего напряжения автотрансформаторов и трансформаторов не только при отсутствии *TV* на других сторонах, но иногда в целях обеспечения надежного питания и по некоторым другим причинам.

3.12. ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ФИЛЬТРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА РАЗНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Специальные фильтры тока и напряжения нулевой последовательности на практике используются редко. Для получения I_0 и U_0, как было рассмотрено выше, обычно применяются специальные соединения вторичных обмоток *TA* и *TV*. Для получения же составляющих обратной и прямой последовательностей, как правило, применяются специальные устройства — фильтры.

В Советском Союзе практическая надобность в фильтрах обратной последовательности выявилась в начале 30-х годов и была начата в лаборатории им. А. А. Смурова. В дальнейшем эта работа была развернута и в других организациях. Она завершилась созданием научных основ для их построения и расчета [5], а также целесообразных форм их выполнения на электромеханической элементной базе. В последние годы в связи с использованием интегральной микроэлектроники, операционных усилителей некоторые общие положения и формы выполнения фильтров претерпевают существенные изменения. В этом направлении должны быть отмечены работы ЛПИ (В. К. Ванин, Г. М. Павлов [14]), МЭИ (Р. В. Темкина [46]), ВНИИР (Л. А. Надель и др.) и других организаций.

Задача построения, например, фильтров обратной последовательности сводится к получению на их вторичных зажимах величины, пропорциональной составляющей обратной последовательности U_2 или I_2, не зависящей от

составляющих U_1, I_1, U_0, I_0, содержащихся в первичных электрических величинах.

Возможные пути выполнения фильтров вытекают из рассмотрения, например, соотношения $\underline{U}_{A2}=(\underline{U}_A+a^2\underline{U}_B+aU_C)/3$. Преобразование этого выражения дает $\underline{U}_{A2}=(\underline{U}_{AB}+\underline{U}_{BC}e^{-j60°})/3$ или, если умножить его на $e^{j\alpha}$, в более общем виде $\underline{U}_{A2}e^{j\alpha}=(\underline{U}_{AB}e^{j\alpha}+\underline{U}_{BC}e^{-j(60°-\alpha)}/3$ и аналогично для тока $\underline{I}_{A2}e^{j\alpha}=(\underline{I}_{AB}e^{j\alpha}+\underline{I}_{BC}e^{-j(60°-\alpha)})/3$. Необходимо отметить, что для фильтрации могут быть использованы не только амплитудные, но и мгновенные значения токов и напряжений, для которых также существуют понятия симметричных составляющих. Таким образом, для получения фильтра можно использовать две междуфазные величины, поворачивая их на определенные углы и геометрически складывая; при этом угол взаимного фазного их смещения должен составлять 60°. Фазные сдвиги могут производиться подбором элементов фильтра; суммирование величин иногда заменяется суммированием соответствующих магнитных потоков. Многие фильтры выполняются так, что электрические величины в каждом из плеч при разомкнутых (фильтры U_2) и закороченных (I_2) вторичных зажимах определяются только одной из двух величин. Анализ работы таких фильтров удобно проводить, используя векторные диаграммы [5]. Иногда удобным для анализа и построения фильтров [5] является метод дуальных преобразований, позволяющий, в частности, получать схемы, например, фильтров I_2 по параметрам схем фильтров U_2. Возможно получение произвольно большого числа типов фильтров. Ниже в виде примера рассматривается получивший распространение в устройствах на электромеханической элементной базе пассивный двуплечий активно-емкостный фильтр U_2.

Для оценки подобных фильтров обратной последовательности были предложены [5] показатели: $\alpha=S_{2max}/S_{\text{потр}}$, $\beta=S_{2max}/P_{\text{потр}}$ (мощности $S_{\text{потр}}$ и $P_{\text{потр}}$ относятся к напряжению $U_1=U_2$ и току $I_1=I_2$, для кото определяется максимальная мощность S_{2max}, выделяе на вторичных зажимах фильтра) и γ — показатель, о деляющий погрешность фильтра при отклонении час от номинальной. При прочих равных условиях фильтр лучше, чем больше α и β и меньше γ. Для современ исполнений на операционных усилителях величины α являются совершенно непоказательными.

Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности U_2. В отечественной практике он стал применяться с 40-х годов. На рис. 3.26 приведены схема фильтра (рис. 3.26, *а*) и его потенциальные диаграммы при подведении к фильтру соответственно системы напряжений прямой U_1 (рис. 3.26, *б*) и обратной U_2 (рис. 3.26, *в*) последовательностей. Потенциальные треугольники ABm и BCn, как определяемые R и $X=1/\omega C$, являются прямоугольными при вершинах m и n. При подведении U_1 точки m и n совпадают и однозначно располагаются по-

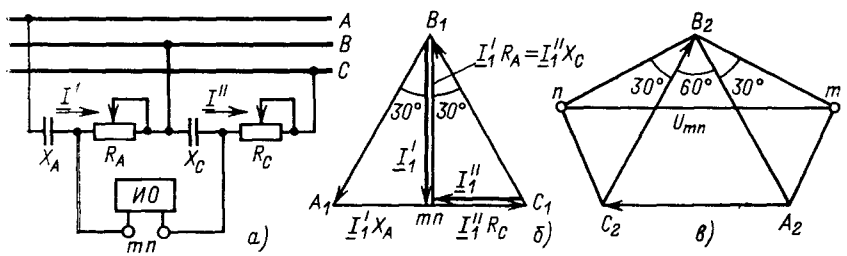


Рис. 3.26. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности

средине прямой A_1C_1 (рис. 3.26, *б*); тогда $X_A/R_A=0{,}5/0{,}5\sqrt{3}$ и $X_C/R_C=0{,}5\sqrt{3}/0{,}5$. При подведении U_2 и разомкнутых зажимах mn (холостой ход) диаграмма приобретает вид, показанный на рис. 3.26, *в*. Она получается из диаграммы, приведенной на рис. 3.26, *б*, при перемене местами напряжений $\underline{U}_{AB}$ и $\underline{U}_{BC}$, вместе с которыми перемещаются и треугольники $A\underline{B}m$ и BCn. Напряжение $\underline{U}_{mn}=\underline{m}_x\underline{U}_2$, где $\underline{m}_x$, если отнести $\underline{U}_2$ к $\underline{U}_{AB}$, равен $1{,}5\,e^{j60°}$. Рассмотренный фильтр прост в выполнении, имеет небольшие габариты и удовлетворительные показатели.

Для фильтра I_2 могла бы быть использована аналогичная схема, получаемая дуальным преобразованием фильтра напряжения по схеме, приведенной на рис. 3.26. Однако, если присоединяемая нагрузка имеет малое сопротивление, оказывается более целесообразным применение трансформаторных фильтров I_2 (см., например, [16]).

Рассмотренная схема фильтра обратной последовательности может быть также применена для создания фильтра прямой последовательности и комбинированного

фильтра прямой и обратной последовательностей. Для получения фильтра прямой последовательности достаточно изменить порядок подведения величин к первичным зажимам фильтра обратной последовательности. Комбинированный фильтр представляет собой соответствующим образом расстроенный фильтр обратной или прямой последовательности.

3.13. ПРИНЦИП ВЫДЕЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СЛАГАЮЩИХ

Аварийные слагающие электрических величин определяются как разность их значений при КЗ и в предшествующем ему рабочем режиме. Применительно к комплексным их представлениям они определяются по выражению (1.14): $\underline{F}_{ав}=\underline{F}_{к}-\underline{F}_{раб}$. Аварийные слагающие, так же как и полные величины, разлагаются на симметричные составляющие (см. гл. 1). Получение этих симметричных составляющих (если они требуются) принципиально можно осуществлять двумя способами: сначала выделять полные аварийные слагающие и по ним их симметричные составляющие или сначала определять симметричные составляющие в величинах $F_к$ и $F_{раб}$ и далее по выражению (1.14) — аварийные слагающие отдельных последовательностей. Предпочтение отдается способу более легкому для реализации и зависит в значительной мере от применяемой элементной базы. При этом следует учитывать, что при микропроцессорной элементной базе (программные защиты) весьма просто выделяются полные аварийные слагающие отдельных фаз, так как используют мгновенные значения величин в последний период, предшествовавший КЗ, и в первый период после его возникновения по первоначальному предложению ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд и Л. С. Зисман).

Рассматривая симметричные составляющие величин, необходимо отметить, что при отсутствии в рабочем режиме несимметрий $F_{раб2ав}=F_{раб0ав}=0$ и $F_{к,ав}=F_к$ (например, $U_{к2ав}=U_2$ в понимании, рассмотренном в предыдущем параграфе). Поэтому рассмотренный в нем фильтр U_2 (см. рис. 3.26) явится и фильтром $U_{2ав}$.

По-другому обстоит дело со слагающими $F_{1ав}$ в рассматриваемом симметричном режиме, так как даже при $K^{(3)}$ $F_{1ав}$ имеют конечные значения, наибольшие для $U_{1ав}$ в месте КЗ (см. гл. 1). Поэтому одного фильтра U_1 (см. § 3.12) оказывается уже недостаточно.

На практике приходится учитывать несимметрию в рабочих режимах, определяемую неполнофазными режимами (см. гл. 1), электрической тягой, электротермическими печами и т. д. В этих случаях для получения аварийных симметричных составляющих любых последовательностей одного фильтра (например, $U_{2ав}$ по рис. 3.26) оказывается уже недостаточно.

Необходимо также подчеркнуть, что тот же $U_{2ав}$ является геометрической разностью величин в режимах КЗ и нагрузочных, которая больше разности их абсолютных значений. Это используется для реализации чувствительных пусковых органов в устройствах, например, блокировки дистанционных защит при качаниях (см. гл. 6).

3.14. МЕСТА ВКЛЮЧЕНИЯ ИП ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

В общем случае места включения *ТА*, используемых для защиты, определяются с учетом относительной вероятности перекрытий втулок *ТА* и относящихся к ним выключателей, необходимостью обеспечения ликвидации КЗ в любой точке электроустановки, целесообразным выполнением ее конструкции и удобствами эксплуатации.

Просто решается вопрос при *ТА*, встроенных во втулки выключателей. Основную защиту присоединения целесообразно включать на *ТА* втулок, обращенных в сторону сборных шин или ошиновок (рис. 3.27, *а*), *ТА* втулок другой стороны могут использоваться, например, для других защит данного присоединения.

Выносные *ТА* наиболее часто включаются за выключателями в сторону защищаемого элемента (рис. 3.27, *б*). Для исключения незащищенных точек дифференциальные защиты секций шин напряжением 6—10 кВ используют *ТА*, включаемые на стороне вне защищаемой секции (рис. 3.27, *в*). Для элементов напряжением 110—220 кВ и особенно при сверхвысоких напряжениях *ТА* с двух сторон выключателей в целях экономии не устанавливаются. Тогда появляются места, при КЗ в которых защиты данной электроустановки не могут их ликвидировать (см., например, рис. 3.27, *г*). Ликвидация таких КЗ осуществляется устройствами, работающими при отказах выключателей (УРОВ, см. гл. 15) и выполняющими дополнительно и рассматриваемую задачу.

Трансформаторы напряжения наиболее часто включа-

ются на сборные шины или ошиновки, соединяющие между собой несколько элементов, и применяются одновременно для защит всех их присоединений. Исключением является, например, питание цепей напряжения защит линий сверхвысоких напряжений. Оно осуществляется от емкостных *TV*, для которых используются конденсаторы связи высокочастотных каналов связи по проводам линий. Очевидно, для защиты необходимо иметь эти емкостные *TV* на всех трех фазах.

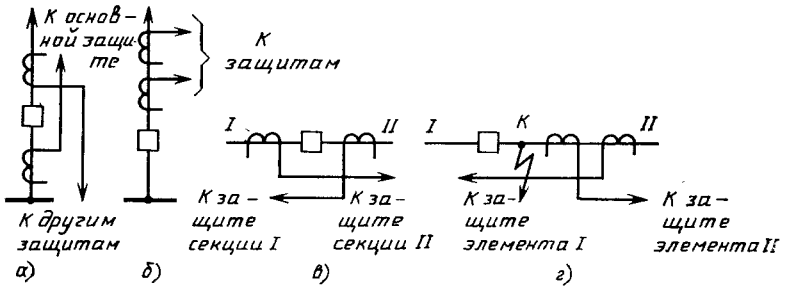


Рис. 3.27. Вариаиты мест включения *ТА*

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют основные виды ИП тока и напряжения?
2. Приведите схему замещения *ТА* с нагрузкой и векторную диаграмму.
3. Какие различают погрешности *ТА*?
4. В чем отличие предельной номинальной кратности *ТА* от предельной кратности K_{10}?
5. Какие применяются основные схемы соединений ИП тока и напряжения и цепей ИО защиты?

Глава четвертая

ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

4.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Оперативным называется ток, при помощи которого производится управление первичной коммутационной аппаратурой (выключателями, отделителями и т. д.), а также питание цепей релейной защиты, автоматики, разных видов управления и сигнализации. Источники оперативного тока должны быть готовы к действию во всех необходимых случаях, в том числе при КЗ на элементах защищаемой установки (когда напряжение на ней может снижаться до нуля). Используются два вида оперативного тока — постоянный и переменный.

4.2. ОПЕРАТИВНЫЙ ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Источниками постоянного тока являются аккумуляторные батареи (рис. 4.1), централизованно питающие оперативные и другие цепи (например, в защите — активные элементы ее органов, аварийное освещение и т. д.). Рабочее напряжение аккумуляторной батареи 220—110 В.

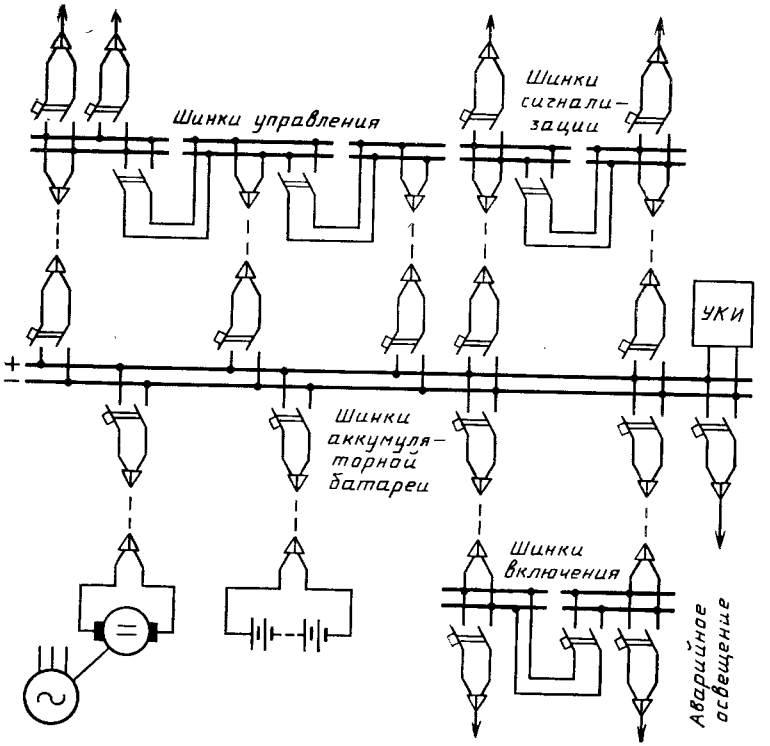


Рис. 4.1. Схема сети оперативного постоянного тока (УКИ — устройство контроля изоляции)

Ранее применявшиеся напряжения 24—48 В в настоящее время не рекомендуются. Для повышения надежности сеть оперативного тока секционируется на ряд участков, имеющих самостоятельное питание от сборных шин батареи. Наиболее ответственными являются шинки управления, к которым подключаются устройства защиты, автоматики, управления. Все указанные шинки функционального назначения также секционируются с возможностью их объединения рубильниками. От КЗ цепи защищаются автоматическими выключателями или предохранителями, причем на каждый выключатель питание подается через отдельные автоматические выключатели или предохранители (на рис. 4.1 не показаны): их исправность контролируется в схеме управления выключателя. В связи с этим по катушке отключения включенного выключателя циркулирует небольшой ток, недостаточный для его срабатывания (см., например, [47]). Для обеспечения долговечности батареи должен соблюдаться необходимый режим ее заряда, подзаряда и разряда. Для этого используются автоматически регулируемые источники — двигатель-генераторы или в последнее время выпрямительные установки.

Наиболее частым видом повреждений в сетях оперативного постоянного тока являются замыкания на землю в одной точке. Оно опасно тем, что при его длительном существовании возможно замыкание на землю во второй точке провода того же полюса, которое в случае шунтирования, например, контакта в цепи управления отключением выключателя приведет к его ложному отключению. Поэтому считается обязательной установка на шинах батареи устройства контроля изоляции, работающего на сигнал. В связи с учетом соображений, приведенных в немецкой литературе 30-х годов, в СССР принято непосредственно подводить к элементам схем управления (например, электромагниту отключения выключателя) напряжение от шинки «минус».

Аккумуляторные батареи являются надежными источниками питания, работа которых не зависит от состояния основной системы. Однако они дороже других источнико питания, требуют специального помещения и квалифици рованного обслуживания. Кроме того, в связи с централи зацией питания необходима сложная дорогостоящая сет постоянного тока, сама требующая ряда защит. Поэтом оперативный постоянный ток в первую очередь использу ется на электроустановках, где батареи требуются дл

включения мощных выключателей с электромагнитными приводами, а также и для ряда других нужд (например, на тепловых станциях, мощных гидроэлектростанциях и подстанциях).

На рис. 4.2 в виде примера приведена однолинейная совмещенная схема токовой защиты, осуществленная реле тока КАТ с выдержкой времени и учитывающая приведенные соображения.

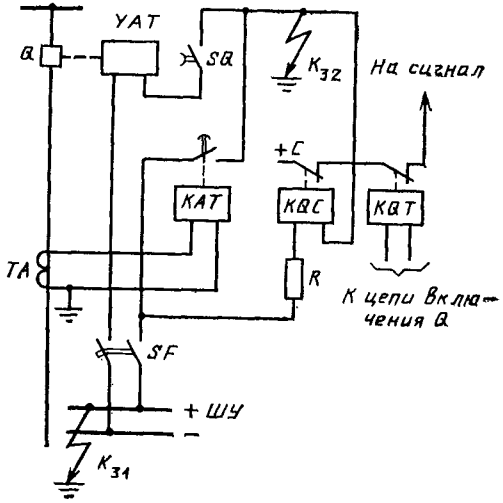


Рис. 4.2. Однолинейная схема максимальной токовой защиты на оперативном постоянном токе

4.3. ОПЕРАТИВНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

В данном случае энергия отбирается от элементов электроустановки. При этом условно говорят, что источниками переменного тока могут быть *TA*, *TV* и трансформаторы собственных нужд, включаемые соответственно на токи и напряжения элементов защищаемой установки.

Трансформаторы тока могут являться надежными источниками питания защит только от повреждений, сопровождающихся значительными токами, когда *TA* в состоянии отдавать мощность, достаточную прежде всего для работы привода выключателя. Использование *TA* оказывается невозможным, например, при $K_з^{(1)}$, характеризующихся весьма малыми токами замыкания на землю, а

также для оперативного управления в рабочих режимах. Трансформаторы собственных нужд и *TV* в общем случае, наоборот, непригодны для питания защит от КЗ, сопровождающихся снижением напряжения до нуля, и могут применяться для управления в режимах, характеризуемых $U_{мф}$, близкими к рабочим (например, $K_з^{(1)}$, рабочие режимы). Все рассматриваемые трансформаторы могут также использоваться не непосредственно, а для предварительного заряда специальных конденсаторов. Энергия, запасаемая в этих конденсаторах, используется как для действия защит при любых видах повреждений, так и для работы при исчезновении напряжения на установке.

Таким образом, перечисленные источники питания не являются универсальными, как аккумуляторная батарея, а имеют свои ограниченные области применения. Поэтому на практике часто используется несколько раздельных источников оперативного переменного тока или комбинированные устройства.

Ниже коротко рассматриваются следующие схемы использования оперативного переменного тока; с дешунтированием катушки отключения привода выключателя; с блоками питания выпрямленным током, напряжением; с предварительно заряжаемыми конденсаторами; с реле прямого действия.

Схема с дешунтированием катушки отключения. На рис. 4.3 приведена в однолинейном виде совмещенная схема токовой защиты с реле тока *KAT* с выдержкой времени, имеющим специальный переключающий контакт без разрыва цепи. В рабочих режимах и процессе срабатывания *KAT* размыкающей частью своего контакта, имеющей

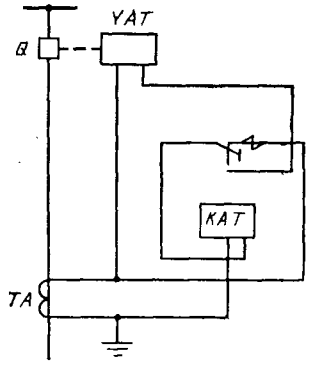


Рис. 4.3. Однолинейная схема максимальной токовой защиты на оперативном переменном токе с дешунтированием катушки электромагнита привода выключателя

большую отключающую способность (с дугогасящим устройством), шунтирует цепь катушки отключения *YAT* выключателя (нормально разорвана замыкающей частью контакта). Нагрузка *TA* определяется при этом относительно небольшой мощностью цепи обмотки *KAT*, и *TA* работает с необходимой точностью (в расчетном режиме $\varepsilon \leqslant 10\ \%$). Замыкающая часть контакта реле повышает надежность шунтирования (например, при случайных кратковременных его нарушениях, больших токах). После срабатывания защиты *YAT* включается последовательно с обмоткой реле, и через нее проходит полный вторичный ток *TA*, определяющий отключение выключателя. При этом *TA* может сильно перегружаться, работая в режиме, близком к отдаче максимальной мощности, с погрешностями, много большими 10 %. Однако для срабатывания защиты это уже несущественно; необходимо только, чтобы I_2 был не меньше тока срабатывания *YAT* и не стал меньше тока возврата реле тока *KAT*. В данной схеме, как и в других с оперативным током от *TA* защищаемого элемента, не требуется заводить отключающую цепь через контакт привода выключателя (необходимую в схеме на рис. 4.2), так как с отключением последнего исчезает и отключающий ток, который мог бы утяжелять возврат контакта реле в исходное положение. При отсутствии у используемых основных органов защиты специальных переключающих контактов на выходе схем могут устанавливаться специальные промежуточные реле, выполняемые с таким контактом.

Достоинством рассмотренной схемы с дешунтированием является ее относительная простота. Выпускаемые промышленностью специальные реле тока и промежуточные реле имеют контакт, способный переключать ток до 150 А при условии, что сопротивление управляемой цепи не превышает 4,5 Ома при токе 3,5 А. С учетом мощностей, которые могут отдавать *TA*, и приведенных выше данных схемы могут применяться в сетях с $U_{ном}$ до 35 кВ при пружинных приводах у выключателей, а также на подстанциях 110—220 кВ с короткозамыкателями и отделителями. Однако со все более широким внедрением интегральной микроэлектроники, в том числе и на электроустановках с $U_{ном} < 35$ кВ, применение рассмотренной схемы сокращается.

Схемы с блоками питания выпрямленным током. Под ними понимаются устройства, питаемые от *TA*, *TV* или

трансформаторов собственных нужд, выпрямляющие ток, напряжение и обеспечивающие напряжение, используемое для питания оперативных цепей. Блоки делятся на токовые (БПТ), напряжения (БПН) и комбинированные, состоящие из БПТ и БПН, работающих параллельно на стороне выпрямленного напряжения. Блоки питания должны выполняться так, чтобы напряжение на их выходе поддерживалось во всех расчетных режимах достаточно стабильным. Подводимые к блокам питания токи и напряжения могут при КЗ, как известно, изменяться в широких пределах. Поэтому для выполнения указанного требования должна осуществляться стабилизация напряжения. Она может выполняться по-разному. Исследования и разработки, проводившиеся в течение ряда лет во ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд и др.) по проблеме создания оптимальных устройств питания защит переменным оперативным током [48, 49], установили целесообразные схемы выполнения стабилизации. Для БПТ рекомендуется использование параллельного феррорезонансного контура, для БПН — часто дросселей насыщения. Однако при осуществлении защит с использованием элементов интегральной микроэлектроники необходимо еще дополнительное сглаживание выпрямленного напряжения. Возможная достаточно универсальная и экономичная структурная схема комбинированного блока питания приведена на рис. 4.4. В ней БПТ включается на разность токов двух фаз и БПН — на напряжение между этими фазами. В этой схеме БПН обеспечивает, в частности, необходимое выпрямленное напряжение при замыканиях между двумя фазами за силовым трансформатором с соединением обмоток У/Д или Д/У, а также при однофазном КЗ за трансформаторами с соединением обмоток У/У с нулевым проводом (K_U=380/220), когда (см. гл. 1) разность токов с питающей стороны может быть равна нулю, но междуфазное напряжение, им соответствующее, близко к рабочему. Иногда схема дополняется вторым БПТ в третьей фазе.

Принципиальными преимуществами рассматриваемых блоков питания являются возможность осуществления индивидуального питания оперативным током одного защищаемого присоединения и отсутствие широко разветвленной (как при общей аккумуляторной батарее) сети оперативного тока. Однако при значительном числе присоединений экономически целесообразным оказывается групповое питание (например, элементов секции шин).

В этом случае оперативные цепи защит элементов защищаются отдельными автоматическими выключателями или предохранителями.

Существенным достоинством рассматриваемого способа питания является также возможность применения защитной аппаратуры, изготовляемой для установок с аккумуляторными батареями.

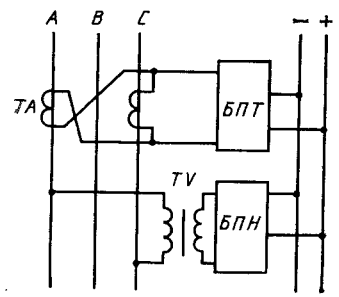


Рис. 4.4. Структурная схема комбиинированного блока питания оперативным выпрямленным током

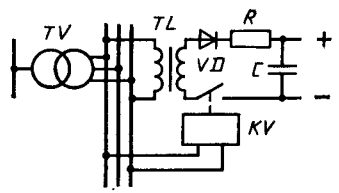


Рис. 4.5. Принципиальная схема источника оперативного переменного тока с использованием предварительно заряженных конденсаторов

Имеются, однако, и ограничения по его использованию. К ним следует отнести следующие:

1) недостаточная мощность для питания катушек включения электромагнитных приводов (обычно осуществляется от выпрямительных блоков, питаемых от трансформаторов собственных нужд подстанции);

2) невозможность использования для минимальных защит напряжения, а также при отключении подстанции с упрощенной схемой соединений со стороны высшего напряжения для управления отделителями в бестоковую паузу;

3) необходимость отдельных сердечников *TA*, когда требуется большая отдаваемая ими мощность;

4) необходимость тщательного анализа условий работы сети, питающей подстанцию, и ее схемы электрических соединений, с тем чтобы принять меры к исключению случаев, при которых будет нарушаться нормальное питание оперативным током [49].

Схемы с блоками питания выпрямленным током широко применяются на понижающих подстанциях с $U_{ном}\leqslant$

$\leqslant$35 кВ, а также на подстанциях с $U_{ном}=110\div220$ кВ с упрощенными схемами электрических соединений со стороны высшего напряжения (не имеющих выключателей на этом напряжении). Некоторые из перечисленных недостатков могут быть устранены при одновременном использовании энергии предварительно заряжаемых конденсаторов.

Следует отметить, что принципы, заложенные в БПТ, применяются также для логических реле (времени, промежуточных), работающих на оперативном токе, получаемом от *ТА* (например, для схем с дешунтированием).

Схемы с предварительно заряженными конденсаторами. Возможная структурная схема источника питания от предварительно заряженных конденсаторов приведена на рис. 4.5. Она состоит из зарядного устройства (УЗ), условно показанного на схеме промежуточным трансформатором *TL*, и блока конденсаторов *С*, заряжаемого через выпрямитель *VD*. Для предотвращения разряда конденсаторов *С* через обратное сопротивление выпрямителя *VD* блок конденсаторов автоматически отсоединяется от зарядного устройства замыкающим контактом минимального реле напряжения *KV* при значительном понижении выходного напряжения УЗ. Запасаемая в конденсаторах энергия $W=0{,}5\ CU^2$, где U — выпрямленное напряжение (обычно 380—400 В). Основным достоинством рассматриваемого источника питания является возможность отключения выключателей с любыми тяжелыми приводами, а также возможность проведения оперативных операций на подстанции, потерявшей питание (например, отключение отделителей в бестоковую паузу). Принципиальный недостаток — импульсность действия — определяется быстрым разрядом блока конденсаторов на включаемую нагрузку. С учетом этого каждый элемент, потребляющий энергию, при общем зарядном устройстве должен присоединяться к отдельному блоку конденсаторов, которые разделяются диодами или контактными устройствами. Обычно предпочтение отдается первому способу.

Наиболее простым зарядным устройством являются *TV* или трансформатор собственных нужд установки, подающие питание на заряд через промежуточные *TL*. Они позволяют осуществлять заряд в нормальном рабочем режиме. Однако такой способ заряда может не обеспечивать действия защиты при КЗ на установке, бывшей до этого полностью обесточенной. Поэтому в свое время Горэнерго

(А. А. Воскресенский) было предложено заряжать конденсаторы и от *ТА*, через которые в указанном случае должен проходить ток КЗ. С учетом этого в настоящее время в качестве зарядных устройств часто используются комбинированные блоки питания, включающие БПТ и БПН. Эти комбинированные блоки иногда используются как для питания устройств защиты, так и для заряда конденсаторных батарей.

Как указывалось выше, конденсаторные блоки питания непригодны или мало пригодны для органов защиты, работающих со значительным замедлением. Поэтому основной областью их применения является питание цепей отключения выключателей и отделителей.

Схемы с реле прямого действия. Защиты с реле прямого действия также могут быть условно отнесены к работающим на оперативном переменном токе. Простота и автономность защит с реле прямого действия обусловливают продолжающееся их использование для осуществления, например, токовых защит, если их параметры и погрешности являются приемлемыми.

4.4. ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА ЗАЩИТ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ (ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ) ЭЛЕМЕНТНУЮ БАЗУ

Устройства релейной защиты, использующие интегральную микроэлектронику (ИМЭ), требуют источников питания с постоянным напряжением нескольких уровней и высокой степенью его стабилизации, особенно для измерительных органов. Так, например, для широко применяемых в настоящее время операционных усилителей (ОУ) требуется напряжение ±15 В, логические интегральные микросхемы (ИМС) выпускаются на напряжение питания $+5$, $+9$, $+15$ В.

В качестве источников питания с такими напряжениями наибольшее распространение получили полупроводниковые преобразователи постоянного напряжения 110—220 В в постоянные напряжения необходимых уровней. Входное напряжение 110—220 В с помощью транзисторных инверторов преобразуется в переменное напряжение; последнее обратно преобразуется в постоянные напряжения, которые сглаживаются стабилизаторами напряжения. Рассмотренные преобразователи часто обеспечивают питание защиты или комплекта защит присоединения.

На электроустановках с централизованным источником оперативного тока — аккумуляторной батареей—рассматриваемые полупроводниковые преобразователи, обычно являющиеся частью комплектной защиты, питаются от сети постоянного тока 110—220 В. Необходимо подчеркнуть, что в отличие от электромеханических защит полупроводниковые являются постоянными (в том числе и в нормальных режимах работы) потребителями энергии, в целом на мощных электроустановках значительной. В связи с этим рассматривался и вариант питания отдельных комплектов полупроводниковых защит не по сети постоянного тока 110—220 В, а по сети переменного тока 380 В с соответствующими преобразователями по концам для уменьшения потерь в сети. Однако он применения не получил.

Преобразователи на установках с переменным оперативным током могут получать питание и от комбинированных блоков питания (сочетания БПТ и БПН). Выпрямленное напряжение этих блоков может использоваться в соответствии с рассмотренными выше условиями. При этом особое внимание уделяется сглаживанию выпрямленного напряжения.

4.5. УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Существует, как известно, большое число разных приводов выключателей (см., например, [47]). Все они имеют, однако, электромагниты отключения. Время отключения КЗ складывается из времен срабатывания защиты и выключателей. В последнее существенной частью входит время работы электромагнита отключения. Поэтому для быстродействующих защит линий сверхвысоких и ультравысоких напряжений кроме сигналов, подаваемых выходными органами защиты непосредственно на электромагниты отключения, начали предусматривать управление ими с помощью тиристоров, на которые подаются сигналы сработавшей защиты. Это дает возможность уменьшить время отключения КЗ на несколько десятков миллисекунд, что может быть достаточно существенно. Возможный вариант такого управления, разработанный в ЭСП (Е. В. Лысенко), рассмотрен в [48].

Вопросы для самопроверки

1. Какие источники оперативного тока применяются для релейной защиты, их особенности?
2. На каких электроустановках преимущественно используется оперативный постоянный ток?

Глава пятая

ТОКОВЫЕ И ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

5.1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ТОКОВЫМ И ТОКОВЫМ НАПРАВЛЕННЫМ ЗАЩИТАМ

Токовыми называются защиты с относительной селективностью, реагирующие на ток, проходящий по защищаемому элементу. *Токовыми направленными* называются защиты также с относительной селективностью, реагирующие на ток и направление (знак) мощности КЗ в месте их включения. Таким образом, вторая защита отличается от первой наличием дополнительного ИО, называемого органом направления мощности (ОНМ). Токовые защиты могут использоваться на любых элементах электроэнергетических систем (линиях, двигателях, трансформаторах и т. д.), токовые направленные — на линиях, трансформаторах и в других случаях. В некоторых случаях, например на линиях, обе разновидности защит применяются одновременно, но на разных сторонах защищаемого элемента. В данной главе рассматривается их работа применительно к защитам линий.

Защиты могут срабатывать при превышении током в месте их включения заранее установленного значения (максимальные защиты). В общем случае они выполняются со ступенчатыми, плавными (зависимыми) или комбинированными характеристиками выдержки времени $t=f(l)$, где l — расстояние от места включения защиты до точки возникновения КЗ. Для сетей с $U_{ном} \geqslant 35 \div 110$ кВ защиты обычно имеют ступенчатые характеристики $t=f(l)$, для сетей более низких напряжений часто используются другие характеристики, создаваемые специальным выполнением органа тока. При $U_{ном} \leqslant 35$ кВ для ИО тока используются полные токи в двух фазах (для обеспечения отключения при $K_{дв}^{(1,1)}$ по возможности только одного ме-

ста повреждения). В сетях с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ защиты преимущественно предназначаются для ликвидации только КЗ на землю ($K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$) и выполняются как защиты нулевой последовательности; для них требуются *ТА* в трех фазах, которые включаются так, чтобы иметь ток в ИО $I_р = 3I_0$. Используются иногда схемы с включением ИО на другие симметричные составляющие, а также с дополнительными ИО напряжения.

Типичными являются защиты со ступенчатыми характеристиками $t = f(l)$. *Током срабатывания защиты* или ее отдельных ступеней $I_{с.з}$ обычно называется минимальный ток в фазах линии, при котором защита (ее ступень) может срабатывать. Уточнение этого определения дано в § 5.2. Логическое уравнение, характеризующее работу трехступенчатых токовых ненаправленных защит (см. гл. 1), имеет вид $y = I^{I}_{с.з} D_t^{\uparrow I} + I^{II}_{с.з} D_t^{\uparrow II} + I^{III}_{с.з} D_t^{\uparrow III}$, для токовых направленных защит $y = SI^{I}_{с.з} D_t^{\uparrow I} + SI^{II}_{с.з} D_t^{\uparrow II} + SI^{III}_{с.з} D_t^{\uparrow II}$ или при общем ОНМ $y = S(I^{I}_{с.з} D_t^{\uparrow I} + I^{II}_{с.з} D_t^{\uparrow II} + I^{III}_{с.з} D_t^{\uparrow III})$. Действие токовой защиты рассматривается в первую очередь на примере ее применения для радиальной сети с односторонним питанием (рис. 5.1, *а*). Устройства защиты включаются только со стороны питания всех элементов и могут действовать на отключение своих выключателей. Примерные характеристики выдержек времени защит *1′*, *2′* и *3′*

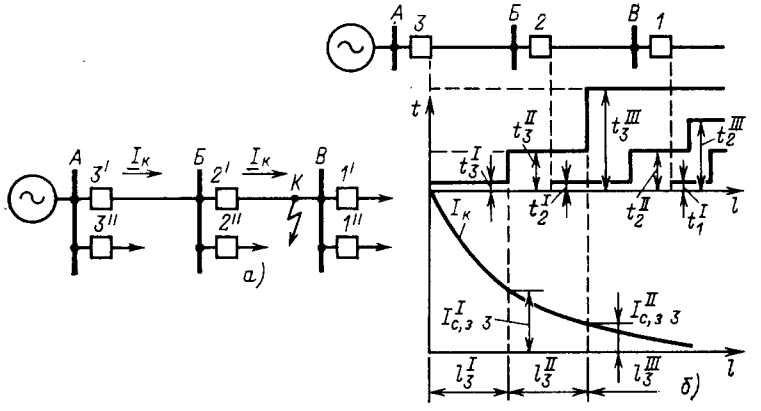


Рис. 5.1. Размещение токовых защит со ступенчатыми выдержками времени в радиальной сети с односторонним питанием (*а*) и примерный выбор их характеристик выдержек времени (*б*)

даны на рис. 5.1, *б*. Действие токовой направленной защиты в первую очередь рассматривается на примере ее применения для цепочки одиночных линий с двусторонним питанием (рис. 5.2). Защиты *1—6*, как и выключатели, должны включаться с обеих сторон участков, связывающих подстанции *А* и *Г*, имеющие источники питания. Первые две ступени необходимы для защиты всей длины участка, третья — для резервирования отключения КЗ на смежных участках и в зонах действия первых двух ступе-

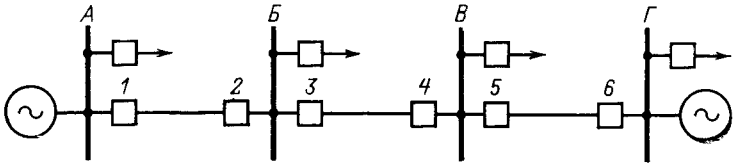


Рис. 5.2. Цепочка линий с двусторонним питанием

ней. Действие II и III ступеней защиты как резервных для своего участка отмечено на рис. 5.1, *б* пунктиром. Органы направления мощности могут требоваться, как будет рассмотрено ниже, только у части ступеней. Основными параметрами защит, требующими определения, являются токи срабатывания $I_{с.з}$ и выдержки времени отдельных ступеней. Ниже они определяются для токовых защит и уточняются для направленных. Определяются также защищаемые зоны и коэффициенты чувствительности отдельных ступеней. Рассмотрение оказывается целесообразным начинать с последних (третьих) ступеней, в частности потому, что они часто используются отдельно — в качестве самостоятельных защит. При включении на полные токи фаз они называются *максимальными токовыми защитами,* а при дополнении их органами направления мощности — *максимальными токовыми направленными* защитами.

5.2. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

Логическое уравнение, характеризующее работу защиты, $y = I_{с.з} D_t^{\uparrow}$. Током срабатывания защиты $I_{с.з}$ обычно называется минимальный ток в фазах линии, при котором защита может срабатывать. *Током срабатывания ИО тока* $I_{с.р}$ называется минимальный ток в ИО, при котором он срабатывает. При обычно применяемых органах тока, пи-

таемых от вторичных обмоток TA с коэффициентом трансформации $K_{I\text{ном}}$, эти токи различны вследствие того, что $K_{I\text{ном}} \neq 1$, и вследствие возможного неравенства $I_р$ и тока I_2 в TA. Так, например, при включении на разность токов двух фаз в симметричном режиме $I_р^{(3)} = \sqrt{3} I_2^{(3)}$ (см. гл. 3). В общем случае отличие $I_р$ от I_2 характеризуется *коэффициентом* схемы в m-м режиме $k_{сх}^{(m)} = I_р^{(m)} / I_2^{(m)}$. С учетом сказанного $I_{с,з}^{(m)} = K_{I\text{ном}} I_{с,р}^{(m)} / k_{сх}^{(m)}$. Поэтому если $I_{с,р}^{(m)}$ не зависит от вида повреждения (например, орган с одной воздействующей величиной $I_р$), то $I_{с,з}^{(m)}$ может от вида повреждения зависеть.

Током возврата защиты $I_{в,з}$ называется максимальный ток в фазах линии, при котором защита возвращается в исходное состояние, а *током возврата ИО тока* $I_{в,р}$ — максимальный ток в ИО, при котором он возвращается в исходное состояние.

Коэффициент возврата ИО тока $k_в = I_{в,р} / I_{с,р} = I_{в,з} / I_{с,з}$. Органы тока максимальные, и для них $k_в < 1$.

В настоящее время органы тока иногда выполняются односистемными с переключением подводимых воздействующих величин токов фаз с помощью максиселекторов, операционных усилителей и т. д. (см. гл. 3), обеспечивающих реагирование единственного органа тока на больший из токов, подводимых к нему от TA. Для этого случая под $I_{с,з}$ должен пониматься не минимальный, а максимальный из токов фаз, используемых для защиты, но в режиме, соответствующем минимальному уровню токов в защищаемой линии, при котором защита срабатывает. Ток $I_{с,р}$ такого органа будет определяться этим $I_{с,з}$ с учетом того, что $k_{сх} = 1$. Соответственно уточняется и определение для $I_{в,з}$.

Выдержки времени защит. Они выбираются по ступенчатому принципу, согласно которому должны быть больше максимальной выдержки времени предыдущих защит на ступень Δt (см. гл. 1) при отсутствии УРОВ (устройства резервирования при отказе выключателя предыдущего элемента, гл. 15) или на $\Delta t + t_{уров}$ при наличии последнего. Необходимо отметить, что УРОВ в распределительных сетях с максимальной токовой защитой обычно не применяется.

Выбор выдержек времени всегда должен начинаться с защит элементов сети, наиболее удаленных от источника питания, т. е. с защит $1'$ и $1''$ на подстанции B (рис. 5.3). В общем случае эти защиты уже имеют выдержки времени t_1' и t_1'', обеспечивающие их селективность несрабатывания при КЗ в питаемых от подстанции B потребителях. Выдержка времени t_2' последующей защиты (на подстанции $Б$) выбирается больше максимальной выдержки времени защит подстанции B. Если, например, $t_1' > t_1''$, то $t_2' > t_1'$. Аналогично, если $t_2' > t_2''$, то выдержка времени защиты 3 на подстанции A $t_3 > t_2''$. В общем случае для n-й защиты соответственно при отсутствии или наличии УРОВ на предыдущей подстанции

$$t_n = t_{(n-1)max} + \Delta t \quad \text{или} \quad t_n = t_{(n-1)max} + \Delta t + t_{(n-1)уров}. \qquad (5.1)$$

Ток срабатывания. Он всегда должен быть больше максимального рабочего тока в защищаемой линии. Однако, как правило, $I_{с,з}$ определяется более тяжелыми условиями. Их может быть несколько. Для определения $I_{с,з}$, например, защиты 3 (рис. 5.3) рассматривается ее поведение в двух, часто основных случаях [10]: при КЗ на одном из элементов, питаемых от подстанции $Б$, и при КЗ на данном участке $АБ$, его отключении и последующем АПВ.

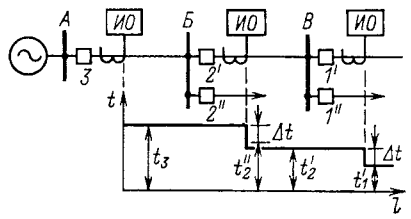


Рис. 5.3. Согласование независимых характеристик выдержек времени последних ступеней токовых защит

В первом случае своей защитой отключается поврежденный элемент подстанции $Б$. Защита 3, находящаяся под воздействием тока $I_к'$ (рис. 5.4, $а$) и имеющая выдержку времени $t_3 > t_2$, срабатывать не успевает и должна возвратиться в исходное состояние. Это, однако, произойдет, только если ее ток возврата $I_{в,з}$ в рассматриваемом уже симметричном режиме будет больше расчетного тока запуска $I_з'$, проходящего по участку $АБ$ к оставшимся в работе элементам подстанции $Б$ (см. рис. 5.3). Принимая с запасом

$I'_{з,расч}=I'_{зmax}$ (см. рис. 5.4, *а*), получаем условие возврата: $I_{в,з}>I'_{зmax}$.

При определении $I'_{зmax}$ обычно предполагается, что отключенный элемент подстанции *Б* мог передавать относительно малую мощность, а электродвигатели других ее элементов в результате снижения напряжения при КЗ сильно затормозились и ток в них при восстановлении напряжения (после отключения КЗ) временно увеличился (процесс самозапуска). Поэтому $I'_{зmax}$ часто оказывается значительно большим $I_{раб\,max}$ в линии *АБ*. *Вводя коэффициент запуска* $k'_з>1$, учитывающий как токи запуска, так и отключение нагрузки поврежденного элемента подстанции *Б*, получаем $I'_{зmax}=k'_з I_{раб\,max}$. Неточность расчета и другие факторы учитываются *коэффициентом отстройки* $k'_{отс}>1$. С учетом изложенного получаем $I_{в,з}=k'_{отс}k'_з I_{раб\,max}$. Отношение $I_{в,з}/I_{с,з}$ равно $k_в$. Поэтому

$$I_{с,з}\geqslant k'_{отс}\,k'_з\,I_{раб\,max}/k_в. \qquad (5.2)$$

Во втором случае после отключения поврежденного участка *АБ* ток $I''_к$ в защите *3* исчезает (рис. 5.4, *б*) и она возвращается в исходное состояние. После успешного АПВ участка *АБ* в защите *3* появляется ток запуска $I''_з$, определяемый оставшимися включенными элементами подстанции *Б*. Выражая $I''_з$ через $I_{раб\,max}$ линии *АБ* и коэффициент запуска $k''_з$, получаем выражение для отстройки от него:

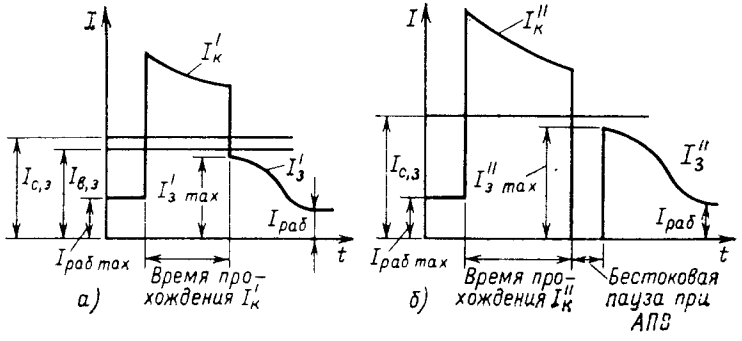


Рис. 5.4. Токи в защите:

а — при внешнем КЗ; *б* — при внутреннем КЗ и АПВ

$$I_{с,з}\geqslant k''_{отс}\,k''_з\,I_{раб\,max}. \qquad (5.3)$$

Третьим условием является согласование по чувствительности (по токам срабатывания). По нему каждая последующая защита должна иметь $I_{с,з}$ бóльший, чем у предыдущих. С учетом этого

$$I_{с,зn}\geqslant k'''_{отс}\,I_{с,з(n-1)max}. \qquad (5.4)$$

Коэффициент отстройки $k'''_{отс}>1$ должен, в частности, учитывать, что полный ток $I_{кn}$ в *n*-й защите будет больше тока $I_{к(n-1)}$ в $(n-1)$-й защите за счет ответвления его части в неповрежденные элементы промежуточной подстанции. При несоблюдении такого согласования и, например, КЗ на $(n-2)$-м элементе с отказом его выключателя может излишне срабатывать защита *n*-го, а не $(n-1)$-го элемента [10].

Ток срабатывания защиты выбирается бóльшим из трех приведенных выражений. При этом учитывается ряд соображений: 1) для первых защит в системе (защит непосредственно токоприемников) должно учитываться только второе условие (5.3), относимое и к случаю включения токоприемника в работу; 2) коэффициенты $k'_з$ и $k''_з$ могут быть много больше 1 (примерно до 2—5), причем $k''_з>k'_з$; 3) третье условие (5.4) для защит радиальных сетей с односторонним питанием (рис. 5.3) часто не является расчетным так как участки сети по мере приближения к источнику питания имеют все бóльшие $I_{раб\,max}$ (в других случаях, рассмотренных ниже, оно, однако, может быть определяющим); рассмотренные условия могут быть более тяжелыми, если на линиях, как часто бывает в распределительных сетях, имеются ответвления с нагрузками, а также если учитывать броски токов намагничивания понижающих трансформаторов. Могут быть и некоторые другие расчетные режимы, например автоматическое подключение к шинам *Б* (рис. 5.3) других потребителей, лишившихся питания. Поэтому коэффициенты отстройки $k'_{отс}$, $k''_{отс}$ и $k'''_{отс}$ выбираются с учетом конкретных имеющихся условий.

Чувствительность. Она характеризуется коэффициентом чувствительности $k_ч$, определяемым (см. гл. 1) при переходном сопротивлении в месте повреждения $R_п=0$ по выражениям $k_ч=I_{к\,min\,(R_п=0)}/I^{(m)}_{с,з}$ или $k_ч=I_{р\,min\,(R_п=0)}/I_{с,р}$. Для исполнений, при которых $k^{(m)}_{сх}=1$, оба выражения одина-

ково удобны; если $k_{сх}^{(m)} \neq 1$, предпочтение отдается второму выражению с учетом того, что в этом случае $I_{с.з}^{(m)}$ зависит от конкретного значения $k_{сх}^{(m)}$.

Для сравнительной оценки чувствительности данной схемы включения органов тока при различных видах КЗ иногда используется *относительный коэффициент чувствительности* [10]. Он определяется при искусственном предположении равенства первичных токов при всех учитываемых видах КЗ. При m-м их виде он определяется по выражению $k_{ч,отн} = k_ч^{(m)}/k_ч^{(3)} = I_р^{(m)}/I_р^{(3)} = k_{сх}^{(m)}/k_{сх}^{(3)}$, где $I_р^{(m)}$ и $I_р^{(3)}$ — токи в органе тока соответственно при данном виде КЗ и при $K^{(3)}$ в предположении одинаковых значений первичных $I_к$, а $k_{сх}^{(m)}$ и $k_{сх}^{(3)}$ — соответствующие им коэффициенты схемы. Когда $k_{сх}^{(m)} = k_{сх}^{(3)}$, $k_{ч,отн} = 1$. Считается необходимым иметь $k_{ч\,min} \approx 2$ при повреждении в конце защищаемого участка и $k_{ч\,min} \approx 1{,}25$ при повреждении в конце смежного элемента.

Особенности выполнения защиты с зависимыми характеристиками выдержки времени. Применительно к плавнозависимым характеристикам $t = f(I)$ n-я защита участка $АБ$ (рис. 5.5) должна иметь выдержку времени t_n по вы-

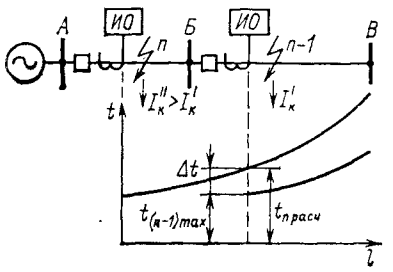


Рис. 5.5. Согласование плавнозависимых характеристик выдержек времени токовых защит

ражению (5.1), например, на ступень Δt больше времени $t_{(n-1)max}$ предыдущей $(n-1)$-й защиты при КЗ в расчетной точке — в начале следующего элемента за $ТА$ его защиты при максимально возможном токе $I'_{к,вн}$. По найденному $t_{расч}$, соответствующему $I_р = k_{сх} I'_{к,вн}/K_{Iном}$, однозначно по обычно имеющемуся семейству характеристик $t = f(I_р)$ используемого органа тока выбирают характеристику n-й защиты и получают выдержки времени для других мест

и значений токов КЗ. По мере приближения места КЗ к источнику питания $I_к$ увеличиваются, а время срабатывания защиты снижается. При больших кратностях токов внешних КЗ получение необходимого Δt может оказаться затруднительным. Это исключается при использовании органов с ограниченно-зависимыми характеристиками. Однако при этом начинает теряться указанное выше преимущество — снижение времени отключения КЗ, близких к месту включения защиты.

Оценка и области применения защиты. Основным преимуществом защиты является ее простота, особенно при использовании реле тока с ограниченно-зависимыми характеристиками, работающими на оперативном переменном токе. Она широко применяется в распределительных сетях с $U_{ном} \leqslant 10$ кВ и для защиты токоприемников (например, двигателей). Для последних она выполняется без выдержки времени. В сетях она дополняется *токовой отсечкой* (см. § 5.5), часто встраиваемой в реле тока с выдержкой времени для ускорения отключения наиболее тяжелых для системы КЗ, возникающих вблизи места включения защиты. Максимальные токовые защиты являются также, как указывалось выше, последними (III) ступенями защит со ступенчатыми характеристиками выдержки времени. С таким назначением они иногда используются совместно с токовыми направленными защитами и в сетях более сложной конфигурации, иногда даже с несколькими источниками питания. Однако часто полной селективности при внешних КЗ они обеспечивать уже не могут.

5.3. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

Логическое уравнение, характеризующее работу защиты, $y = SI_{с.з} D_t^{\uparrow}$.

Выдержки времени. Они выбираются согласно *встречно-ступенчатому принципу*, по которому все защиты цепочки линий (рис. 5.6, *а*) разделяются по направленности действия на две группы (защиты *2*, *4*, *6* и *5*, *3*, *1*), в каждой из которых выдержки времени устанавливаются уже, как у ненаправленных защит, по ступенчатому принципу по выражениям (5.1). На рис. 5.6, *б* приведены выдержки времени, выбранные по рассматриваемому принципу. Как видно, КЗ в любом месте правильно ликвидируется защитами двух сторон только поврежденного участка; так, например, при КЗ на участке $БВ$ срабатывают только защиты *3* и *4*.

Необходимость в органах направления мощности. При выбранных указанным способом выдержках времени не все защиты сети должны иметь ОНМ. Рассмотрение показывает, что для приведенного на рис. 5.6 конкретного случая защита *6* может не иметь ОНМ, так как ее t_6 больше времен срабатывания других защит присоединений подстанции *Г*. По той же причине могут не иметь ОНМ защита *1* ($t_1 > t_A$, $t_1 > t_2$), а также защиты *3* и *4* ($t_3 = t_4$). Таким образом, на каждом участке сети обязательно должна иметь ОНМ только одна защита — с меньшей выдержкой времени. При одинаковых временах обе защиты могут быть ненаправленными. Это положение формулируется и так:

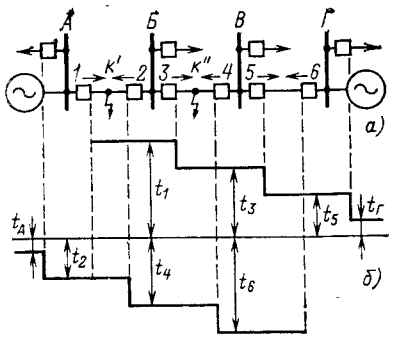


Рис. 5.6. Защищаемая сеть (*а*) и характеристики выдержек времени токовых направленных защит (*б*)

ОНМ может не иметь *n*-я защита подстанции с $t_n > t$ всех других защит подстанции. С учетом этого иногда используется возможность за счет повышения t_n иметь большее число защит ненаправленными. Логическое уравнение, характеризующее их работу, $y = I_{с,з} D_t^{\uparrow}$. Следует, однако, отметить, что часто в таких защитах предусматривается ОНМ, с тем чтобы при изменении уставок защит иметь возможность сделать их в случае необходимости направленными.

Ток срабатывания. Ток срабатывания $I_{с,з}$ выбирается вне зависимости от направления прохождения через нее (от шин или к шинам) мощности нагрузки $S_н$. Последняя, как и мощность КЗ, обычно имеет активно-индуктивный характер. Поэтому принципиально можно было бы иногда не учитывать токи $I_{раб}$, определяемые $S_н$, направленной к шинам. Принимается, однако, во внимание возможность нарушений цепей напряжения от *TV*, например перегорание части предохранителей в них, когда ОНМ может неправильно сработать при направлении $S_н$ к шинам. Когда это условие является расчетным, для повышения чувствительности защиты иногда допускается учитывать не $I_{раб\,max}$, а $I_{раб,норм}$, принимая во внимание малую вероятность нарушения цепей напряжения при наличии $I_{раб\,max}$. Более тяжелыми обычно являются условия, подобные рассмотренным выше для ненаправленных защит: 1) отстройка от переходных токов после отключения внешних КЗ по (5.2), где $I_{раб\,max}$ — максимальный рабочий ток в защите, определяемый при наличии ОНМ мощностью $S_{н\,max}$, которая может быть направлена от шин. В отличие от рассмотренного выше при этом не учитывается, как мало вероятное событие, наложение на рассматриваемый режим нарушения цепей напряжения ОНМ; 2) отстройка от переходных токов после успешного АПВ повредившейся линии по (5.3) с учетом соображений, приведенных для предыдущего случая; 3) согласование $I_{с,з}$ смежных участков. Оно должно проводиться для защит, имеющих возможность срабатывать при одинаковом направлении $S_к$.

Дополнительным условием является отстройка от токов неповрежденных фаз. При некоторых видах КЗ, например $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$, токи неповрежденных фаз, складывающиеся из $I_{раб}$ и токов повреждения в этих фазах, бывают большими (см. гл. 1). Органы направления мощности, включенные на эти токи, могут неправильно фиксировать знак мощности КЗ [1], поэтому было бы необходимо иметь $I_{с,з} > I_{неповр\,max}$; это может сильно загрублять защиту. В связи с изложенным в сетях с глухозаземленными нейтралями ($U_{ном} \geqslant$ $\geqslant$110 кВ) такая защита часто автоматически, при появлении составляющих I_0 в токах фаз, выводится из работы. Защита от $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ осуществляется тогда специальной токовой направленной защитой нулевой последовательности (см. § 5.9).

Ток $I_{с,з}$ выбирается по тому из условий, перечисленных выше, которое определяет большее его значение.

Чувствительность. Чувствительность последних ступеней защит определяется их ИО — тока и направления мощности. Чувствительность по току вычисляется, как и для ненаправленных защит. Необходимость проверки чувствительности по ОНМ возникает при близких металлических $K^{(3)}$, когда $U_р^{(3)}$ в пределе оказываются равными нулю. В этих условиях ОНМ могут отказывать в срабатывании, обусловливая и отказ защиты.

Нечувствительность, обусловленную ОНМ, характеризу-

ют *мертвой зоной* — долей длины защищаемого участка, в пределах которой при металлическом $K^{(3)}$ происходит отказ защиты из-за недостаточного остаточного напряжения, подводимого к ОНМ. Мертвые зоны в воздушных сетях маловероятны; более вероятны они в кабельных сетях при значительных выдержках времени срабатывания защиты вследствие возможного перехода $K^{(2)}$ и $K^{(1,1)}$ в $K^{(3)}$. Устранение мертвых зон возможно применением ненаправленных токовых отсечек. Более сложные решения вопроса, используемые в дистанционных защитах (см. гл. 6), для рассматриваемых защит обычно не применяются.

Пример применения максимальных токовых направленных защит в сочетании с ненаправленными для кольцевой сети с односторонним питанием (рис. 5.7). Выдержки времени выбираются обычным образом. Отличие имеется только для защит *2* и *5* приемных сторон головных участков *АБ* и *АВ*. При КЗ вне кольца, например в точке K_1 радиальной линии, отходящей от шин *А* с источником питания, ток повреждения (если пренебречь бросками токов, определяемых электродвигателями нагрузок подстанций *Б* и *В*) по кольцу не проходит и защиты *2* и *5* на рассматриваемые КЗ не реагируют. При внешних КЗ в пределах кольца (например, на шинах *Б* и *В*), как и в рабочих режимах, мощность КЗ направлена к шинам *Б* и *В* и ОНМ защит *2* и *5* не срабатывают. Таким образом, рассматриваемые защиты при всех внешних КЗ не работают и в связи с этим всегда выполняются без выдержки времени и не дополняются I и II ступенями. В данной сети очень четко проявляется необходимость согласования защит по чувствительности (током срабатывания) при *каскадном* их действии. Под каскадным понимается срабатывание защит двух сторон участка, когда одна из них начинает работать только после отключения другой защитой своего выключателя. При повреждении, например, в начале участка *АБ* у шин *А* (точка K_2) практически весь ток КЗ направляется к точке K_2 через защиту *1*. В результате защита *2* в начальный период КЗ в действие не приходит. Первой сработает защита *1*, хотя она и имеет одну из наибольших в сети выдержек времени. Защита *2* сработает *каскадно* только после отключения выключателя *1*. При КЗ в зоне его каскадного отключения может излишне сработать защита *4*, если ее $I_{с,з\,4} < I_{с,з\,2}$. Поскольку согласование сводится к выбору $I_{с,з\,4} \geqslant k''_{отс} I_{с,з\,2}$, где $k''_{отс} > 1$ учитывает в первую очередь влияние на токи в фазах, особенно при несимметричных КЗ (например, $K^{(2)}$), тока нагрузки промежуточной подстанции *Б*.

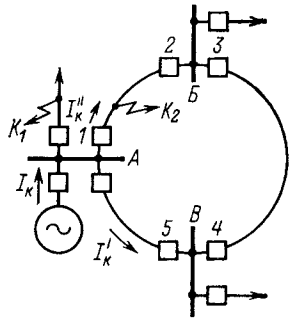


Рис. 5.7. Защита кольцевой сети с односторонним питанием

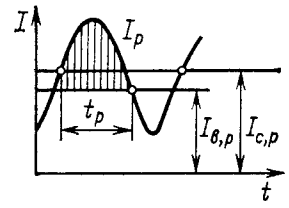


Рис. 5.8. Диаграмма, характеризующая работу органа тока при качаниях

Учет токов качаний. Изменение действующего значения тока $I_р = k^{(3)}_{сх} I_{ур}/K_I$ в органе тока во времени при качаниях в соответствии с данными гл. 1 приведено на рис. 5.8. Орган срабатывает при возрастании тока до $I'_р = I_{с,р}$ и возвращается в исходное состояние только при последующем его снижении до $I''_р = I_{в,р}$. Таким образом, орган (при пренебрежении его малыми собственными временами срабатывания и возврата) находится при качаниях в сработавшем состоянии в течение времени $t_р$. Орган направления мощности с учетом возможных больших изменений угла $\varphi_р$ при качаниях может срабатывать. Отстройка от $I_р$ выбором соответствующего $I_{с,з}$ неприемлема, так как ее орган тока получился бы недопустимо грубым. Поэтому для отстройки учитывается только рассмотренное свойство органа тока находиться в сработавшем состоянии в течение каждого периода качаний лишь относительно небольшое время $t_р$ и то, что время срабатывания защит во многих режимах качаний $t_{с,з} > t_р$.

При качаннях возможны не только ложные срабатывания защит, но и их отказы при КЗ в защищаемой зоне. Так, например, при возникновении на тупиковой линии, отходящей от шин подстанции *Б* (точка *К* на рис. 5.9), повреждения, обусловившего качания источников питания *А* и *Б*, ток в месте КЗ будет пульсировать с частотой перио-

да качаний. При значительной выдержке времени $t_{с,з}$ токовой защиты тупиковой линии, соизмеримой с периодом качаний или большей его, и при $I_{к\ min} < I_{в,з}$ она не сможет сработать. Для предотвращения подобных отказов и вообще возникновения значительных качаний необходимо применение защит с возможно малыми временами срабатывания.

Оценка и область применения защиты. Максимальные токовые направленные защиты обычно в сочетании с ненаправленными обеспечивают селективность несрабатывания в рассмотренной сети, состоящей из цепочки одиночных линий с двусторонним питанием, и в простой кольцевой сети с односторонним питанием. Нетрудно показать, что эта селективность может быть также обеспечена в сетях в виде цепочек одиночных линий с любым числом источников питания (рис. 5.10, *а* и *б*) и в кольцевой сети с диагональными линиями, соединяющими источник питания с другими подстанциями (рис. 5.10, *в*). В кольцевых сетях с числом источников питания, бо́льшим одного (рис. 5.11, *а*), имеющих диагональные линии, не проходящие через источник питания (рис. 5.11, *б*), а также во многих других случаях селективность несрабатывания не обеспечивается, так как отсутствуют условия для выбора выдержек времени по встречно-ступенчатому принципу.

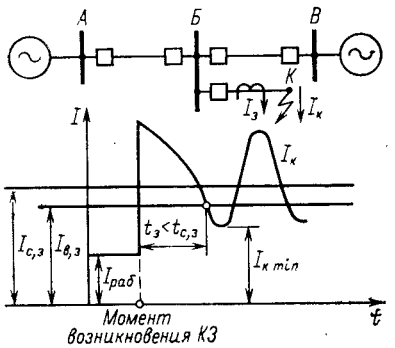


Рис. 5.9. Диаграмма, характеризующая возможность отказа срабатывания защиты при качаниях

Чувствительность защит для линий с двусторонним питанием при учете возможных аварийных перегрузок (например, при отключении генерирующей мощности в одной из систем, связанных защищаемыми линиями) может быть совершенно недостаточной. Приходится также иметь в виду возможность излишних срабатываний при качаниях. Лучше дело обстоит в сетях с одним источником питания, в которых непредусмотренные аварийные перегрузки могут

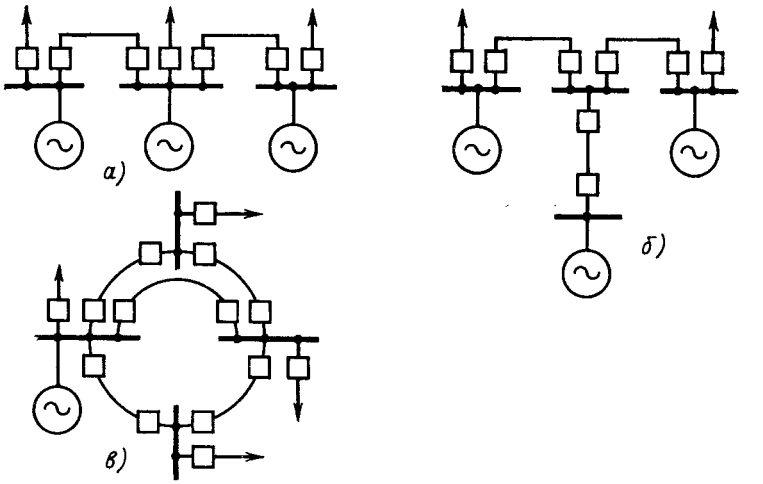


Рис. 5.10. Примеры схем сетей, в которых максимальная токовая направленная защита обеспечивает селективное отключение КЗ

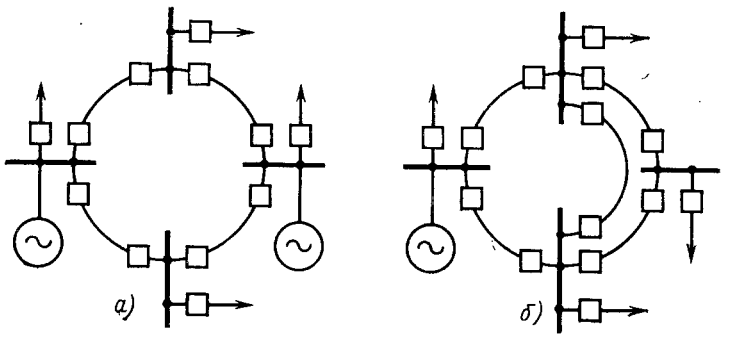


Рис. 5.11. Примеры схем сетей, в которых максимальная токовая направленная защита не обеспечивает селективного отключения КЗ

и не появляться; в них также не возникает вопроса отстройки от качаний.

Значительно лучшие показатели имеют токовые направленные защиты нулевой последовательности, рассматриваемые ниже. Данные же защиты находят применение преимущественно в кольцевых сетях с одной точкой питания напряжением до 35 кВ в случае, если их выдержки времени оказываются допустимыми.

5.4. ПЕРВЫЕ И ВТОРЫЕ СТУПЕНИ ТОКОВЫХ И ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ, ВКЛЮЧАЕМЫХ НА ПОЛНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ФАЗ

Первые и вторые ступени токовых и токовых направленных защит в общем случае, как подчеркивалось выше, не используются отдельно, без третьей ступени, необходимой для обеспечения резервирования действия защит смежных элементов и при отказах выключателей последних, а также резервирования работы первых и вторых ступеней. Однако они являются весьма эффективной частью ступенчатых защит, обеспечивая более быстрое отключение КЗ на защищаемом участке и достаточно высокую селективность (при внешних КЗ) в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания. Такие их свойства определяются своеобразным выбором токов срабатывания ступеней; они, если расчетным не является случай отстройки от $I_{ур}$ при качаниях, отстраиваются от максимальных токов внешних КЗ (для I ступени — КЗ в начале смежных элементов, для II ступени — КЗ в расчетной точке этих смежных элементов). В связи с этим в инженерной практике I и II ступени называются *токовыми отсечками*. Направленными токовые отсечки, как будет показано ниже, выполняются только для повышения чувствительности. Логическое уравнение, характеризующее их работу, в общем случае имеет вид $y=SI^{I}_{с,з}D^{\uparrow I}_{t}+SI''_{с,з}D^{\uparrow II}_{t}$, . причем как у I, так и II ступени сигнал S может отсутствовать (нет ОНМ), $D^{\uparrow I}_{t}$ определяет не выдержку времени t_1 в обычном понимании, а часто только собственное время срабатывания I ступени, $D^{\uparrow II}_{t}$ характеризует выдержку времени t^{II}, обычно одинаковую для II ступеней всех защит сети.

5.5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ЗАЩИТЫ, ЕЕ ЗАЩИТОСПОСОБНОСТЬ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Выбор $I^{I}_{с,з}$ зависит от того, может ли по защищаемому участку сети при внешних (сквозных) КЗ проходить ток повреждения только в одном направлении или в обоих направлениях, а в последнем случае дополнительно — от того, является ступень направленной или нет. Ниже учитываются все эти варианты. Время срабатывания t^{I}, как указывалось выше, является небольшим замедлением в срабатывании защиты, которое может понадобиться только для отстройки защиты от искусственных кратковременных КЗ, создаваемых трубчатыми разрядниками, устанавливаемыми на воздушных линиях с $U_{ном}\leqslant 35\div 110$ кВ без молниезащитных тросов от атмосферных перенапряжений. С учетом этого $t^{I}\leqslant 0{,}1$ с и может снижаться до 0,01—0,02 с.

Токовая защита (отсечка) линии, по которой при внешних КЗ ток повреждения может проходить в одном направлении. Это защита линий с односторонним питанием. Работа ее рассматривается на примере токовой защиты участка *АБ* (рис. 5.12), устанавливаемой только со стороны питания *А*. Ток ее срабатывания $I^{I}_{с,з}$ для обеспечения селективности несрабатывания при внешних КЗ на элемен-

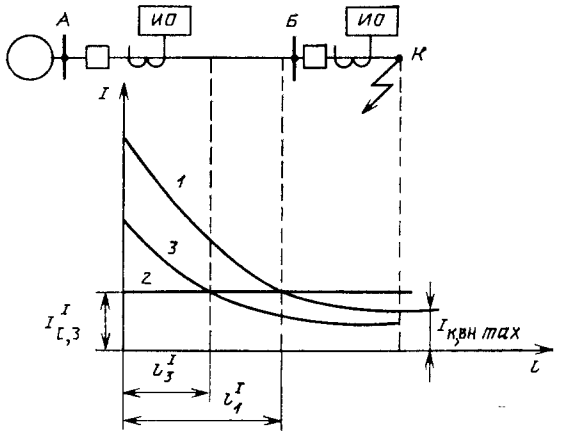


Рис. 5.12. Выбор тока срабатывания и определение защищаемой зоны I ступени (отсечки) токовой защиты линии с односторонним питанием

тах, присоединенных к шинам приемной подстанции *Б*, выбирается бо́льшим максимального тока, проходящего по участку *АБ* при этих КЗ. Расчетная точка *К* физически расположена у шин *Б* за защитами присоединений. Ей соответствует $I_{к,вн\ max}$, имеющий в большинстве случаев место при металлическом ($R_п=0$) $K^{(3)}$.

Ток

$$I^{I}_{с,з}=k^{I}_{отс}I_{к,\ вн max}. \qquad (5.5)$$

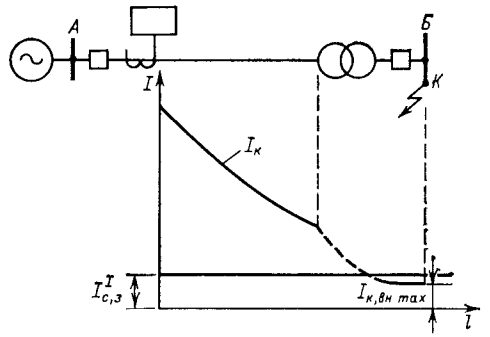
Ток $I_{к,вн\ max}$ обычно соответствует действующему значению его периодической слагающей для времени $t=0$.

Коэффициент отстройки $k^{I}_{отс}>1$ выбирается возможно меньшим с учетом того, что с увеличением $I^{I}_{с.з}$ может резко сокращаться защищаемая зона l^{I} (рис. 5.12). При определении $k^{I}_{отс}$ учитываются возможное влияние апериодической слагающей в $i_к$, неточность расчета $I_к$, погрешности *ТА* и органа тока. Часто принимается $k^{I}_{отс} \approx 1{,}2 \div 1{,}3$. Защищаемая зона в режиме с $I_{к,вн\,max}$ $l^{I(1)}$ определяется абсциссой точки пересечения кривой *1* $I_к=f(l)$ с прямой *2*, соответствующей току $I^{I}_{с.з}$, не зависящему от места КЗ. Зона $l^{I(1)}$, характеризующая защитоспособность, составляет только часть длины линии *АБ*. Поэтому защита (отсечка) в общем случае не может быть основной защитой линии. Кривая *3* $I_к=f(l)$ в режимах, отличных от рассмотренного, может располагаться значительно ниже кривой *1* (другой вид КЗ и т. п.). Соответствующая ей защищаемая зона $l^{I(3)}<l^{I(1)}$; в некоторых случаях она может быть снижаться до нуля. Для сокращения числа случаев работы защиты с укороченными l^{I} органы тока включаются на *ТА* так, чтобы $k_{сх}=1$. Эффективность срабатывания рассматриваемой отсечки иногда (когда она выполняет только функции вспомогательной защиты) оценивается также коэффициентом чувствительности $k_ч$ при повреждениях в начале защищаемого участка.

В частных случаях рассматриваемая отсечка без выдержки времени может являться и основной защитой линии, например при работе последней в блоке с понижающим трансформатором, не имеющим выключателя со стороны высшего напряжения (рис. 5.13). В этом случае защите линии допустимо работать при повреждениях в трансформаторе; поэтому ее $I^{I}_{с.з}$ отстраивается от КЗ за трансформатором. В результате обычно l^{I} охватывает всю длину линии и обеспечивается приемлемый $k_ч$ при повреждениях на ее конце. Для резервирования внешних КЗ защита в целом должна иметь III ступень.

Токовая защита (отсечка) линии, по которой при внешних КЗ ток повреждения может проходить в обоих направлениях. Это, например, защиты цепочки линий с двумя или несколькими источниками питания или кольцевой сети с одним источником питания. Работа защиты рассматривается на примере ее использования для линии с двумя источниками питания по ее концам (рис. 5.14). Отсечки включаются с двух сторон. Их одинаковые токи срабатывания $(I^{I}_{с.зА}=I^{I}_{с.зБ})$ должны выбираться с учетом необходимо-

Рис. 5.13. Работа I ступени (отсечки) токовой защиты на линии, работающей в блоке с трансформатором



сти отстройки от токов КЗ $I_{кБ}$ при повреждении в точке $К_А$ у шин *А*, $I_А$ при повреждении в точке $К_Б$ у шин *Б* и от уравнительного тока $I_{ур}$ в линии *АБ*, обусловленного качаниями генераторов системы *А* и *Б* между собой или даже их выходом из синхронизма (см. гл. 1). При этом учитывается, что ток $I_{ур} \approx |\underline{E}_А - \underline{E}_Б| / \underline{Z}_Σ$, где $\underline{Z}_Σ$ — суммарное эквивалентное сопротивление системы в целом, может быть больше $I_{к,вн\,max}$, а срабатывание защит под его

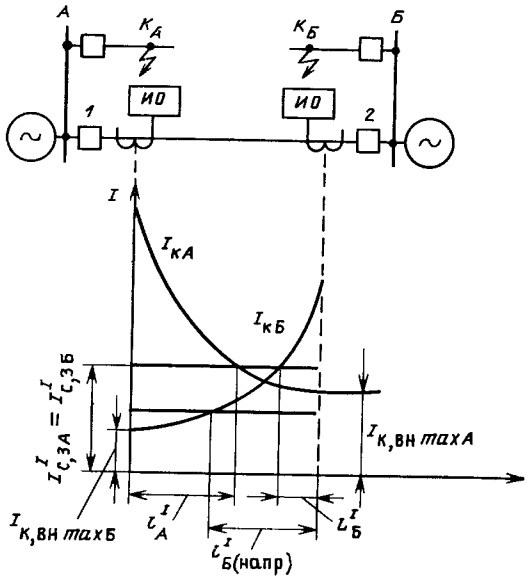


Рис. 5.14. Выбор токов срабатывания и определение защищаемых зон I ступеней (отсечек) токовых защит линии с двусторонним питанием

воздействием не допускается Таким образом, должны быть выполнены условия $I^{I}_{с,з} > I_{кА\,max}$; $I^{I}_{с,з} > I_{кБ\,max}$; $I^{I}_{с,з} > I_{ур\,max\,расч}$, максимальное значение которого достигается при угле между ЭДС $А$ и $Б$ примерно 180°; ток $I^{I}_{с,з}$ выбирается по условию, дающему большее его значение. Защищаемые зоны $l^{I}_{А}$ и $l^{I}_{Б}$ определяются так же (рис. 5.14), как для рассмотренного выше случая защиты линии с односторонним питанием. Наличие питания с двух сторон может ухудшать защитоспособность одной из защит, токи $I_к$ со стороны которой меньше [на рис. 5.14 — защиты $Б$, так как ее ток $I^{I}_{с,з\,Б}$ приходится отстраивать не от $I_{к,вн\,max\,Б}$, а от $I_{к,вн\,max А}$, который больше (если расчетной не является отстройка от $I_{ур,расч}$)].

Токовая направленная защита (отсечка) линии, по которой при внешних КЗ ток повреждения может проходить в обоих направлениях. Работа защиты рассматривается для той же схемы сети (рис. 5.14), что и для ненаправленной отсечки. Как было установлено, защита со стороны с меньшими $I_к (I_{кБ})$ может оказываться имеющей меньшую защищаемую зону ($l_Б < l_А$). Последняя, если не приходится учитывать большие $I_{ур}$, может быть увеличена выполнением защиты с меньшим $I_{к,вн}$ направленной, так как в этом случае ее $I^{I}_{с,з}$ должен отстраиваться только от $I_{к,вн\,max}$ со стороны своей ПС (на рис. 5.14 $I_{к,\,вн\,max\,Б}$).

5.6. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВТОРОЙ СТУПЕНИ ЗАЩИТЫ, ЕЕ ЗАЩИТОСПОСОБНОСТЬ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Основным назначением II ступени (отсечки с выдержкой времени) является защита зоны l^{II}, в которую входят конец защищаемого участка (рис. 5.1, *б*) $АБ$ и шины подстанции $Б$. Дополнительно она резервирует I ступень. Для предотвращения срабатывания в зонах, защищаемых предыдущими защитами, II ступени выполняются с выдержками времени t^{II}. Для сокращения времени ликвидации КЗ с t^{II} предыдущие защиты должны выполняться работающими в начале смежных элементов без выдержки времени (I ступени защит линий, быстродействующие защиты на трансформаторах подстанции $Б$), а t^{II} стремятся выбирать одинаковыми для защит всех линий и равными $t^{II} = t^{II}_{n} = t^{I}_{(n-1)max} + \Delta t$. Ступень Δt принципиально имеет для t^{II} несколько меньшее значение, чем для III ступеней, так как практически отсутствует погрешность в выдержке времени предыдущей защиты, не имеющей выдержки времени. С другой стороны, для сетей с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ часто приходится учитывать $t_{уров}$, на которые (УРОВ) действуют предыдущие защиты. Поэтому t^{II} часто составляет примерно 0,5 с (в сетях сверхвысоких напряжений меньше).

При рассмотренном способе выбора выдержек времени ($t^{II} = t^{II}_{n} = \text{const}$) ток срабатывания $I^{II}_{с,зn}$ защиты линии с односторонним питанием для предотвращения ее срабатывания во вторых зонах предыдущих аналогичных защит и при КЗ за трансформаторами приемной подстанции (предполагается, что КЗ за трансформаторами ликвидируются с $t_т \geqslant t^{II}_{n}$) должен выбираться по двум условиям: $I^{II}_{с,зn} \geqslant k^{II}_{отс} I^{I}_{с,з(n-1)max}$ и $I^{II}_{с,зn} \geqslant k^{II}_{отс} I_{кТmax}$ (без учета тока нагрузки). Ток срабатывания принимается бо́льшим из полученных значений. Длина l^{II}_{n} определяется, как и для I ступени, абсциссой точки пересечения $I_к = f(l)$ с прямой $I^{I}_{с,зn}$. Для II ступени широко используется $k^{II}_{ч}$, определяемый по КЗ на шинах приемной подстанции. Его допускается иметь относительно небольшим (примерно 1,25), поскольку II ступень резервируется более чувствительной III. Если не обеспечивается требуемый $k^{II}_{ч}$, защиты выполняются четырехступенчатыми или с другим способом выбора их параметров (см. гл. 1).

В сетях более сложной конфигурации или имеющих несколько источников питания, рассмотренных выше для I ступени, II ступени обычно выполняются направленными с обеих сторон участков; это делается для облегчения выбора их параметров, а при отсутствии больших $I_{ур}$ — и для возможного повышения чувствительности. Поэтому выбор их параметров и оценка чувствительности проводятся, как и для линий с односторонним питанием. Основной особенностью может являться целесообразность учета так называемых подпиток, определяемых *коэффициентом токораспределения* $k_{ток}$, под которым ниже понимается отношение тока в защите к току в смежном с защищаемым участком элементе. Рассматриваются два случая: первый (рис. 5.15, *а*) — КЗ за понижающим трансформатором подстанции $Б$ в точке $К_1$. При этом для защиты $А$ $k_{токТ} = I_{кА}/I_{кТ} < 1$; второй (рис. 5.15, *б*) — КЗ на смежном участке $БВ$ при наличии на промежуточной подстанции $Б$ так-

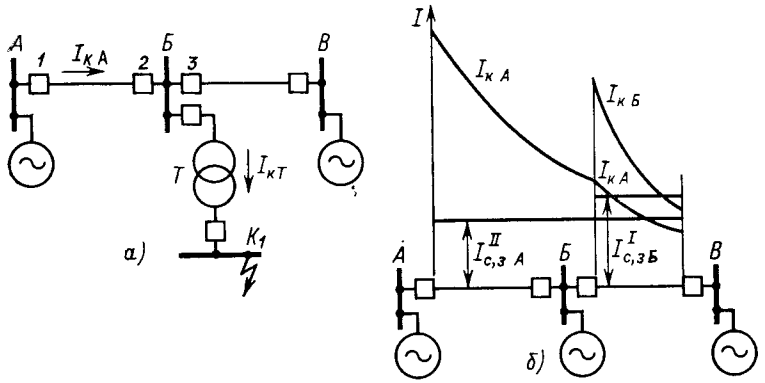


Рис. 5.15. Выбор токов срабатывання II ступеней токовых направленных защит

же источника питания. При этом для той же защиты A $k_{токБ}=I_{кА}/I_{кБ}$ также меньше 1, если не учитывать возможности отключения источника $Б$. С учетом изложенного ток срабатывания n-й защиты (A) должен удовлетворять двум условиям: $I^{II}_{с,зп}\geqslant k^{II}_{отс}(k_{токТ}I_{кТ})_{max}$ и $I^{II}_{с,зп}=k^{II}_{отс}\times\times(k_{токБ}I^{I}_{с,з(n-1)})_{max}$. При $k_{ток}<1$ ток $I^{II}_{с,зп}$ может, таким образом, уменьшаться, а $k^{II}_{ч}$ увеличиваться по сравнению со случаем отсутствия подпитки. Необходимо отметить, что в сетях другой конфигурации, например при наличии на смежном участке двух параллельных цепей, $k_{токБ}$ будет больше 1, $I^{II}_{с,зА}$ будет увеличиваться, а $k^{II}_{ч}$ уменьшаться. Впервые в практике выбора параметров II ступеней $k_{ток}$ был введен СРЗиУ ТЭП в начале 30-х годов (А. Б. Барзам) применительно к дистанционным защитам.

5.7. ВВЕДЕНИЕ В ТОКОВЫЕ И ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Комбинированные отсечки по току и напряжению (с минимальными реле напряжения) были разработаны СРЗиУ ТЭП (А. Г. Геворков и др. [1]) в начале 30-х годов. Они обычно представляют II, а иногда и I ступени защит от многофазных КЗ, селективность которых при повреждениях вне защищаемой зоны достигается комбинированной отстройкой по току и напряжению (для II ступени и по времени срабатывания). Они успешно применялись, например, для более эффективной отстройки от КЗ за трансформаторами. Для обеспечения селективности при внешних КЗ $U_{с,з}$ и $I_{с,з}$ требуют особого между собой согласования. Схемы с рассматриваемыми органами относительно сложны. Поэтому в настоящее время при необходимости обычно отдается предпочтение более эффективным органам сопротивления (см. гл. 6), выполняемым, например, на микроэлектронной элементной базе.

Применение дополнительных органов напряжения для последних ступеней (максимальных токовых защит) впервые было реализовано по предложению СРЗиУ ТЭП

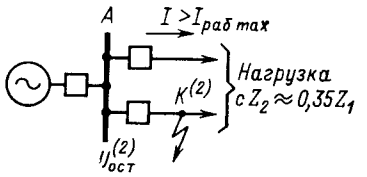


Рис. 5.16. Пример защит сети для которых нецелесообразен комбинированный пуск по $I_р$ и $U_р$

(Л. Е. Соловьев) в середине 30-х годов для защиты генераторов от внешних КЗ. Там их применение (также и для защиты повышающих трансформаторов), как на последних элементах системы, оказалось оправданным и обеспечило возможность выбора $I_{с,з}$ по условию отстройки только от $I_{ном}$ (например, от $I_{ном,г}$ генераторов, максимальный рабочий ток которых кратковременно может достигать значений 1,5—2 номинального тока $I_{ном,г}$). В последующие годы релейщиками Мосэнерго указанный орган начал осуществляться более эффективно с применением двух реле напряжения: одного — минимального (вместо трех), другого — максимального обратной последовательности. На линиях, например в распределительной сети (рис. 5.16), такая отстройка от $I_{раб}$ может оказываться затруднительной, так как при КЗ на одном из присоединений напряжение будет одинаково изменяться на всех присоединениях, а ток в неповрежденных присоединениях, например при $K^{(2)}$, может быть заметно бо́льшим даже их $I_{раб\,max}$ в связи с тем, что сопротивление обратной последовательности двигателей нагрузки меньше их сопротивления прямой последовательности (см. гл. 1).

5.8. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ТОКОВЫХ И ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ, ВКЛЮЧАЕМЫХ НА ПОЛНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ФАЗ

Сочетание рассмотренных ступенчатых токовых и токовых направленных защит принципиально дает возможность защищать от многофазных КЗ сеть любой конфигурации с любым числом источников питания. Однако практически они с учетом общих предъявляемых к защитам требований (см. гл. 1) часто имеют ряд существенных недостатков: 1) защитоспособности и коэффициенты чувствительности I и II ступеней существенно зависят от режимов работы сетей и некоторых других факторов и поэтому в ряде случаев оказываются неудовлетворительными; 2) последние (III) ступени для многих видов сетей не могут обеспечивать необходимой чувствительности и селективности несрабатывания; необходимо, однако, отметить, что селективность несрабатывания последних ступеней принципиально присуща и другим видам защит с относительной селективностью, даже дистанционным (см. гл. 6).

С учетом этого токовые и токовые направленные защиты как защиты от многофазных КЗ преимущественно используются в распределительных сетях с одним источником питания при $U_{ном} \leqslant 35$ кВ, иногда при 110 кВ, например с приемных сторон головных участков кольцевой сети, когда защиты могут быть выполнены без выдержки времени. Значительно лучшие показатели имеют токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности, рассматриваемые ниже.

5.9. ТОКОВЫЕ И ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ

Токовыми и токовыми направленными нулевой последовательности называются защиты, цепи тока органов которых включаются на составляющие нулевой последовательности $\underline{I}_0$ (обычно $3\underline{I}_0$), а цепи напряжения (для ОНМ) — на составляющие $\underline{U}_0$ ($3\underline{U}_0$) соответственно фазных токов и напряжений. Включение защит на составляющие нулевой последовательности обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с рассмотренными выше вариантами защит, использующими для действия при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ полные токи и напряжения фаз. Основными из них являются: независимость работы от рабочих токов, в которых составляющие $\underline{I}_0$ отсутствуют, что дает возможность выполнять последние ступени защит весьма чувствительными; более резкий спад токов $\underline{I}_0$ вдоль защищаемой линии при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, так как удельные $z_{0л}$ больше $z_{1л}$, что улучшает защитоспособность I и II ступеней защит; уменьшение уровня выдержек времени последних ступеней защит, особенно при разделении сетей смежных напряжений в системе (например, 110 и 35 кВ) трансформаторами; отсутствие мертвых зон у ОНМ, поскольку при близких КЗ, когда полные напряжения могут быть малыми, $\underline{U}_0$ имеют наибольшие значения.

К недостаткам защит, включенных на $\underline{I}_0$ и $\underline{U}_0$, по сравнению с рассмотренными выше кроме очевидного основного — пригодности для действия только при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ (при $K^{(2)}$ и $K^{(3)}$ такие защиты не работают) относятся малая приспособленность для случая работы линий в длительных неполнофазных режимах, характерных наличием составляющих $\underline{I}_0$ и $\underline{U}_0$, возможность сильного влияния на них взаимоиндукции (см. гл. 1), в особенности между параллельными, близко расположенными цепями линий, ухудшающей параметры защит и усложняющей их выбор, и необходимость учитывать все заземленные нейтрали автотрансформаторов (трансформаторов) как источники составляющих нулевых последовательностей (в большей мере, чем для защит, использующих полные токи и напряжения фаз).

В ряде вопросов расчет защит нулевой последовательности, в особенности для I и II ступеней, во многом подобен расчету защит, включенных на полные токи и напряжения фаз.

В Советском Союзе методам расчета токовых направленных защит нулевой последовательности, учитывающим все перечисленные их особенности, было уделено особенно большое внимание, начиная примерно с 1940 г., когда было принято решение ориентироваться на их применение в сетях с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ для действия при КЗ на землю вместо дистанционных защит, которые в те годы не имели удачных исполнений для работы при этом виде КЗ. Рассматриваемые защиты, как уже отмечалось, и в настоящее время широко применяются в указанных сетях как резервные, а иногда и как основные со ступенчатыми характеристиками выдержки времени.

Детальная, с годами уточняемая и углубляемая разра-

ботка методов расчета защит выполнялась в СРЗиУ ТЭП (теперь ЭСП) несколькими поколениями релейщиков, в последние годы — с существенным использованием работ НПИ (А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин и др.) и Южного отделения ЭСП (Г. В. Бердов и др.) по учету бросков токов намагничивания трансформаторов (автотрансформаторов) (см. гл. 1). По ним выпущены два издания РУ, последнее — [36]. Поэтому ниже только кратко отмечаются некоторые принципы этих расчетов, в первую очередь для одиночных линий, когда отсутствует эффект взаимоиндукции.

Особенности выбора параметров срабатывания I ступеней. При выборе $I^{I}_{с,з}$ дополнительно к условию отстройки от расчетного $I_{к,вн\,max}$ нулевой последовательности при $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$ в зависимости от того, когда он больше (см. гл. 1), в общем случае рассматривается также отстройка от неполнофазного режима с $3I_{0н,р}$, появляющегося весьма кратковременно за счет неодновременности включения фаз выключателя при АПВ линии и более длительно в цикле ОАПВ. Отстройка $I^{I}_{с,з}$ по первому дополнительному условию может не требоваться, если придать небольшое замедление выходным органам защиты. В этом случае необходимо учитывать второе дополнительное условие, если в цикле ОАПВ ступень автоматически не выводится из работы. Отстройка $I^{I}_{с,з}$ от токов качаний не требуется, так как они составляющих I_0 не имеют. Качания, которые могут иметь место при внешних КЗ на землю, также представляют не расчетный случай, так как токи I_0 бывают тем меньше, чем больше угол δ между векторами ЭДС (аварийное напряжение $U_{ав}$ и его составляющие в месте повреждения снижаются).

Особенности выбора параметров срабатывания II ступеней. Дополнительным условием является необходимость согласования с защитами нулевой последовательности автотрансформаторов в случае установки последних на подстанциях. Необходима также проверка недействия ступени под влиянием токов небаланса.

Особенности выбора параметров срабатывания последних (III) ступеней. Для последних ступеней, как и для защит, включаемых на полные напряжения и токи фаз, выдержки времени выбираются по ступенчатому или встречно-ступенчатому принципу. Ниже (рис. 5.17) рассматриваются два случая применения первого принципа. На рис. 5.17, *а* показана цепочка одиночных линий с одним источником питания в виде блока генератор — трансформатор с заземленной нейтралью и трансформаторами с изолированными нейтралями на понижающих подстанциях (случай, возможный для сети 110 кВ, понижающие трансформаторы которой могут по условиям изоляции работать без заземлений нейтралей). Защита *1*, включенная на блоке линия — трансформатор, выполняется без выдержки времени ($t_1 < 0{,}1$ с), так как при КЗ за понижающим трансформатором токи I_0 в ней не появляются. С учетом последнего при отсутствии УРОВ $t_2 = t_1 + \Delta t \approx \Delta t$. Получающийся при этом выигрыш во временах срабатывания по сравнению с защитами, включенными на полные токи фаз, иллюстрирует диаграмма, приведенная на этом же рисунке.

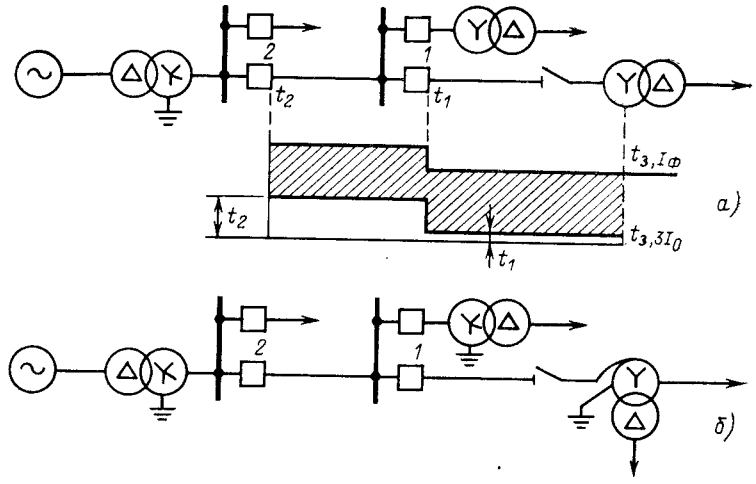


Рис. 5.17. Токовая ступенчатая защита нулевой последовательности радиальной сети

На рис. 5.17, *б* изображена такая же цепочка линий, но на понижающих подстанциях установлены автотрансформаторы (частый случай) или трансформаторы с заземленными нейтралями (обычно для $U_{ном} \geqslant 220$ кВ). Эти автотрансформаторы (трансформаторы) являются как бы источниками токов нулевой последовательности (см. гл. 1). Казалось бы, поэтому для защиты сети следует применить встречно-ступенчатый принцип выбора выдержек времени.

Однако так поступать нет необходимости, поскольку такие источники питания функционируют только до момента отключения питающих их линий. Для предотвращения же излишнего действия защит *1* и *2* при КЗ на землю в питающей сети осуществляется их отстройка выбором соответствующих токов срабатывания $I_{с,з1}$ и $I_{с,з2}$.

Основная особенность в выборе $I_{с,з}$ заключается в возможности отстраивать $I_{с,з}$ последних ступеней, работающих с выдержкой времени, только от расчетных первичных токов небаланса $I_{нб,п,расч}$ (см. гл. 3), которые бывают значительно меньше $I_{раб\,max}$. Так, например, для сети на рис. 5.17, *а* $I_{с,з1}$ и $I_{с,з2}$ отстраиваются только от $I_{нб}$ при $K^{(3)}$ за трансформаторами подстанции противоположных концов участков, отключаемых с выдержками времени, равными выдержке времени рассматриваемой защиты или большими нее, и согласуются между собой по чувствительности: $I_{с,з}>I_{нб,п,расч}$ и $I_{с,з2}>I_{с,з1}$. В ряде случаев приходится, однако, учитывать дополнительные, более тяжелые условия, некоторые из которых указаны ниже.

Для защит сети по рис. 5.17, *б* при трансформаторах с заземленными нейтралями на понижающих подстанциях $I_{с,з}$ должны отстраиваться как от $I_{нб,п,расч}$ при $K^{(3)}$ за трансформаторами подстанций, так и от токов $3I_0$, генерируемых указанными заземленными трансформаторами при КЗ на землю в питающей сети. Для отстройки от последних часто приходится загрублять защиты или выполнять их направленными. Если стремятся выполнить защиту *1* по возможности быстродействующей, учитывается также условие отстройки ее $I_{с,з}$ от составляющих нулевой последовательности бросков тока намагничивания, кратковременно появляющихся при неодновременном включении фаз выключателем (в предыдущем случае их не могло быть, так как нейтрали понижающих трансформаторов были изолированы). Как уже указывалось, методы расчета этих бросков были детально разработаны под руководством А. Д. Дроздова (НПИ). Улучшение отстройки от них также разрабатывалось в НПИ (А. Д. Дроздов, В. В. Платонов и др.). Для сетей 110—330 кВ отстройка обычно осуществляется не по $I_{с,з}$, а по времени создания небольшого замедления защиты. Для защит сети по рис. 5.17, *б* при автотрансформаторах на подстанциях в общем случае приходится учитывать еще следующее условие. Автотрансформаторы со стороны среднего напряжения работают на сеть, оказывающуюся всегда работающей с заземленной нейтралью (автотрансформатора). При $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ в этой сети появляются токи I_0 в защищаемой цепочке линий высшего напряжения, поэтому ее защиты по токам срабатывания и выдержкам времени должны быть согласованы с защитами нулевой последовательности от КЗ на землю в сети среднего напряжения.

В общем случае при наличии в защищаемой сети нескольких источников питания (станций) для последних (а иногда и вторых) ступеней защит с небольшими выдержками времени возникает необходимость отстройки от токов небаланса при качаниях. Необходимо также считаться с возможностью работы в сети некоторых, обычно тупиковых участков в длительном неполнофазном режиме (например, при проведении пофазного ремонта под напряжением). В этом случае их защита должна отстраиваться от этого режима (если не выводится из работы), а защиты других участков следует проверять по условию $I_{с,з}\geqslant k_{отс}(I_{нб,п,расч}+3I_{0н,р})/k_{в}$, где $I_{нб,п,расч}$ соответствует $I_{раб\,max}$ неповрежденного участка, а $I_{0н,р}$ — ток I_0 на неповрежденном участке, определяемый несимметрией, возникающей из-за работы другого участка в неполнофазном режиме. С другой стороны, могут иногда возникать для направленных защит облегчающие условия, определяемые конечной чувствительностью ОНМ по напряжению срабатывания. В некоторых случаях, например при качаниях, U_0 отсутствует и поэтому даже большие $I_{нб}$, возможно, не смогут обусловить срабатыванию ОНМ, а следовательно, и защиты в целом.

Чувствительность последних, как и II ступеней защит, характеризуется их $k_{ч}$, определяемым током $3I_0$ в расчетных точках при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ (второй случай менее интересен для II ступени, если при многофазных КЗ работает более совершенная дистанционная защита). Необходимо отметить, что чувствительность (в первую очередь последней ступени) может ограничиваться конечной чувствительностью по напряжению ОНМ. С учетом этого ОНМ иногда включаются таким образом, что при срабатывании блокируют защиту при направлении мощности КЗ к шинам (схема с блокирующим ОНМ) и соответственно разрешают ее срабатывание при КЗ в защищаемом направлении вне зависимости от значений $U_{р}$ и $I_{р}$. Обычная схема с ОНМ, срабатывающим при направлении мощности КЗ от шин в линию, называется схемой с разрешающим ОНМ. Схема с блокирующим ОНМ для устранения мертвых зон рас-

смотренных выше защит, включенных на полные токи и напряжения фаз, считается нерациональной.

При использовании схемы с блокирующим ОНМ ток срабатывания соответствующей ступени защиты необходимо согласовывать по чувствительности с ОНМ для предотвращения неправильного действия защиты при направлении мощности КЗ к шинам в случае отказа ОНМ из-за недостаточной чувствительности.

Особенности выбора токов срабатывания защит параллельных цепей. При выборе токов срабатывания I и II ступеней защиты параллельных цепей, имеющих между собой значительную взаимоиндукцию (например, подвешен-

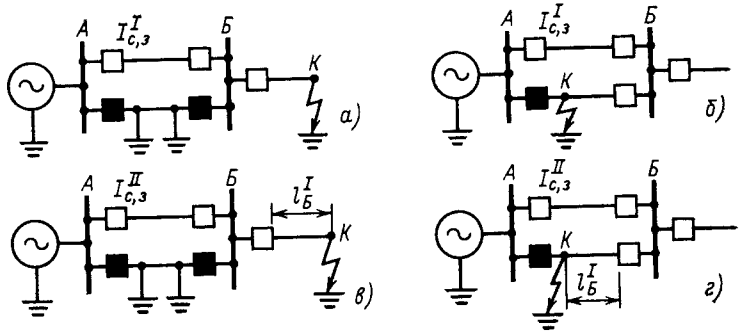


Рис. 5.18. Расчетные условия для выбора токов срабатывания защнт нулевой последовательности параллельных цепей

ных на общих опорах), возникают дополнительные условия. Они сводятся в основном к следующему. Ток $I^{I}_{с,з}$ отстраивается от тока при внешних $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$ в режимах (рис. 5.18): при работе одной цепи и заземлении второй (отключенной) с обеих сторон и КЗ на землю в начале смежного участка (рис. 5.18, *а*); при каскадном отключении второй цепи, имеющей КЗ на конце, ближайшем к месту включения рассматриваемой защиты (рис. 5.18, *б*). За счет взаимоиндукции ток в защите в некоторых случаях оказывается при этом даже бóльшим, чем в первом случае.

Ток $I^{II}_{с,з}$ отстраивается от тока при внешних $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$: в конце зоны $l^{I}_{Б}$, защищаемой I ступенью защиты предыдущего участка, когда на данном включена одна цепь, а вторая отключена и заземлена с обеих сторон (рис. 5.18, *в*); в конце зоны, защищаемой I ступенью защиты, включенной на противоположном конце второй цепи (рис. 5.18, *г*), при КЗ на последней и каскадном ее отключении.

Указанные условия являются обычно весьма тяжелыми, и их учет ухудшает защиту. Для облегчения расчетных условий возможны, например при создании режимов по рис. 5.18, *а* и *в*, изменения параметров защит или даже самих схем защит. Однако в рассматриваемых защитах в отличие от дистанционных (см. гл. 6) они полноценного решения не дают и не используются.

5.10. ОРГАНЫ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ И СХЕМЫ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ

Выполнение ОНМ функций фиксации направления мощности КЗ. Характеристической величиной ОНМ является угол сдвига фаз между подводимыми к нему $U_р$ и $I_р$. Направление мощности КЗ также характеризуется углами между токами КЗ и соответствующими напряжениями. Условные положительные направления токов для каждой защиты (см. рис. 5.6) приняты однозначными (вне зависимости от места КЗ) в сторону защищаемой линии. При металлическом КЗ, например, у шин подстанции *Б* в точках *К′* или *К″* остаточное напряжение на шинах *Б* по фазе остается практически неизменным, так как определяется заданной ЭДС (например, E_A) за вычетом падения напряжения до места повреждения у шин *Б*. Фаза же тока в защите *3* будет по отношению к этому напряжению изменяться примерно на 180° (рис. 5.19). Поэтому ее ОНМ, выполненный реагирующим на сдвиг фаз между подводимыми к нему $\underline{U}_Б$ и $\underline{I}_к$, при правильном их сочетании реагирует и на направления мощности КЗ через защиту *3*, которые при повреждениях в *К′* и *К″* будут противоположными.

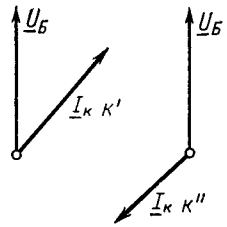


Рис. 5.19. Действие ОНМ в сети с двусторонним питанием

В общем случае мощность КЗ, направленная через место включения защиты, $\underline{S}_к=\underline{U}_A\hat{I}_A+\underline{U}_B\hat{I}_B+\underline{U}_C\hat{I}_C$, где $\hat{I}_A$, $\hat{I}_B$ и $\hat{I}_C$ — сопряженные комплексы токов. Выражая $\underline{U}$ и $\hat{I}$ через симметричные составляющие, получаем $\underline{S}_к=3(\underline{U}_{A1}\hat{I}_{A1}+$

$+\underline{U}_{A2}\hat{\underline{I}}_{A2}+\underline{U}_{A0}\hat{\underline{I}}_{A0}$). Таким образом, $\underline{S}_{к}$ определяется суммой произведений $\underline{U}$ и $\hat{\underline{I}}$ только одноименных последовательностей. Можно также говорить о фиктивной мощности, определяемой аварийными слагающими напряжений и токов. По аналогии ее можно представить как $\underline{S}_{к,ав}=$ $=3(\underline{U}_{A1ав}\hat{\underline{I}}_{A1ав}+\underline{U}_{A2ав}\hat{\underline{I}}_{A2ав}+\underline{U}_{A0ав}\hat{\underline{I}}_{A0ав})$. Основное ее отличие от $\underline{S}_{к}$ определяется первым членом с $\underline{U}_{A1ав}$, которое коренным образом отличается от $\underline{U}_{A1}$ (см. гл. 1), имея наибольшее значение в месте повреждения ($\underline{U}_{A1}$ наименьшее). Остальные члены могут отличаться только в случаях, когда в режимах, предшествующих рассматриваемому, уже имелась существенная несимметрия (например, КЗ на линии, оказавшейся в неполнофазном режиме).

Выполняться ОНМ могут реагирующими на направления мощностей только одной последовательности или, другими словами, на сдвиг фаз между $\underline{U}$ и $\hat{\underline{I}}$ отдельных последовательностей.

Для рассмотренных защит ОНМ включались на полные токи и напряжения фаз или их составляющие нулевой последовательности. Ниже будет также рассматриваться их включение на составляющие обратной последовательности. Мощности этих последовательностей, как показывает рассмотрение приведенных для них выражений и диаграмм на рис. 5.20 [1, 16], направлены не к месту КЗ (как полные и прямой последовательности), а наоборот, от места КЗ к шинам подстанций и далее к заземленным нейтралям трансформаторов и автотрансформаторов (для нулевой последовательности) и нейтралям как генераторов, так и нагрузок любого вида (для обратной последовательности). Срабатывание ОНМ в двух последних случаях должно поэтому происходить при направлении мощности КЗ соответствующей последовательности не от шин в линию, а от линии к шинам. Это обстоятельство учитывается при выборе типа ОНМ и его схемы включения на $\underline{U}_{р}$ и $\underline{I}_{р}$. На принципе же действия направленных защит это не отражается, поскольку при переходе из защищаемой зоны в незащищаемую угол $\widehat{\underline{U}_{р}\underline{I}_{р}}$ по-прежнему изменяется примерно на 180°. Поэтому там, где это не искажает общих принципов, обычно говорится о возможности действия направленных защит

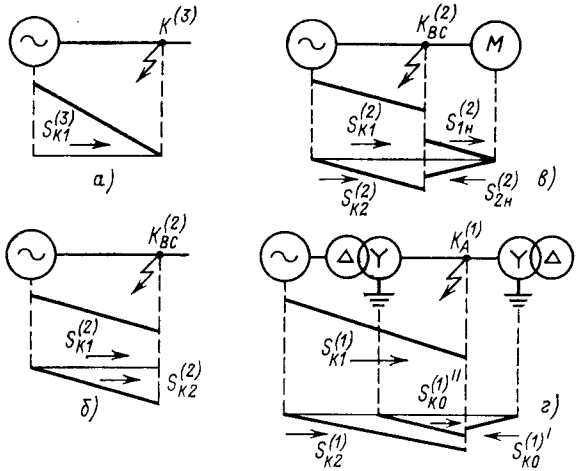


Рис. 5.20. Диаграмма изменения мощностей последовательностей вдоль линии и других элементов систем при различных видах КЗ

при направлении мощности КЗ от шин в защищаемую линию вне зависимости от схем включения ОНМ на $\underline{U}_{р}$ и $\underline{I}_{р}$. Включение на составляющие прямой последовательности осуществлять нецелесообразно, так как при несимметричных КЗ мощность прямой последовательности, определяемая КЗ, может оказываться направленной противоположно мощности прямой последовательности, передаваемой по защищаемой линии к нагрузкам.

Другая оценка должна быть дана составляющей прямой последовательности мощности $S_{к,ав1}$. Она изменяется, как и полная $S_{к,ав}$, вдоль системы подобно мощностям обратной и нулевой последовательностей (рис. 5.21) и практически не зависит от нагрузки.

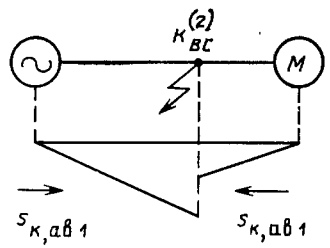


Рис. 5.21. Диаграма изменения аварийной мощности прямой последовательности

Предложение об использовании угловых соотношений при $S_{к,ав}$ впервые было сделано в СССР на кафедре РЗА МЭИ (Ю. А. Барабановым).

Характеристики ОНМ. Работа обычно используемых ОНМ при нулевом пороге чувствительности вне зависимости от их выполнения характеризуется диапазоном возможных углов срабатывания $\varphi_р = \widehat{\underline{U}_р \underline{I}_р} = 180°$ и определяется выражением

$$-(90° + \alpha) \leqslant \varphi_р \leqslant (90° - \alpha), \qquad (5.6)$$

где $\alpha = \text{const}$ — некоторый угол, специально создаваемый для обеспечения четкой работы ОНМ для принятой схемы его включения. Орган не может срабатывать при подведении к нему только $U_р(I_р = 0)$ или $I_р(U_р = 0)$, так как не будет условия для сравнения фаз двух величин. Поэтому ОНМ могут срабатывать только при конечных значениях $U_р$ и $I_р$ тем меньших, чем меньше их порог чувствительности, например противодействующий механический момент у электромеханических органов. С учетом этого введено понятие об угле максимальной чувствительности $\varphi_р = \varphi_{р\,max\,ч}$, при котором ОНМ работает при минимальных значениях подведенных величин. Угол α выбирают так, чтобы он был равен $-\varphi_{р\,max\,ч}$. Тогда условие срабатывания (5.6) приобретает вид

$$-(90° - \varphi_{р max ч}) \leqslant \varphi_р \leqslant (90° + \varphi_{р max ч}). \qquad (5.7)$$

Основными характеристиками ОНМ являются: угловая — зависимость $U_{с,р} = f(\varphi_р)$ при $I_{с,р} = \text{const}$ и вольт-амперная — зависимость $U_{с,р} = f(I_{с,р})$ при $\varphi_р = \text{const}$, даваемая обычно для угла максимальной чувствительности, т. е. $\varphi_{р,с} = \varphi_{р\,max\,ч}$. Угловая и вольт-амперная характеристики в прямоугольной системе координат для ОНМ, приближающихся к идеальным (с порогом чувствительности, близким к нулю), представлены соответственно на рис. 5.22, *а* и *б*.

Вид реальных характеристик отличается от идеальных и в значительной мере определяется элементной базой, на которой выполнен ОНМ. Так, например, ОНМ, осуществленные на интегральной микроэлектронной базе с операционными усилителями (см. гл. 2), имеют рассматриваемые характеристики, близкие к идеальным. Часто использовавшиеся ранее индукционные ОНМ, характеризуемые в условиях срабатывания $M_{эм} = kU_{с,р}I_{с,р}\cos(\varphi_{с,р} - \varphi_{р\,max\,ч}) = M_{мех,с}$, имеют характеристики, приведенные на рис. 5.23, *а* и *б*. За счет насыщения магнитной системы при больших $I_р$ их вольт-амперные характеристики (рис. 5.23, *б*) имеют минимальное конечное $U'_{с,р min}$. За счет конечного максимального $U_{с,р\,max} = U_{ном}$ их угловые характеристики имеют сокращенный (по сравнению со 180°) диапазон углов $\varphi_{р,с}$. Работа полупроводниковых ОНМ, выполненных на схемах сравнения абсолютных значений величин, также определяется характеристиками, зависящими от конкретных значений $U_р$ и $I_р$. Их вольт-амперная характеристика при больших $I_р$ и малых $U_р$ определяется выражением $U_р \cos(\varphi_р - \varphi_{р\,max\,ч})$, а при малых $I_р$ и больших $U_р$ — соответственно $I_р \cos(\varphi_р - \varphi_{р\,max\,ч})$; при $U_р \approx kI_р$, как было отмечено Ю. Г. Назаровым (ВНИИ), она определя-

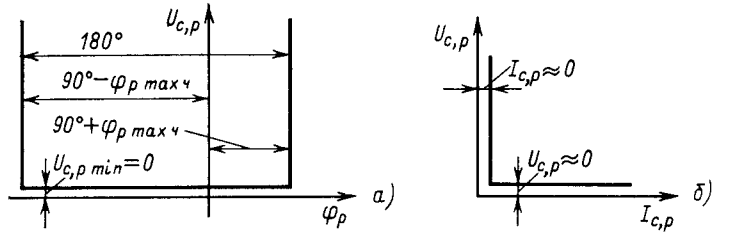


Рис. 5.22. Характеристики идеального органа направления мощности в прямоугольной системе координат:

а — угловая; *б* — вольт-амперная

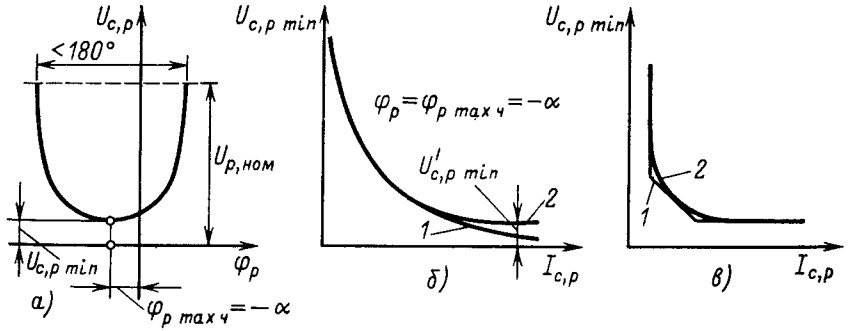


Рис. 5.23. Характеристнки реального ОНМ в прямоугольной системе координат:

а — угловая; *б* — вольт-амперная для индукционного ОНМ; *в* — вольт-амперная для полупроводникового ОНМ

ется выражением $U_{\text{р}}[|\cos(\varphi_{\text{р}} - \varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}})/2| - |\sin(\varphi_{\text{р}} - \varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}})/2|]$ и оказывается состоящей из трех участков (рис. 5.23, *в*).

При использовании современной микроэлектронной элементной базы предпочтение отдается ОНМ со схемой сравнения по углу.

Полярность обмоток ОНМ. Концы (зажимы) цепей ОНМ, получающих питание от *TA* и *TV*, обычно маркируются; они получают условно отмеченную полярность, т. е. условные начала и концы. За начало второй цепи (например, $\underline{I}_{\text{р}}$) при произвольно принятой маркировке первой (соответственно $\underline{U}_{\text{р}}$) однозначно принимается тот ее конец, при котором обеспечивается $\alpha = -\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}$, указанный в паспорте органа. Однополярными называются концы, промаркированные указанным образом; они обозначаются, например, звездочкой.

Принципы включения ОНМ на $\underline{U}_{\text{р}}$ и $\underline{I}_{\text{р}}$. В настоящее время обычно применяются пофазные органы с одним $\underline{U}_{\text{р}}$ и одним $\underline{I}_{\text{р}}$, включаемые на полные напряжения и токи фаз или их составляющие нулевой или обратной последовательности. В отечественной технике получили распространение для некоторых специальных защит органы с одним $\underline{U}_{\text{р}}$ и одним $\underline{I}_{\text{р}}$, но включаемые на трехфазные фильтры симметричных составляющих.

Обычно при включении на полные напряжения и токи фаз не применяются схемы с использованием одноименных $\underline{U}_{\text{р}}$ и $\underline{I}_{\text{р}}$.

Один из основных недостатков таких схем — наличие мертвых зон при всех видах учитываемых КЗ. Применения они не получили. Основной рекомендуемой является так называемая 90°-ная схема включения. В этой схеме сочетаются токи фаз (рис. 5.24, *а*), например, $\underline{I}_{\text{р}} = \underline{I}_A$ и междуфазные напряжения двух других фаз, соответственно $\underline{U}_{\text{р}} = \underline{U}_{BC}$. Для оценки работы схемы и выбора $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}$ оказалось целесообразным воспользоваться непосредственным выявлением фазных соотношений между $\underline{U}_{\text{р}}$ и $\underline{I}_{\text{р}}$ при разных видах КЗ [1].

При $K^{(3)}$ векторная диаграмма тока $\underline{I}_A^{(3)}$ и остаточного напряжения $\underline{U}_{BC}^{(3)}$ приведена на рис. 5.24, *б*. Угол $\varphi_{\text{р}}^{(3)} = \widehat{\underline{U}_{BC}^{(3)} \underline{I}_A^{(3)}} = 270° + \varphi_{\text{з}}^{(3)}$, где $\varphi_{\text{з}}^{(3)}$ — угол между $\underline{U}_A^{(3)}$ и $\underline{I}_A^{(3)}$.

Этот угол с учетом $R_{\text{п}}$ может изменяться в пределах 0—90°. Поэтому справедливо соотношение $270° \leqslant \varphi_{\text{р}}^{(3)} \leqslant 360°$ или $-90° \leqslant \varphi_{\text{р}}^{(3)} \leqslant 0$. Угол $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}$ с учетом того, что $-90° < (\varphi_{\text{р}}^{(3)} - \varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}) < 90°$, должен удовлетворять условию $0 < -\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}} < 90°$. При $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}} = 0$ ($\alpha = 0$) схема могла бы отказывать в действии при повреждении через $R_{\text{п}}$ в начале линии. При других видах КЗ допустимые пределы изменения $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}$ выявляются аналогичным образом. Проведенное рассмотрение работы схемы при разных видах и местах

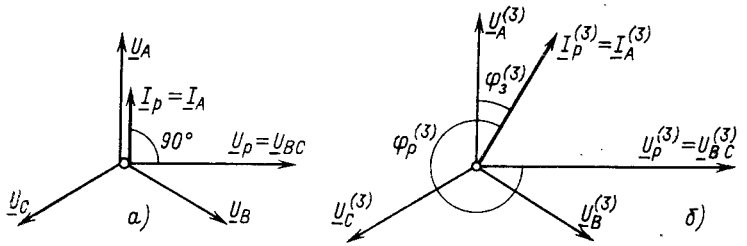


Рис. 5.24. 90°-ная схема включения органа направления мощности

КЗ дало возможность сделать по ней следующие выводы: ОНМ должен выбираться с углом $30° < \varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}} < 60°$; схема пригодна как для трехфазных (с тремя ОНМ), так и для двухфазных (с двумя ОНМ) защит, так как при $K^{(2)}$ четко работают органы, включенные на ток любой из двух поврежденных фаз; мертвая зона возможна только при близких металлических $K^{(3)}$; при $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$ органы, включенные на токи неповрежденных фаз, могут работать неправильно и схема поэтому должна строиться так, чтобы это не приводило при внешних КЗ к излишнему срабатыванию защиты в целом; при несимметричных КЗ [$K^{(2)}$] за трансформаторами (автотрансформаторами) с соединением обмоток У/Д или Д/У за счет неодинакового сдвига при трансформации токов и напряжений, имеющих разные фазные соотношения (см. гл. 1), теоретически возможно неправильное срабатывание ОНМ, отделенных от места КЗ указанными трансформаторами; практически последние действия мало вероятны.

Возможны и другие схемы включения ОНМ на полные напряжения и токи фаз (например, 30°-ная). Однако в отечественной практике для токовых направленных защит,

включаемых на полные напряжения и токи фаз, всегда применяется 90°-ная схема включения, так как другие схемы преимущества перед ней не имеют.

Органы направления мощности при 90°-ной схеме включения имеют мертвые зоны. На их границе, например для электромеханических ОНМ и ОНМ, выполненных по схеме сравнения абсолютных значений, при больших токах в реле $U_{\text{р}}\cos(\varphi_{\text{р}}-\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}})=U_{\text{с.р}\,min}$, где $U_{\text{с.р}\,min}$ дано при угле максимальной чувствительности $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}$. С учетом того, что мертвая зона при применяемой 90°-ной схеме включения ОНМ может быть только при металлическом $K^{(3)}$, $U_{\text{р}}^{(3)}=\sqrt{3}z_{1\text{л}}\,l_x I_{\text{к}}^{(3)}/K_U$, откуда длина мертвой зоны $l_x=K_U U_{\text{с.р}\,min}/[\sqrt{3}z_{1\text{л}}I_{\text{к}}^{(3)}\cos(\varphi_{\text{р}}-\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}})]$.

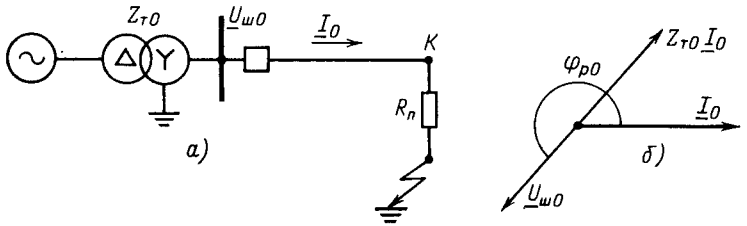


Рис. 5.25. Включение ОНМ на составляющие нулевой последовательности

Для защит нулевой последовательности используется схема включения на напряжения и токи нулевой последовательности (рис. 5.25, *а*). В этой схеме сочетаются $\underline{U}_{\text{р}}=3\underline{U}_0$ и $\underline{I}_{\text{р}}=3\underline{I}_0$. Векторная диаграмма $\underline{I}_0$ и $\underline{U}_0$ при повреждении $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$ на землю через $R_{\text{п}}$ приведена на рис. 5.25, *б*. Напряжение $\underline{U}_{ш0}$ на шинах подстанции проще всего определяется как падение напряжения в сопротивлении $\underline{Z}_{т0}$ трансформатора этой подстанции, имеющего глухозаземленную нейтраль: $\underline{U}_{ш0}=-\underline{Z}_{т0}\underline{I}_0$; при этом $180°\leqslant\varphi_{р0}<270°$. Переходное сопротивление $\underline{R}_{\text{п}}$ на значение $\varphi_{р0}$ не влияет (см. гл. 1). Активная слагающая $\underline{Z}_{т0}$ мала. Поэтому $\varphi_{р0}$ близок к 270° (—90°), и наивыгоднейшее значение $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}=-\varphi_{р0}\approx 90°$. В общем случае ток $\underline{I}_0$ в месте включения защиты замыкается не только через нейтрали трансформаторов данной подстанции, но и через нейтрали других трансформаторов системы, отделенных $\underline{Z}_0$ линий, имеющих бóльшую активную слагающую, чем $\underline{Z}_{т0}$. При этом $\varphi_{р0}<270°$ и ОНМ целесообразно иметь с углом, несколько меньшим 270° (меньшим —90°), например с $\varphi_{\text{р}\,max\,\text{ч}}\approx\approx-115°$. В случае удаленных КЗ на землю, например когда защита работает как резервная при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, $\underline{U}_{\text{р}}$ и $\underline{I}_{\text{р}}$, в особенности $\underline{U}_{\text{р}}$, могут быть весьма малы. Поэтому и в данной схеме важно иметь ОНМ высокой чувствительности. Иногда используются специальные мероприятия для улучшения его работы (например, применение указанной выше схемы с блокирующим ОНМ).

Вопросы для самопроверки

1. Какие защиты называются токовыми и токовыми направленными?
2. Объясните назначение I, II и III ступеней токовой защиты.
3. В чем заключаются ступенчатый и встречно-ступенчатый принципы выбора выдержек времени?
4. Как определяется относительный коэффициент чувствительности максимальной токовой защиты?
5. Как определяется защищаемая зона токовой отсечки без выдержки времени (I ступень) линии с односторонним питанием?
6. Как может повлиять на защитоспособность I ступени одной из сторон линии с двусторонним питанием выполнение защиты направленной?
7. Определите области применения токовых и токовых направленных защит.
8. Какая схема включения ОНМ на полные напряжения и токи фаз имеет преимущественное распространение и при каких КЗ этот орган может иметь мертвую зону?
9. Какие преимущества и недостатки имеют токовые и направленные защиты, включаемые на составляющие нулевой последовательности, по сравнению с защитами, включаемыми на полные токи и напряжения фаз при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$?

Глава шестая

ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

6.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ЗАЩИТАМ

Дистанционными называются защиты с относительной селективностью, выполняемые с использованием измерительных *органов сопротивления* — органов, характеристической величиной для которых по ГОСТ является заданная функция выраженных в комплексной форме отношений воздействующих напряжений к воздействующим токам. Это отношение для удобства анализа и расчетов защиты еще в 20-е годы было принято называть *сопротивлением на зажимах* защиты. Необходимо отметить, что приведенное может приниматься только с некоторыми оговорками. Указанное отношение для многих органов сопротивления при неучете поперечной проводимости линий и металлических КЗ ($R_п=0$) пропорционально расстоянию от места включения защиты до места повреждения (см. гл. 1) — дистанции, что и определило название защиты. Органы сопротивления могут быть выполнены как *омметры*, измеряющие значения характеристической величины, или как только срабатывающие в контролируемой ими зоне и не срабатывающие при КЗ вне ее. Последние более просты по выполнению и получили преимущественное применение. Омметры применялись еще с конца 20-х годов для получения защит с плавно зависимыми характеристиками выдержки времени $t=f(l)$, а также как грубые указатели расстояния до места КЗ. Защиты с зависимыми характеристиками иногда используются и в настоящее время в сетях с $U_{ном}\leqslant 35$ кВ, когда требуется согласование их характеристик с защитами потребителей, выполненных плавкими предохранителями (см., например, [48, 15]). Характеристические величины органов сопротивления при возникновении повреждения снижаются. С учетом этого, как правило, используются минимальные органы, работающие без выдержки времени. Последние, при необходимости, создаются отдельными органами выдержки времени, определяющими ступенчатую характеристику $t=f(l)$. Обычно она имеет три ступени (рис. 6.1). Логическое уравнение, характеризующее работу защиты при принятых условиях, если принять ИО сопротивления направленными, имеет вид (см. гл. 1) $y=Z^{I}_{с,з}D^{\uparrow I}_t+Z^{II}_{с,з}D^{\uparrow II}_t+Z^{III}_{с,з}D^{\uparrow III}_t$. В нем $Z_{с,з}$ — максимальные значения сопротивления $Z_з$, при которых защита еще срабатывает. Ниже рассматривается именно такое выполнение защиты.

Для органа сопротивления, как и для органа тока, существуют понятия о $Z_{в,з}$ — минимальном $Z_з$, при котором он возвращается в исходное состояние, о $Z_{с,р}$ и $Z_{в,р}$ (поскольку органы включаются через TA и TV) и о коэффициенте возврата $k_в$. Связь между первичными $Z_з$ и вторичными $Z_р$ часто определяется соотношением $Z_р=(K_{Iном}/K_{Uном})Z_з$. Коэффициент возврата $k_в=Z_{в.р}/Z_{с.р}=Z_{в,з}/Z_{с,з}>1$, поскольку орган минимальный. В целях упрощения записей в дальнейшем принимается $K_{Iном}/K_{Uном}=1$, т. е. $Z_р=Z_з$.

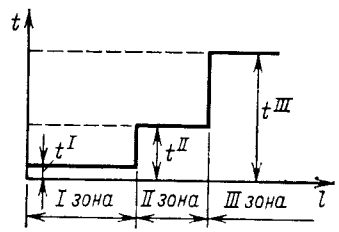


Рис. 6.1. Ступенчатая характеристика выдержки времени дистанционной защиты

Практически работа дистанционных защит при КЗ определяется не только расстоянием l до места повреждения, но и рядом других искажающих факторов — переходными сопротивлениями $R_п$, наличием между местами их включения и КЗ источников питания и нагрузок, сдвигами по фазе между ЭДС источников питания, неоптимальным сочетанием воздействующих величин органов сопротивления и т. д. Учет этих факторов производится ниже, причем он во многом облегчается благодаря проведенному в гл. 5 подробному рассмотрению поведения токовых направленных защит, также выполняемых со ступенчатыми характеристиками выдержки времени.

Работа защит рассматривается на примере их применения в сети с двусторонним питанием (рис. 6.2, *а*). Защиты *1—6* включаются с обеих сторон каждого участка и являются направленными. Направленность действия может не потребоваться только в некоторых частных случаях, например для защит участков с односторонним питанием. Характеристики выдержек времени защит даны на рис. 6.2, *б*. Они подобны характеристикам, рассмотренным в гл. 5 для токовых направленных защит, и обеспечивают отключение только одного поврежденного участка или шин подстанции. Существенными преимуществами дистанционных защит по сравнению с токовыми направленными

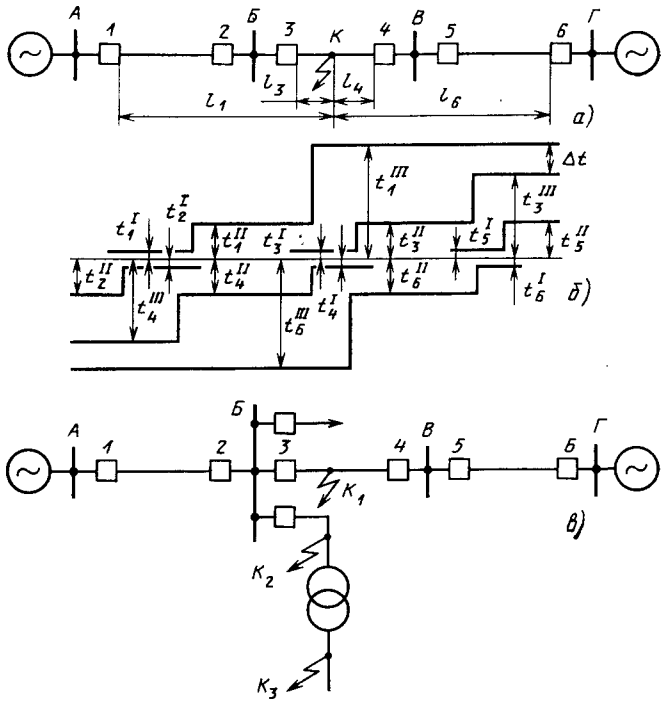


Рис. 6.2. Действие дистанционной защиты в сети с двусторонним питанием

(см. гл. 5) при внешнем сходстве их характеристик $t=f(l)$ являются значительно более четко фиксированная длина первой защищаемой зоны, составляющая при $R_п=0$ $l^{I}\approx 0{,}85\div 0{,}9$ длины участка, более совершенный охват второй зоной l^{II} конца участка и шин противоположной подстанции (больший $k_ч^{II}$), бóльшая чувствительность III ступени с соответствующей ей l^{III} (если токовые направленные защиты включены на полные токи и напряжения фаз, а не на составляющие нулевой последовательности для действия при $K^{(1)}$).

Принципы выбора параметров защит со ступенчатыми характеристиками $t=f(l)$ были уже рассмотрены в гл. 5. Применительно к трехступенчатым дистанционным защитам выбору подлежат времена t^{I}, t^{II}, t^{III} и сопротивления $Z_{с,з}^{I}$, $Z_{с,з}^{II}$ и $Z_{с,з}^{III}$. Времена устанавливаются полностью так же, как для токовых направленных защит: у первой ступени — t^{I} (без выдержки времени), у второй — t^{II}, для вторых ступеней всех защит они одинаковы и часто равны $\sim 0{,}5$ с, у третьей ступени — t^{III}, они выбираются по встречно ступенчатому принципу. Выбор $Z_{с,з}$ имеет некоторые особенности, рассматриваемые ниже на примере защиты *1* сети на рис. 6.2, *в*, предназначенной для действия при многофазных КЗ, с включением ИО сопротивления на междуфазные напряжения и разности фазных токов.

Выбор $Z_{с,з}^{I}$. Рабочие режимы даже с минимальным *рабочим сопротивлением* $Z_{рабmin}=U_{рабmin}/I_{рабmax}$ и режимы самозапуска расчетными не являются; некоторые исполнения защит на них вообще не реагируют. Для предотвращения ложного срабатывания при качаниях применяются специальные устройства (см. ниже), так как $Z_з$ может снижаться в пределе до нуля, если электрический центр системы (см. гл. 1) окажется расположенным в системе у шин A и отстройка по $Z_з$ является в общем случае невозможной. С учетом изложенного $Z_{с,з}^{I}$ определяется из условия отстройки от КЗ в начале предыдущих элементов (линий, трансформаторов подстанции $Б$ — точки K_1 и K_2) по выражению

$$Z_{с,з}^{I} = k_{отс}^{I} z_1 l_л, \qquad (6.1)$$

где $l_л$ — длина защищаемого участка (АБ); z_1 — его удельное сопротивление прямой последовательности; $k_{отс}^{I}<1$ (орган минимальный). Обычно принимают $k_{отс}^{I}\approx 0{,}85\div 0{,}9$. Первые ступени защит в рассматриваемой сети должны быть обязательно направленными для предотвращения неправильного срабатывания, например защиты *1* при КЗ в системе A. Возможные мертвые зоны часто исключаются вспомогательными токовыми отсечками или специальными мероприятиями.

Выбор $Z_{с,з}^{II}$. Сопротивление $Z_{с,з}^{II}$ от $Z_{рабmin}$ и самозапус-

ков обычно отстроено. Оно определяется по тем же условиям, что и $I^{II}_{с,з}$ токовых направленных защит: отстройка от начала второй зоны (конца первой) предыдущей дистанционной защиты *3*, отстройка от КЗ за трансформаторами подстанции в конце линии (точке $К_3$), при которых трансформаторы могут отключаться с $t>t^{II}$. При расчетах обычно пренебрегают разницей углов сопротивлений смежных элементов. Тогда с учетом коэффициента распределения токов (см. гл. 5) $k_{ток}$ по первому и второму условиям получаются неравенства $Z^{II}_{с,з1}\leqslant k^{II}_{отс}\,[z_1 l_{АБ}+k'_{отс}\,(Z^{I}_{с,зБ}/(k_{ток\,Б})_{min}]$ и $Z^{II}_{с,з1}\leqslant k^{II}_{отс}(z_1 l_{АБ}+k''_{отс}\;Z_{тmin}/k_{ток\,тmax})$. Здесь $k_{токБ}$ и $k_{токТ}$ учитывают неравенства токов в защите *1* и соответственно в линиях и трансформаторах подстанции *Б* при КЗ в расчетных точках (в конце $Z^{I}_{с,зБ}$ и $К_3$); эти коэффициенты, нарушая плавную зависимость $Z_з=f(l)$, могут быть больше 1, облегчая согласование, повышая $k^{II}_{чI}$, или иногда меньше 1, затрудняя его. Последнее может быть, например, при наличии на участке *БВ* двух параллельных цепей. При определении $Z_{тmin}$ следует учитывать возможность существенного снижения $Z_т$ трансформаторов при регулировании их коэффициентов трансформации под нагрузкой; $k^{II}_{отс}\approx k^{I}_{отс}$; $k'_{отс}<1$ учитывает возможность отрицательной погрешности органа сопротивления защиты *Б*; $k''_{отс}$ в общем случае учитывает искажение замера при $К^{(2)}$ за трансформатором с соединением обмоток У/Д [1], но часто принимается примерно равным 1.

При наличии III ступени, резервирующей действие II, считается возможным иметь $k^{II}_{ч}\approx 1{,}25$. Направленность действия II ступеней прежде всего определяется условиями повышения их чувствительности. Для исключения мертвых зон характеристику $Z^{II}_{с,р}=f(\varphi_р)$ выбирают так, чтобы она заходила в зоны действия защит последующих элементов.

Выбор $Z^{III}_{с,з}$. Сопротивления $Z^{III}_{с,з}$ в отличие от $Z^{I}_{с,з}$ и $Z^{II}_{с,з}$ обычно выбираются по условию отстройки от минимального рабочего сопротивления $Z_{рабmin}$: $Z^{III}_{с,з,\,расч}<Z_{рабmin}$ при $\varphi_р=\varphi_{раб}$. Однако более тяжелым является условие возврата органа в исходное состояние после отключения внешнего КЗ (рис. 6.3). По этому условию необходимо иметь сопротивление возврата $Z_{в,з,расч}<Z_{перmin}$ или $Z_{в,з,расч}\leqslant Z_{рабmin}/k_{отс}k_{зг}$, где $k_{отс}>1$, а $k_{зг}>1$ учитывает пониженное переходное $Z_р=Z_{перmin}$ по сравнению $Z_{рабmin}$ за счет самозапуска двигателей потребителей, обусловливающего повышение тока в защищаемой линии и понижение напряжения. Сопротивление $Z_{в,з,расч}$ выражается через $Z_{с.з,расч}$. Учитывая эти соотношения, получаем

$$Z_{с,з,расч}\leqslant Z_{рабmin}/k_{отс}\,k_в\,k_{зг}. \qquad (6.2)$$

Конец вектора $\underline{Z}_{с.з,расч}$ (при угле $\varphi_{раб}$) определяет на комплексной плоскости $\underline{Z}$ расчетную точку характеристики срабатывания III ступени $Z^{III}_{с,з}=f(\varphi_р)$. Эта характеристика должна обеспечивать необходимую чувствительность защиты ($k_ч\geqslant 1{,}5$ при металлическом КЗ в конце защищаемого участка). При КЗ в конце смежных элементов, когда защита может работать как резервная (дальнее резервирование), считается желательным иметь $k_ч\geqslant 1{,}25$.

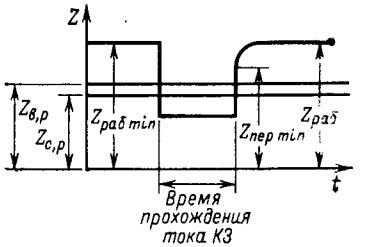


Рис. 6.3. Диаграмма, характеризующая поведение органа сопротивления последней ступени защиты при внешних КЗ

Для обеспечения этих, в общем случае весьма тяжелых, требований для III ступеней часто используются органы с характеристиками срабатывания $Z^{III}_{с,з}=f(\varphi_р)$, имеющими в плоскости $\underline{Z}$ вид, отличный от принимаемых для I и II ступеней, — например в виде треугольника на рис. 6.6, *л*. Ранее часто повышение чувствительности достигалось за счет свойств направленного органа сопротивления с характеристиками по рис. 6.6, *б* и *в*. Для первого варианта (рис. 6.6, *б*) формула (6.2) получает следующий уточненный вид: $Z_{с,з,расч}\leqslant Z_{рабmin}/k_{отс}k_в k_{зг}\cos(\varphi_{раб}-\varphi_л)$. Так как $\varphi_{раб}$ обычно значительно меньше $\varphi_л$, получается выигрыш в чувствительности в $1/\cos(\varphi_{раб}-\varphi_л)$ раз. Для устранения мертвой зоны используются те же мероприятия, что и для II ступени. Необходимо отметить, что в некоторых исполнениях защит ИО III ступеней выполняют также функции пусковых органов защиты. В сетях с $U_{ном}\leqslant 35$ кВ они бывают даже токовыми. К их включению

и параметрам при выполнении функций пусковых органов могут предъявляться дополнительные требования.

Особенности выбора параметров срабатывания защит от $K^{(1)}$. Принципиально для одиночных участков линий подход к выбору $Z_{с,з}$ ступеней защиты остается таким же, как и рассмотренный для защит, работающих при многофазных КЗ и использующих междуфазные напряжения и разности фазных токов. Отличия определяются в основном тем, что для данных ИО используются фазные напряжения и фазные токи и их составляющие нулевой последовательности. Поэтому в качестве источников питания следует учитывать не только синхронные машины, но и трансформаторы (автотрансформаторы), имеющие заземленные нейтрали. На работу рассматриваемых органов может также оказывать влияние взаимоиндукция между линиями, особенно при параллельных цепях. Использование способов отстройки, применяемых для токовых направленных защит нулевой последовательности (см. гл. 5), часто считается нецелесообразным. Специальные меры для отстройки, усложняющие, однако, выполнение защиты, рассматриваются ниже. Изложенное явилось одной из причин, обусловливающих критическое отношение отечественных специалистов к применению дистанционных защит старых исполнений для работы при $K^{(1)}$.

Некоторые особенности выбора параметров срабатывания защит линий, для которых учитывается поперечная емкостная проводимость. Выше рассматривался выбор параметров срабатывания ИО защит линий относительно небольшой длины, когда возможно пренебречь их равномерно распределенной проводимостью. Для линий значительной длины напряжения 330 кВ и выше этот учет необходим (см. гл. 1). Входное сопротивление участка линии при КЗ на ее конце с $R_п=0$ $\underline{Z}_{вх,к}=\underline{Z}_с\mathrm{th}\gamma l$. При пренебрежении потерями в линии (в выражении для коэффициента распространения $\gamma=\alpha+j\beta$ принимается $\alpha=0$) абсолютное значение $|\underline{Z}_{вх,к}|=Z_{вх,к}=Z_с\mathrm{tg}\beta l$, где $\beta=\omega/v=$ $=0{,}06$ град/км. Таким образом, $Z_{вх,к}$ растет в рассматриваемом случае не пропорционально длине l, а быстрее. При $l=1500$ км (четверть длины волны $\lambda=360°/\beta=$ $=6000$ км) $Z_{вх,к}=\infty$. Такое же сопротивление имеется при холостом ходе линии. Поэтому применение выполненной обычным образом дистанционной защиты в этом случае невозможно. Длины l участков обычно значительно меньше 1000 км, и тогда защита может быть использована.

Первичное сопротивление срабатывания I ступени защиты $Z^{I}_{с,з}=k^{I}_{отс}Z_с\mathrm{tg}\beta l$. Приведенные соображения могут быть использованы и для определения $Z^{II}_{с,з}$ [11].

6.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Требования к формам характеристик $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ органов сопротивления с двумя входными величинами. Для органов с одним $\underline{U}_р$ и одним $\underline{I}_р$ рассмотрение вопроса удобно проводить в комплексной плоскости сопротивлений. В этой плоскости могут быть изображены как сопротивления элементов сети (см. рис. 6.2), так и характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ органов. В начале координат (рис. 6.4) целесообразно располагать конец участка $БВ$, со стороны $Б$ которого включается рассматриваемое устройство защиты.

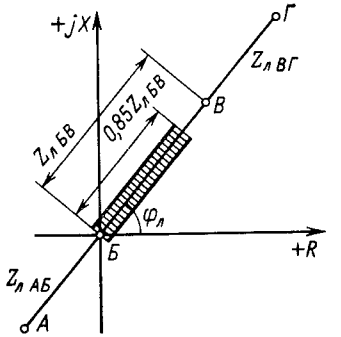


Рис. 6.4. Использование комплексной плоскости сопротивлений для выбора характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$

Для выполнения органа сопротивления, например I ступени, характеризуемого $Z^{I}_{с,з}\approx 0{,}85Z_{л,\,БВ}$, при отсутствии факторов, которые могли бы существенно искажать его работу, достаточно было бы иметь характеристику $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$, проходящую через начало координат, что обеспечивает направленность действия (охват части третьего квадранта недопустим по условию отстройки от КЗ на участке $АБ$), и конец комплекса $0{,}85Z_{л,БВ}$ и охватывающую последний с небольшим запасом в перпендикулярном направлении. Для органов II и III ступеней охват небольшой части участка $АБ$ допустим, так как они работают с выдержками времени. Приходится, однако, считаться с некоторыми факторами, в известной мере могущими противоречиво влиять на выбор характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$. К числу этих факторов относятся необходимость учета переходных сопротивлений $R_п$ в месте повреждения, при наличии которых защита должна правильно функционировать, и отстройка от нагрузочных режимов и режимов качаний, при которых за-

щита не должна срабатывать. Важными в этом направлении следует считать работы зарубежных (Варрингтон, Братен) и советских (В. Л. Фабрикант, Г. И. Атабеков, Э. М. Шнеерсон и др.) авторов.

Учет переходных сопротивлений $R_п$ в месте повреждения. Эквивалентная схема для случая повреждения через $R_п$ в точке K участка $БВ$ сети по рис. 6.2 приведена на рис. 6.5, *а*. При междуфазном КЗ, например трехфазном симметричном $K^{(3)}$, напряжение $\underline{U}_р=\underline{z}_1 l_к \underline{I}_р+R_п\underline{I}_п$ и $\underline{Z}_р=\underline{U}_р/\underline{I}_р=\underline{z}_1 l_к+(\underline{I}_п/\underline{I}_р)R_п$. Из последнего выражения следует, что дополнительный член $\Delta\underline{Z}=(\underline{I}_п/\underline{I}_р)R_п$ образует с осью $+R$ угол $\alpha=\arg(\underline{I}_п/\underline{I}_р)$. Ток $\underline{I}_п$ в $R_п$ может по фазе

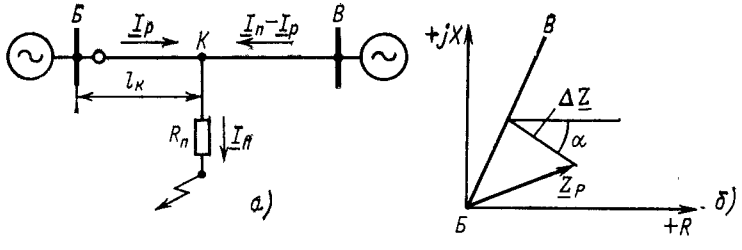


Рис. 6.5. Влияние $R_п$ на замеряемое сопротивление $Z_р$ при двустороннем питании

отставать от тока $\underline{I}_р$ или опережать его. Соответственно мнимая часть $\Delta\underline{Z}$ будет отрицательной или положительной; если, например, $\underline{I}_п$ отстает от $\underline{I}_р$, то он будет опережать ток $\underline{I}_п$—$\underline{I}_р$, подходящий к месту повреждения со стороны подстанции B. Поэтому если для защиты, включенной со стороны $Б$, $\Delta\underline{Z}$ имеет отрицательную мнимую слагающую, то для защиты, включенной со стороны B, эта слагающая положительна. Таким образом, $\Delta\underline{Z}$ может иметь в плоскости $\underline{Z}$ наклон α вверх или вниз по отношению к оси $+R$ (рис. 6.5, *б*). В частном случае при $\widehat{\underline{I}_п\underline{I}_р}=0$ угол $\alpha=0$ и $\Delta\underline{Z}$ направлено параллельно оси $+R$. Неучет возможных $\Delta\underline{Z}$ при выборе формы характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ может приводить к излишним срабатываниям защиты при внешних повреждениях и сокращению защищаемой зоны (определяемой для случая металлического КЗ). Необходимо отметить, что при междуфазных КЗ $R_п$ обычно определяется сопротивлением дуги, которое (см. гл. 1) обратно пропорционально току $I_п$ в нем. Поэтому в современных системах с большими значениями $I_к$ и защитами с малыми $t_з$ (дуга не успевает раздуться) влияние $\Delta\underline{Z}$ бывает не очень большим. Другое положение возникает при $K^{(1)}$, когда $R_п$ в основном определяется значительными сопротивлениями заземления опор или другими возможными переходными сотротивлениями. В этих случаях $R_п$ могут весьма существенно влиять на работу защит.

Учет нагрузочных режимов. Нагрузочный режим, как уже отмечалось выше, может характеризоваться $\underline{Z}_{раб}=\underline{U}_{раб}/\underline{I}_{раб}$. При выборе формы характеристик $\underline{Z}^{III}_{с,р}=f(\varphi_р)$ следует учитывать как передачу больших активных мощностей от шин в сторону защищаемой линии (небольшие $\varphi_{раб}$, относительно малые $Z_{раб}$), так и передачу небольших, в основном реактивных мощностей (большие $\varphi_{раб}$). При выборе характеристик $Z^{I}_{с,р}$ и $Z^{II}_{с,р}$ I и II ступеней, имеющих жестко ограниченные значения по условиям селективной работы защит, нагрузочные режимы, в особенности для I ступени, не являются определяющими.

Необходимо отметить, что проведенное выше рассмотрение относилось к характеристикам органов, предназначенных для реагирования на заданные петли КЗ. Могут быть случаи, когда эти органы, правильно работая при этих КЗ, будут излишне срабатывать при внешних КЗ, образующих другие петли в трехфазной сети, что недопустимо. В таких случаях к защите приходится добавлять специальные избирательные органы поврежденных фаз, в схеме защиты предусматривать специальные мероприятия, исключающие такие излишние срабатывания, или для органов, реагирующих на $K^{(1)}$, использовать избиратели, составляющие основную часть устройств однофазного отключения и (ОАПВ).

Учет качаний. При качаниях комплекс $\underline{Z}_р$ может оказываться в пределах области, определяемой характеристикой $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$, поэтому указанная область в направлении, примерно перпендикулярном $\underline{Z}_л$, должна по возможности сужаться. Однако это сужение противоречит необходимости учета $R_п$. Следует также отметить, что в случае попадания электрического центра системы (см. гл. 1) на защищаемую линию окажется неизбежным срабатывание ее защиты, воспринимающей этот режим как КЗ в защища-

емой зоне, что недопустимо. Поэтому учет качаний при выборе $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ не осуществляется, а защиты снабжаются специальными блокировками от качаний.

Учет поперечных проводимостей. Поперечная проводимость влияет на угол $\varphi_л$ тем больше, чем длиннее линия. Угол $\varphi_л$ при этом уменьшается и при длине линии l, близкой к четверти волны (1500 км), ее входное сопротивление становится чисто активным. Однако при $l<1000$ км изменением $\varphi_л=f(l)$ обычно можно пренебрегать. Влияние рассматриваемого фактора на выбор $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ более подробно рассмотрено в [11].

Характеристики органов сопротивления с числом воздействующих величин больше двух. Органы с числом воздействующих величин больше двух однозначных характеристик $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ в плоскости $\underline{Z}$ или какой-либо другой плоскости не имеют. Это, однако, не означает, что отсутствуют возможности анализа поведения таких органов под воздействием рассмотренных выше факторов. Как было пояснено в гл. 2, при наличии алгоритма функционирования органов, использующего положение векторной и булевой алгебр, возможно всестороннее рассмотрение работы органов с числом воздействующих величин больше двух. Для этого, однако, необходимо провести ряд последовательных расчетов на ЭВМ, шаг за шагом приближаясь, например, к предельному значению $R_п$, при котором орган при повреждении в защищаемой зоне еще срабатывает.

6.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ДВУМЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Существует большое число разновидностей характеристик как органов отдельных ступеней защиты, так и их сочетаний для всех (обычно трех) ступеней защиты. Особенно много уточненных для достижения разных целей характеристик появляется в последнее время в связи с возможностями, открывшимися при использовании интегральной микроэлектронной и микропроцессорной техники. Выбор целесообразных характеристик определяется при этом не только соображениями § 6.3, но иногда и рядом практических соображений. Ниже (рис. 6.6) рассматриваются некоторые типичные или используемые на практике характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ для одной ступени в плоскости $\underline{Z}$; области срабатывания органов заштрихованы.

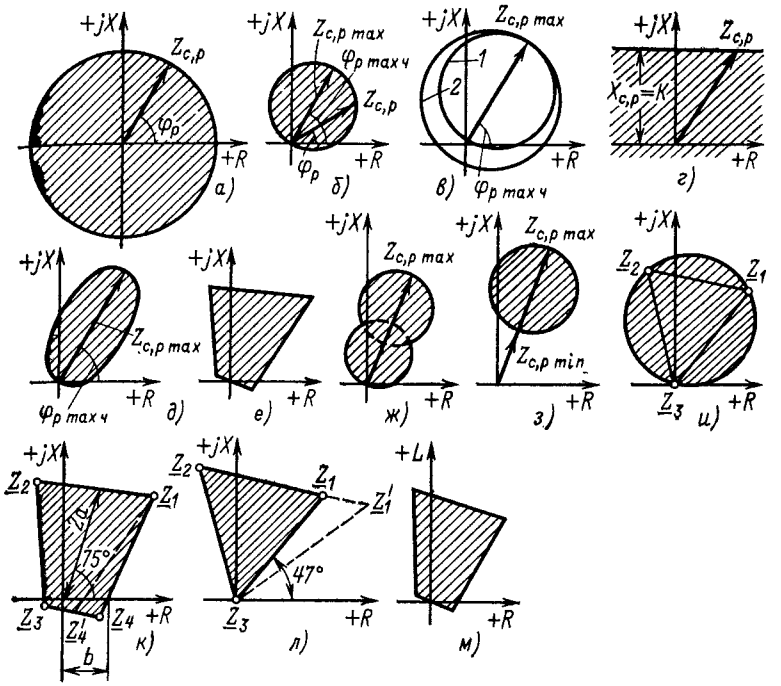


Рис. 6.6. Виды характеристик органов сопротнвления

Круговая характеристика с центром в начале координат (рис. 6.6, *а*). Сопротивление $Z_{с,р}$ органов с такой характеристикой не зависит от $\varphi_р$. Поэтому они называются органами полного сопротивления. Применяются в защитах сетей с $U_{ном}\leqslant 35$ кВ с отдельными органами направления мощности, поскольку (как было показано СРЗиУ ТЭП еще в 30-х годах) направленные реле сопротивления мало пригодны для правильного действия защит при $K_{дв}^{(1,1)}$.

Круговая характеристика, проходящая через начало координат, с центром, обычно располагаемым на прямой, характеризующей защищенный участок (рис. 6.6, *б*). Сопротивление $Z_{с,р}$ зависит от $\varphi_р$, причем наибольшую чувствительность ($Z_{с,р max}$) орган имеет при $\varphi_{р max ч}=\varphi_л \operatorname{arctg} X_л/R_л$. Органы с такой характеристикой не охватывают повреждения на смежных элементах сети, располагающихся в третьем квадранте. Поэтому они называются направленными органами сопротивления. В общем случае возможно

расположить диаметр окружности под углом $\varphi_р < \varphi_л$ для повышения чувствительности к $R_п$. Реальная характеристика не проходит через начало координат (рис. 6.6, *в*, окружность *1*), так как орган имеет конечную чувствительность. Поэтому в начале защищаемого участка появляется мертвая зона, при КЗ в которой орган может отказывать в срабатывании. При использовании органа для ступеней с выдержкой времени мертвую зону можно исключить, несколько смещая характеристику в третий квадрант (рис. 6.6, *в*, окружность *2*). Для исключения мертвой зоны у I ступени и других при отсутствии у них смещения характеристик используются специальные меры (контуры «памяти», запоминающие $U_р$, имевшееся до момента КЗ, подпитка напряжением неповрежденных фаз при несимметричных КЗ и др.).

Характеристика в виде прямой, параллельной оси $+R$ (рис. 6.6, *г*). Она отсекает на оси $+j$ отрезок $X_{с.р} = \text{const}$. Орган с такой характеристикой называется органом реактивного сопротивления. Первоначально предполагалось, что использование таких характеристик будет исключать вредное влияние на работу защиты $R_п$. Это, однако, справедливо только при использовании защиты для линии в сети с односторонним питанием. При наличии двустороннего питания (от разных источников) места повреждения через $R_п$ за счет расхождения по фазе токов $\underline{I}_р$ и $\underline{I}_п$ (в $R_п$) влияние $R_п$ может быть весьма вредным. Рассматриваемые органы не могут работать самостоятельно, без специальных пусковых органов, так как их не удается отстраивать от нагрузочных режимов. Поэтому в настоящее время органы реактивного сопротивления в обычном исполнении не применяются.

Овальные характеристики, проходящие через начало координат и обеспечивающие максимальную чувствительность при $\varphi_{р\,max\,ч} = \varphi_л$ (рис. 6.6, *д*). Такие и подобные им характеристики использовались для III ступеней защит как обеспечивающие лучшую отстройку от рабочих режимов и бо́льшую чувствительность, чем у направленных органов сопротивления (рис. 6.6, *б*). Для исключения мертвых зон и повышения чувствительности к $R_п$ применяются те же мероприятия, что и в варианте рис. 6.6, *б*. В настоящее время они используются редко.

Четырехугольная характеристика (рис. 6.6, *е*). Ее верхняя сторона направляется под небольшим углом к оси $+R$ и поэтому близка к характеристике органа реактивного сопротивления (рис. 6.6, *г*). Она должна четко фиксировать концы защищаемых зон I и II ступеней и быть отстроенной от реактивных (в основном) небольших нагрузок, обусловливающих значительные реактивные слагающие $Z_{раб}$ для III ступеней. Правая боковая сторона обеспечивает отстройку от рабочих режимов, а также по возможности ликвидирует недостатки характеристики органа реактивного сопротивления. Левая боковая сторона помогает отстройке от мощностей нагрузок, передаваемых к месту включения защиты. Нижняя сторона для органа I ступени проходит через начало координат и имеет наклон к оси $+R$, обеспечивающий его работу при близких повреждениях через $R_п$; у II и III ступеней она может быть смещена в третий квадрант для устранения мертвых зон. Четырехугольные характеристики часто используются для II и III ступеней защит.

Некоторые специальные формы характеристик. Для повышения чувствительности II ступеней защит могут быть использованы характеристики в виде двух пересекающихся окружностей (рис. 6.6, *ж*) или в виде, например, окружности, смещенной в первом квадранте в направлении защищаемых участков линий (рис. 6.6, *з*). В первом случае необходимо обращать внимание на обеспечение достаточной чувствительности в местах сопряжения окружностей, во втором учитывать, что III ступень сможет резервировать I, а возможно, и часть II ступени.

Характеристики, примененные отечественной промышленностью для новых исполнений дистанционной защиты линий 110—380 кВ от многофазных КЗ. В новых отечественных защитах, выполненных на интегральной микроэлектронике с использованием операционных усилителей [15], для I ступени применен орган сопротивления с характеристикой, имеющей форму, близкую к окружности, проходящей через начало координат (рис. 6.6, *и*). Она составлена из трех дуг, опирающихся соответственно на отрезки, образованные особыми точками $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$. Такое выполнение, как утверждают авторы разработки, обеспечивает по сравнению с обычной окружностью сокращение времени срабатывания органа и уменьшение искажения формы характеристики при наличии в подводимых величинах апериодических и колебательных затухающих слагающих. Характеристика срабатывания II ступени (рис. 6.6, *к*) имеет четырехугольную форму с вершинами $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$, охватывающую начало координат.. Предусмотре-

ны две ступени регулирования наклона правой стороны: $b/a=0{,}6$ и $b/a=0{,}3$; второй вариант показан пунктиром. Характеристика срабатывания III ступени (рис. 6.6, *л*) имеет форму треугольника с вершинами $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ (последняя — в начале координат), что обеспечивает необходимую отстройку от нагрузочных режимов при соблюдении неплохой чувствительности. Предусмотрены две ступени регулирования наклона правой стороны. Для исключения мертвой зоны у I и III ступеней предусматривается общий блок «памяти», формирующий напряжение, вводимое в сравниваемую величину, соответствующую точке $\underline{Z}_3$.

Число сформированных величин $\underline{H}$ для создания характеристик с двумя воздействующими величинами $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$. Число сформированных из одного $\underline{U}_р$ и одного $\underline{I}_р$ величин $\underline{H}$ (см. гл. 2) для некоторых характеристик $\underline{Z}_{с.р}=f(\varphi_р)$, приведенных на рис. 6.6, может быть и больше двух. Так, например, для создания четырехугольной характеристики используются четыре величины $\underline{H}_1=k_{H1}\underline{I}_р\times(\underline{Z}-\underline{a})$, $\underline{H}_2=k_{H2}\underline{I}_р(\underline{Z}-\underline{b})$, $\underline{H}_3=k_{H3}\underline{I}_р(\underline{Z}-\underline{c})$ и $\underline{H}_4=k_{H4}\underline{I}_р\times(\underline{Z}-\underline{d})$ с одинаковыми аргументами для коэффициентов k. Поэтому взаимные фазные соотношения между $\underline{H}$ соответствуют фазным соотношениям между $\underline{Z}-\underline{a}$, $\underline{Z}-\underline{b}$, $\underline{Z}-\underline{c}$ и $\underline{Z}-\underline{d}$. Особые точки $\underline{a}$, $\underline{b}$, $\underline{c}$ и $\underline{d}$ определяют вершины четырехугольника. При нахождении конца $\underline{Z}_р$ внутри четырехугольника, т. е. в защищаемой зоне, угол между крайними комплексами $H>180°$, а при КЗ вне защищаемой зоны — меньше 180°. Рассмотренный принцип впервые опубликован в 1963 г. Киатура Конти (Япония). Далее он был развит А. Б. Витановым (Болгария) и использован другими авторами [10, 15].

Сочетание характеристик органов всех ступеней защиты. Как следует из изложенного, характеристики $\underline{Z}_{с.р}=f(\varphi_р)$ для разных ступеней защиты с учетом разных требований, предъявляемых к их форме, и некоторых других соображений могут быть и бывают различными. Дополнительное требование к их сочетанию заключается в целесообразности резервирования области срабатывания каждой последующей ступенью предыдущей, а III ступенью — даже первых двух. В существующих исполнениях защит на электромеханической элементной базе для I и II ступеней часто использовался общий орган сопротивления, который в случае несрабатывания I ступени автоматически, например сработавшим органом III ступени, переключался на характеристику (того же вида) II ступени посредством уменьшения напряжения $U_р$. В настоящее время при микроэлектронной элементной базе особой надобности в экономии ИО, достигаемой за счет усложнения схемы, обычно не возникает и с учетом изложенного выше такое выполнение перестали применять.

Необходимо отметить, что в некоторых случаях характеристики органов даются не в комплексной плоскости $\underline{Z}$, а в плоскости LR (рис. 6.6, *м*) или в плоскости проводимостей [18].

6.5. ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Органы должны четко устанавливать зону, в которой произошло повреждение при любых режимах работы системы. Поэтому важным требованием, предъявляемым к ним, является независимость функционирования от абсолютных значений воздействующих напряжений и токов. Для реальных органов, имеющих конечное значение порога чувствительности, весьма существенно сохранение этого требования при возможно малых значениях $U_р$ и $I_р$. Для обеспечения независимости функционирования от значений $U_р$ и $I_р$ требуется определенный их выбор и сочетание; при этом необходимо иметь в виду, что трехфазная система характеризуется тремя фазными напряжениями и токами. Им соответствуют междуфазные напряжения, разности фазных токов и симметричные составляющие. Очевидно, что для обеспечения правильной работы *пофазных* органов, реагирующих на КЗ в определенной петле, необходимо использовать полные токи в этой петле и сочетать их с соответствующими им остаточными напряжениями. В связи с этим оказывается необходимым иметь разные сочетания $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ для многофазных КЗ в одной точке и однофазных КЗ. Важно также иметь одинаковые $\underline{Z}_р=\underline{U}_р/\underline{I}_р$ при всех расчетных видах КЗ в пределах каждой из указанных двух групп пофазных органов. Особо решается вопрос выбора $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ для действия защиты при $K_{дв}^{(1,1)}$. Ниже предполагается, что защита включена на линии с двусторонним питанием. Металлическое КЗ возни-

кает на расстоянии l от шин подстанции (см., например, рис. 6.2).

Сочетание $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ при многофазных КЗ. Наилучшим является сочетание одноименных междуфазных напряжений и разностей фазных токов. Поскольку должны учитываться три вида $K^{(2)}$, используются три пофазных органа со следующими сочетаниями $U_р$ и $I_р$:

орган 1 — $\underline{U}_р=\underline{U}_{AB}$, $\underline{I}_р=\underline{I}_A-\underline{I}_B=\underline{I}_{AB}$;

орган 2 — $\underline{U}_р=\underline{U}_{BC}$, $\underline{I}_р=\underline{I}_{BC}$;

орган 3 — $\underline{U}_р=\underline{U}_{CA}$, $\underline{I}_р=\underline{I}_{CA}$. Сопротивление на зажимах, например, органа 2 $\underline{Z}_{р2}=\underline{U}_{BC}/\underline{I}_{BC}$.

При $K^{(3)}$ будут, очевидно, работать одинаково все три органа и $Z_р^{(3)}=\sqrt{3}\,I^{(3)}z_1l/\sqrt{3}\,I^{(3)}=z_1l$. При $K^{(2)}$ орган 2 правильно срабатывает при $K_{BC}^{(2)}$, так как оказывается включенным на $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ петли КЗ: $Z_{р2BC}^{(2)}=2I^{(2)}z_1l/2I^{(2)}=z_1l$.

В междуфазных напряжениях и в разностях фазных токов при $K^{(1,1)}$ составляющие I_0 отсутствуют. Поэтому для того же органа 2 при $K_{BC}^{(1,1)}$ $U_{р2}^{(1,1)}=|\underline{I}_B^{(1,1)}-\underline{I}_C^{(1,1)}|z_1l$ и $Z_{р2BC}^{(1,1)}=z_1l$.

Таким образом, рассматриваемое включение, предложенное еще в 20-е годы, обеспечивает, как то и требуется, одинаковые $Z_р$ при всех видах многофазных КЗ в одной точке с $R_п=0$ для органа, включенного на величины петли КЗ. Два других органа работают при этом нечетко.

Сочетание $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ при однофазных КЗ. Выбор наилучшего сочетания $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ при $K^{(1)}$ первоначально (в конце 20-х годов) встретил затруднение. Напряжением и током петли КЗ в данном случае являются соответствующие $\underline{U}_ф^{(1)}$ и $\underline{I}_ф^{(1)}$, например $\underline{U}_A^{(1)}$ и $\underline{I}_A^{(1)}$. Напряжение $\underline{U}_A^{(1)}=\underline{U}_{к1}^{(1)}+\underline{z}_1l\underline{I}_1^{(1)}+\underline{U}_{к2}^{(1)}+\underline{z}_2l\underline{I}_2^{(1)}+\underline{U}_{к0}^{(1)}+\underline{z}_0l\underline{I}_0^{(1)}$. Сумма $\underline{U}_{к1}^{(1)}+\underline{U}_{к2}^{(1)}+\underline{U}_{к0}^{(1)}$ равна нулю, как представляющая $\underline{U}_A^{(1)}$ в месте металлического КЗ. Для линий $\underline{z}_1=\underline{z}_2$. С учетом этого, преобразуя выражение для $\underline{U}_A^{(1)}$ добавлением к нему члена $(\underline{z}_1\underline{I}_0-\underline{z}_1\underline{I}_0)=0$, получаем $\underline{U}_A^{(1)}=\underline{z}_1l[\underline{I}_A^{(1)}+(\underline{z}_0-\underline{z}_1)\underline{I}_0/\underline{z}_1]$ и $\underline{Z}_р^{(1)}=\underline{z}_1l+(\underline{z}_0-\underline{z}_1)\underline{I}_0/\underline{I}_A^{(1)}$. Таким образом, работа органа с рассматриваемым включением зависит от отношения $\underline{I}_0/\underline{I}_A^{(1)}$, которое в общем случае может колебаться в широ-

ких пределах (см. гл. 1), изменяясь от 1/3 при одностороннем питании линии до 1, когда защита оказывается работающей со стороны трансформатора (автотрансформатора) с заземленной нейтралью при отсутствии генерирующих мощностей со стороны других его обмоток. Исключение влияния $I_0/I_ф$ на $Z_р^{(1)}$ было впервые предложено, по-видимому, независимо в 1930—1931 гг. в США и Франции. Сущность предложения непосредственно вытекает из рассмотрения $\underline{U}_ф^{(1)}=\underline{z}_1l(\underline{I}_ф+k\underline{I}_0)$, где $k=(z_0-z_1)/z_1$. Если в качестве $\underline{I}_р$ принять не $\underline{I}_ф$, а $\underline{I}_ф+k\underline{I}_0$, то $\underline{Z}_р^{(1)}=\underline{U}_ф^{(1)}/(\underline{I}_ф+k\underline{I}_0)=\underline{z}_1l$ оказывается не зависящим при $R_п=0$ для органа петли КЗ как от отношения $\underline{I}_0/\underline{I}_ф^{(1)}$, так и от всех других электрических величин в системе. Два других органа, включенных не на петли КЗ, работают нечетко. Дополнительно вводимый ток $k\underline{I}_0$ называется *током компенсации*, а коэффициент k — *коэффициентом компенсации*, принимаемым обычно действительным числом.

Рассматриваемое включение обеспечивает также необходимые значения $\underline{Z}_р$ (такие же, как при $K^{(1)}$) в случае металлических $K^{(1,1)}$ для обоих органов, включенных на две образующиеся петли КЗ, так как для них $\underline{U}_ф^{(1,1)}$ имеют те же значения, что при $K^{(1)}$. Теперь уже только один, третий орган работает нечетко. Включение будет обеспечивать правильную работу органов при $K^{(3)}$, когда $I_0=0$.

Целесообразные сочетания $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ при всех видах КЗ в одной точке. Рассмотренные выше два сочетания охватывают все виды КЗ в одной точке. Для всех многофазных КЗ при этом предпочитают использовать первую схему, включаемую на междуфазные величины. Ее положительным свойством является исключение влияния взаимоиндукций между цепями линий, а при $K^{(1,1)}$ — исключение (в противоположность второй схеме) вредного влияния основной слагающей $R_п$ на землю ($R_{п,з}$ в гл. 1), не входящей в междуфазные петли КЗ.

Необходимые для правильной работы защиты $Z_р$ обеспечивают только органы, включаемые на $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ петель КЗ. Другие органы могут работать нечетко, имея $Z_р$, бо́льшие или меньшие необходимых. Преувеличенные $Z_р$ (что часто имеет место в связи с использованием для них больших напряжений неповрежденных фаз) не опасны. Преуменьшенные $Z_р$ могут приводить к излишним срабатываниям защит при внешних КЗ. Поэтому в общем случае необхо-

димо совместное рассмотрение работы всех трех пофазных органов.

Способы рассмотрения работы пофазных органов, включенных не на петлю КЗ. В общем случае при КЗ на защищаемом участке, используя метод наложения нагрузочного режима с фазными $\underline{U}_{раб}$ и $\underline{I}_{раб}$ на аварийный режим КЗ и принимая за особую фазу A, имеем следующие соотношения: для токов $\underline{I}_A=\underline{I}_{A\,раб}+\underline{I}_{1ав}+\underline{I}_{2ав}+\underline{I}_{0ав}$; $\underline{I}_B=a^2\underline{I}_{A\,раб}+a^2\underline{I}_{1ав}+a\underline{I}_{2ав}+\underline{I}_{0ав}$; $\underline{I}_C=a\underline{I}_{A\,раб}+a\underline{I}_{1ав}+a^2\underline{I}_{2ав}+\underline{I}_{0ав}$; для напряжений $\underline{U}_A=\underline{U}_{A\,раб}-(\underline{Z}_{1c}\underline{I}_{1ав}+\underline{Z}_{2c}\underline{I}_{2ав}+\underline{Z}_{0c}\underline{I}_{0ав})$; $\underline{U}_B=a^2\underline{U}_{A\,раб}-(a^2\underline{Z}_{1c}\underline{I}_{1ав}+a\underline{Z}_{2c}\underline{I}_{2ав}+\underline{Z}_{0c}\underline{I}_{0ав})$; $\underline{U}_C=a\underline{U}_{Aраб}-(a\underline{Z}_{1c}\underline{I}_{1ав}+a^2\underline{Z}_{2c}\underline{I}_{2ав}+\underline{Z}_{0c}\underline{I}_{0ав})$.

В этих выражениях $\underline{Z}_{1c}$, $\underline{Z}_{2c}$ и $\underline{Z}_{0c}$ — эквивалентные сопротивления питающей системы со стороны места включения защиты. Указанные соотношения являются исходными для двух основных способов рассмотрения вопроса.

По первому способу все соотношения рассматриваются в комплексной плоскости $\underline{Z}$ основной петли КЗ, для действия при повреждениях в которой предназначен один из трех органов, например орган *1* для петли КЗ между фазами A и B в защищаемой зоне. В этой плоскости орган имеет однозначную характеристику $\underline{Z}_{с,р1}=f(\varphi_р)$, не зависящую от параметров системы; она определяет работу органа и может использоваться для анализа его поведения. В частности, она может служить для выяснения поведения данного органа *1* при повреждениях в других образующихся петлях — BC и CA. Используя приведенные выше соотношения, определяют для внешних КЗ $\underline{Z}_{р1}=\underline{U}_{AB}/\underline{I}_{AB}$; если конец $\underline{Z}_{р1}$ попадает в область срабатывания характеристики $Z_{с,р1}$, то орган *1* срабатывает неправильно.

По второму способу для определения работы, например, того же органа *1* при КЗ в других петлях (BC, CA) переносят его характеристику срабатывания с помощью дробно-линейных преобразований в плоскости $\underline{Z}$, соответствующие этим петлям. При этом в случае попадания концов вектора $\underline{Z}_{р2}$ или $\underline{Z}_{р3}$ при КЗ в петлях BC или CA в область, охватываемую соответствующей перенесенной характеристикой органа *1*, устанавливается факт неправильного срабатывания последнего.

Можно рассуждать и по-другому. При перенесении характеристик срабатывания органов *2* и *3* в плоскость $\underline{Z}$ органа *1* представляется возможным оценивать работу всех трех органов при повреждениях в петле КЗ органа *1*.

На практике часто пользуются первым способом, отвечающим действительному функционированию органов.

Использование компенсированных напряжений. Под *компенсированными напряжениями,* используемыми для работы ИО при КЗ, обычно понимаются разности остаточных напряжений петли КЗ и произведения тока компенсации на сопротивление $Z_у$ уставки ИО. При этом учитывается, что в случае КЗ на границе защищаемой зоны и $R_п=0$ остаточное напряжение равно падению напряжения в $\underline{Z}_у$. Для органов, использующих фазные величины, $\underline{U}'_ф=\underline{U}_ф-\underline{Z}_у(\underline{I}_ф+k\underline{I}_0)=(\underline{z}_1 l-\underline{Z}_у)(\underline{I}_ф+k\underline{I}_0)$ и для органов с междуфазными величинами $\underline{U}'_{мф}=\underline{U}_{мф}-\underline{Z}_у\underline{I}_{мф}=(\underline{z}_1 l-\underline{Z}_у)\underline{I}_{мф}$.

Вводя понятие компенсированного $\underline{Z}'_р$ и деля все члены соответственно на $\underline{I}_ф+k\underline{I}_0$ или $\underline{I}_{мф}$, получаем для органов с рассмотренными сочетаниями $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ общее выражение (принимая для $\underline{z}_1$ и $\underline{Z}_у$ одинаковые углы) $Z'_р=z_1 l-Z_у$. При КЗ в защищаемой зоне $z_1 l<Z_у$ и орган срабатывает, при КЗ вне защищаемой зоны $z_1 l>Z_у$ и орган не срабатывает. Можно также давать оценку по выражению (см. гл. 1) $y=\mathrm{sign}(z_1 l-Z_у)$. Если $y<0$, орган срабатывает, если $y>0$, орган не срабатывает. Использование компенсированных напряжений в явном или скрытом виде присуще большинству применяемых в настоящее время как пофазных, так и многофазных органов.

Сочетание $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ для органов с числом воздействующих величин $n>2$. Это могут быть как специальные выполнения пофазных органов (например, $\underline{U}_{р1}=\underline{U}_A$ и $\underline{U}_{рII}=\underline{U}_{BC}-\underline{Z}_у\underline{I}_{BC}$ и т. д.), так и трехфазные органы. Основной интерес представляют трехфазные органы, которые могут объединять функции нескольких пофазных органов и исключать необходимость применения мер по предотвращению возможных излишних срабатываний последних. Компенсированные напряжения, например, могут сочетаться с величиной, пропорциональной току $\underline{I}_р$ (см. ниже).

Особенности выбора $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ для работы пофазных органов при $K^{(1,1)}_{дв}$. Повреждения $K^{(1,1)}_{дв}$, как указывалось в гл. 1, практически имеют место, и то редко, только в сетях с изолированными или заземленными через дуго-

гасящие реакторы нейтралями, в которых дистанционные защиты от $K_{з}^{(1)}$ не требуются. Поэтому использование только для $K_{дв}^{(1,1)}$ отдельных органов нецелесообразно и не практикуется. Для работы при $K_{дв}^{(1,1)}$ обычно применяются защиты от многофазных КЗ в одной точке; для возможности отключения только одного места повреждения они выполняются двухфазными (с TA в фазах A и C). Рассмотрение, проведенное в гл. 1, показывает, что на участках с $\underline{I}_0=0$ для органов целесообразно использовать $\underline{U}_{мф}$, а при $\underline{I}_0\neq 0$ необходимо применять $\underline{U}_{ф}$. Для автоматического переключения с $\underline{U}_{мф}$ на $\underline{U}_{ф}$ применяется орган тока, включаемый на $\underline{I}_{р}=3\underline{I}_0$; учитывая двухфазное выполнение защиты, и при многофазных КЗ приходится осуществлять автоматическое переключение ИО на необходимые петли КЗ (см., например, [10]).

Учет взаимоиндукции при выборе параметров дистанционных защит. Взаимоиндукция между цепями линий, прежде всего параллельных, близко расположенных на всем протяжении, может существенно влиять на работу их защит (см. гл. 1). Для токовых направленных защит нулевой последовательности (см. гл. 5) отстройка от взаимоиндукции производится их загрублением по токам срабатывания. При этом защищаемые зоны и коэффициенты чувствительности могут сильно уменьшаться. Такое решение вопроса для дистанционных защит считается неприемлемым. Отстройка от влияния токов $\underline{I}_0$, появляющихся при внешних $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ в заземленной с двух сторон для ремонта цепи (см. рис. 5.18, *а*), могла бы производиться корректировкой тока $\underline{I}_0$ в сформированных величинах органов сопротивления. Для корректировки работы защиты в рассматриваемом наиболее тяжелом случае, сопровождающемся уменьшением $Z_{р}$, — на время ремонта цепи — в защиту может подаваться через дополнительный TA, включаемый в цепь ее заземления, составляющая $\underline{I}'_0$ такого значения, которое обеспечивает $Z_{р}=Z_{1л}$ (предложение К. А. Бринкиса, ОДУ Северо-Запада), или может производиться изменение ее уставки с использованием ножа заземляющего разъединителя (предложение В. А. Рубинчика, ЭСП).

Возможны и преувеличенные замеры, например при работе двух цепей и КЗ на шинах. В зарубежной практике с учетом этого режима предлагалась компенсация в защите одной цепи током $\underline{I}_0$ второй цепи. Как было показано в отечественных работах (см., например, [1]), такая компенсация в ряде случаев может обусловливать неправильные срабатывания защит и в отечественной практике не применяется. При этом учитывается, что в случае работы двух цепей достаточно быстрое отключение $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ может обеспечиваться поперечной направленной защитой (см. гл. 7).

В общем случае представляется нежелательным идти на сокращение уставки $Z_{у}$ органов защиты I ступени. Выбор целесообразного коэффициента компенсации $\underline{k}$ нуждается в уточнении. Окончательные рекомендации будут, вероятно, приняты при внедрении новых отечественных дистанционных защит от $K^{(1)}$ в эксплуатацию.

6.6. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для осуществления ИО защит от многофазных КЗ в одной точке приемлемые свойства имеют пофазные органы, включаемые на междуфазные напряжения и разности фазных токов. Для защит от однофазных КЗ пофазные органы с токовой компенсацией в отечественной практике не применяются, так как их работа может сильно зависеть от $R_{п}$ в месте повреждения, особенно при учете сдвига фаз источников ЭДС, токов нагрузки. Поэтому ниже основное внимание уделяется принципам работы органов защит от $K^{(1)}$ с улучшенными свойствами и рассматриваются только некоторые вопросы по органам защит от многофазных КЗ.

Многофазные органы, предназначенные для работы при всех $K^{(1)}$. В последние десятилетия появились разные разработки по выполнению органов от $K^{(1)}$, обладающих лучшими свойствами, чем ранее использовавшиеся органы с токовой компенсацией. Ниже рассмотрено два их исполнения.

Орган, в основу работы которого положено условие одновременного контроля трех компенсированных фазных напряжений и тока $\underline{I}_0$, разработан французскими специалистами (М. Суйар и др.). Компенсированные $\underline{U}'_{ф}$ равны $\underline{U}'_A=(\underline{z}_1 l-\underline{Z}_{у})(\underline{I}_A+\underline{k}\underline{I}_0)$, $\underline{U}'_B=(\underline{z}_1 l-\underline{Z}_{у})(\underline{I}_B+\underline{k}\underline{I}_0)$ и $\underline{U}'_C=(\underline{z}_1 l-\underline{Z}_{у})(\underline{I}_C+\underline{k}\underline{I}_0)$, где l — расстояние до места металлического КЗ. Орган срабатывает, если все четыре указанные величины располагаются в одной полуплоскости (рис. 6.7), что соответствует наличию у них одинаковой поляр-

ности хотя бы кратковременно — в течение одного полупериода. В символах алгебры логики условие срабатывания органа можно с учетом этого записать в виде выходного сигнала $y=u'_A\cdot u'_B\cdot u'_C(-i_0)+\overline{u'_A\cdot u'_B\cdot u'_C}\cdot(-i_0)$. Поскольку сигнал y может появляться кратковременно, на выходе схемы сравнения должен быть предусмотрен реагирующий элемент в виде расширителя импульсов. Как многофазный, орган не имеет однозначной характеристики в плоскости $\underline{Z}$.

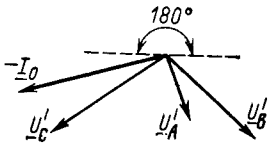


Рис. 6.7. Случай, когда компенсированные напряжения $\underline{U}'_\Phi$ и ток $\underline{I}_0$ имеют в течение полупериода кратковременно одинаковые полярности

Исследования, проведенные в ЭСП (В. А. Рубинчиком, С. Я. Петровым и др.), в ИЭИ (Е. А. Аржанниковым) и на кафедре РЗА МЭИ (Эль-Хадиди, Египет), показывают, что на работу рассматриваемого органа существенно влияет угол расхождения фаз ЭДС генераторов, что может приводить к излишним срабатываниям его. Поэтому орган пригоден в основном для линий распределительных сетей 110—220 кВ. В этих условиях он оказывается обладающим лучшими свойствами, чем три пофазных органа с токовой компенсацией ($\underline{U}_р=\underline{U}_\Phi$) и $\underline{I}_р=(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)$. Эта структурная схема является значительно более сложной, чем структурная схема, определяемая приведенным выше логическим уравнением.

Орган, в основу работы которого положено условие отставания векторов трех компенсированных фазных напряжений от вектора тока $\underline{I}_0$ на угол меньше 180°, предложен в ИЭИ (Е. А. Аржанниковым). Этот орган по своим свойствам близок к рассмотренному выше, хотя и имеет совсем другой алгоритм срабатывания. Имеются и некоторые модификации органа, предложенные тем же автором.

Пофазные органы, предназначенные для работы при КЗ на землю. Ниже рассматриваются разновидности пофазных органов, которые принципиально не подвержены влиянию расхождения фаз генераторов.

Орган, в основу которого положено условие сравнения компенсированного фазного напряжения $\underline{U}'_\Phi=\underline{U}_\Phi-\underline{Z}_у\times(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)$ с падением напряжения $\underline{Z}_у(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)$ в момент перехода I_0 через нуль, разработан французскими специалистами (М. Суйар и др.). Его работа при включении на петлю КЗ по их данным не зависит от $R_п$ при совпадении по фазе токов I_0 в защите и $R_п$. При несовпадении их по фазе такая зависимость появляется. Используя предложение ЭСП по корректировке работы органов, действующих при $K^{(1)}$ на угол $\beta=\arg(\underline{I}_0/\underline{I}_п)$, этот недостаток органа можно существенно ограничить. Орган с учетом указанной корректировки заслуживает внимания, так как его работа не зависит от сдвига фаз ЭДС генератора и он поэтому может быть использован на более длинных линиях с двусторонним питанием.

Орган с токовой компенсацией, работа которого автоматически корректируется так, что $Z_р=x_1l$ независимо от углов расхождения фаз ЭДС, разработан в ИЭИ (Е. А. Аржанниковым). Фазное напряжение в месте включения органа при КЗ на землю через $R_п$ при двустороннем питании $\underline{U}_\Phi=\underline{z}_1l(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)+3R_п\underline{I}_{0п}$ и в схеме с токовой компенсацией для органа, включенного на петлю КЗ, $\underline{Z}_р=\underline{U}_\Phi/(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)=\underline{z}_1l+3R_п\underline{I}_{0п}/(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)=\underline{z}_1l+\Delta\underline{Z}$. Вектор $\Delta\underline{Z}$ (рис. 6.8), искажающий $\underline{Z}_р$, образует с осью $+R$ угол, определяемый $\arg\underline{I}_{0п}/(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)=\alpha-\beta$, где $\alpha=\arg\underline{I}_0/(\underline{I}_\Phi+k\underline{I}_0)$ и $\beta=\arg\underline{I}_0/\underline{I}_{0п}$. Реактивная слагающая z_1l $x_1l=[X_р-$

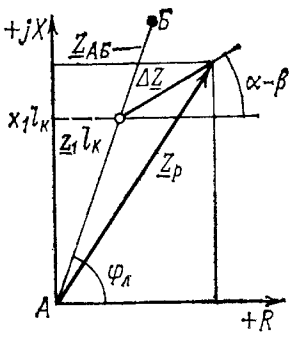


Рис. 6.8. Диаграмма, иллюстрирующая соотношения электрических величин в ИО

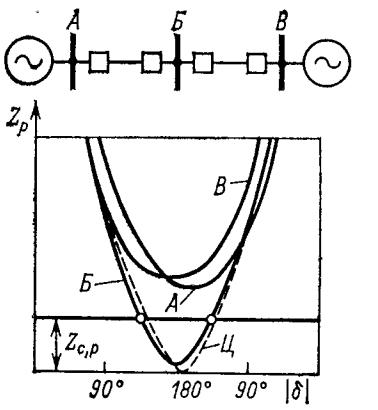


Рис. 6.9. Диаграмма, характеризующая поведение органа полного сопротивления при качаниях

$-R_р \operatorname{tg}(\alpha-\beta)]\operatorname{tg}\varphi_л/[\operatorname{tg}\varphi_л \operatorname{tg}(\alpha-\beta)]$. Угол α в каждый момент должен рассчитываться в месте включения защиты по известным $\underline{I}_0$ и $\underline{I}_ф+k\underline{I}_0$. Точная фиксация угла β невозможна, так как он зависит от тока $\underline{I}_{0п}$ в месте повреждения (от параметров нулевой последовательности системы с противоположной стороны защищаемого участка). Однако приближенное целесообразное значение угла β может быть задано. Расчет угла α удобно производить, например, при микропроцессорной элементной базе.

Таким путем получается орган с характеристикой, близкой к органу реактивного сопротивления, но не подверженной влиянию расхождения фаз ЭДС генераторов. Интересно отметить, что рассматриваемый орган по своему принципу действия (не алгоритму), как показано в [51], подобен рассмотренному выше пофазному органу, разработанному французскими специалистами.

Таким образом, основным преимуществом рассмотренных пофазных органов для защиты от $K^{(1)}$ является независимость их работы от расхождения фаз ЭДС и как следствие — возможность применения не только в распределительных сетях 110—220 кВ, но и на линиях значительной протяженности более высоких напряжений. Выполнение органа по второму варианту целесообразно на микропроцессорной элементной базе. Для обоих вариантов обязательно применение отдельных органов направления мощности и избирателей поврежденной фазы, так как органы, включенные не на петлю КЗ, могут работать неправильно. Органы подвержены влиянию качаний. Все это несколько усложняет их выполнение.

Многофазные органы, предназначенные для работы при многофазных КЗ. Первый многофазный орган сопротивления был предложен в 1944 г. на ЧЭАЗ (А. М. Бреслером), а вскоре независимо — в Великобритании Варрингтоном. Реле ЧЭАЗ выполнялось на индукционной системе по схеме сравнения фаз двух компенсированных междуфазных напряжений с $M_{эм}=-k_1|\underline{U}_{AB}-\underline{Z}_у\underline{I}_{AB}|\cdot|\underline{U}_{CB}-\underline{Z}_у\underline{I}_{CB}|\sin\varphi$. Напряжения $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{CB}$ и токи $\underline{I}_{AB}$ и $\underline{I}_{CB}$ полностью характеризуют все междуфазные величины (в том числе $\underline{U}_{CA}$ и $\underline{I}_{CA}$), а также соответствующие им составляющие прямой и обратной последовательностей, которые могут быть выражены через них. При этом тот же по принципу действия орган характеризуется [1] $M_{эм}=k_2[(\underline{U}_2-\underline{Z}_у\underline{I}_2)^2-(\underline{U}_1-\underline{Z}_у\underline{I}_1)^2]$. Последнее выражение наглядно показывает, что работа

рассматриваемого органа не зависит от того, между какими фазами произошло $K^{(2)}$. Оно же показывает, что при $K^{(3)}$ и качаниях орган не работает, так как $M_{эм}$ отрицателен. Рассмотрение работы органа показало (см., например, [52]), что он обладает направленностью действия, но неэффективно функционирует при $K^{(1,1)}$ и особенно при $K^{(1)}$, а также может быть очень чувствителен к погрешностям измерительных *TV*. Таким образом, орган в рассмотренном исполнении имеет существенные ограничения по числу охватываемых видов многофазных КЗ и некоторые другие недостатки. В настоящее время перешли на интегральную микроэлектронную базу, облегчившую конструктивное выполнение органов. Поэтому органы от многофазных КЗ рассмотренного и улучшенных исполнений, сокращавшие большое число сложных органов в защите, в настоящее время конкурировать с пофазными органами на новой элементной базе не могут.

Многофазные и пофазные органы, построенные на использовании только аварийных слагающих напряжений и токов. Под аварийными слагающими, как указано в гл. 1, понимаются величины, представляющие векторную разность величин после возникновения повреждения и в доаварийном режиме: $\underline{F}_{ав}=\underline{F}_к-\underline{F}_{раб}$. В гл. 1 рассматривались полные аварийные слагающие фаз и их составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. На кафедре РЗА МЭИ в 1977 г. (Ю. А. Барабановым) были предложены и разработаны измерительные органы направления мощности (см. гл. 5) и сопротивления для дистанционной защиты, использующие как полные аварийные слагающие (для пофазных органов), так и их составляющие, например обратной последовательности (для многофазных органов). Позже подобное же предложение было независимо изложено М. Суйаром (Франция). Характеристическая величина для этих исполнений $\underline{Z}_р=\underline{U}_{ав}/\underline{I}_{ав}$ по построению соответствует органу сопротивления, однако, как показывает анализ, они работают подобно органам направления мощности. Поэтому для создания органов I и II ступеней защиты, имеющих фиксированные сопротивления срабатывания, необходимо применять определенные мероприятия. Органы сопротивления, выполненные полностью на аварийных слагающих, на практике не применялись, в частности с учетом некоторых трудностей, возникающих при осуществлении точной фиксации конца защищаемых зон.

Аварийные слагающие широко используются для осуществления в дистанционных защитах специальных пусковых органов блокировок от качаний.

Односистемные (многофазные) органы. Односистемными, как было определено в гл. 5 для токовых защит, принято называть схемы включения на ИП (*TA*, *TV*), имеющие один измерительный орган, действующий при всех расчетных видах КЗ. Применительно к дистанционным защитам такой орган отличается от рассмотренных выше многофазных органов тем, что к нему в зависимости от вида повреждения с помощью специальных пусковых органов подводятся необходимые $U_р$ и $I_р$, соответствующие петлям КЗ. Поэтому односистемные органы нецелесообразно называть многофазными (как это иногда практикуется).

Простейшими пусковыми органами являются максимальные реле тока, устанавливающие вид КЗ. Такие органы начали применяться в отечественной практике в 1931 г. при $U_{ном} \leqslant 35$ кВ. Эти органы, особенно для защит сетей с $U_{ном} > 35$ кВ, вскоре перестали удовлетворять своему назначению. Много внимания уделялось вопросам разработки односистемных защит с пусковыми органами сопротивления [2]. Однако на электромеханической элементной базе рассматриваемые органы оказались неперспективными, в частности из-за необходимости осуществлять переключения в токовых цепях, по которым проходят большие токи КЗ. Лучшие результаты были достигнуты в Польше Ю. Врублевским, много сделавшим для внедрения полупроводниковой техники, в частности применившим для решения рассматриваемого вопроса макси- (для токов) и мини- (для напряжений) селекторы. В дальнейшем в связи с внедрением интегральной микроэлектронной элементной базы вопрос сокращения числа измерительных органов в схемах дистанционных защит потерял свою остроту. В настоящее время в связи с начавшимся применением микропроцессорной элементной базы (программных защит) встал вопрос об упрощении программ, о своеобразной, как бы односистемной, их реализации.

6.7. МЕРОПРИЯТИЯ ПО УСТРАНЕНИЮ МЕРТВЫХ ЗОН У ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В рассмотренных направленных защитах (см. гл. 5), включенных на полные напряжения и токи фаз, органы направления мощности при 90°-ной схеме имеют мертвые зоны только при металлических $K^{(3)}$, когда все напряжения могут быть близки к нулю. Направленные органы сопротивления I ступени защиты при тех же условиях также имеют мертвые зоны. Однако некоторые исполнения направленных органов сопротивления могут иметь мертвые зоны и при несимметричных КЗ, например при использовании одного $\underline{U}_р$ и одного $\underline{I}_р$, соответствующих петле КЗ. Для устранения мертвых зон может быть использован ряд мероприятий (частично указанных выше) — охват областью срабатывания зоны около места включения защиты (для II и III ступеней), подпитка от напряжений неповрежденных фаз (при несимметричных КЗ) [52], применение ненаправленных токовых отсечек. Многие известные разновидности многофазных органов сопротивления, предназначенных для работы при несимметричных КЗ, мертвых зон вообще не имеют. Устранение мертвых зон I ступеней при $K^{(3)}$ обычно осуществляется специальными устройствами памяти в сочетании с токовыми отсечками. Известно несколько способов выполнения этих устройств. Два лучшие из них рассмотрены ниже. Первый предложен в НПИ Л. И. Гутенмахером и А. Д. Дроздовым и независимо — в Великобритании Варрингтоном; второй, более предпочтительный — в ТПИ Р. А. Вайнштейном и А. П. Пушковым.

Осуществление первого способа связано с выполнением органа сопротивления. Однако вне зависимости от вида последнего в устройстве имеется контур *RLC*, к которому при нормальной работе подводится напряжение $U_{вх}$, определяемое $U_{раб}$. Контур настраивается на резонанс при рабочей частоте (50 Гц). Этому удовлетворяет условие $\omega = 2\pi f \approx 314 \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}$. При КЗ $U_{вх}$ снижается в пределе до нуля, в контуре возникает колебательный разряд ($R < 2\sqrt{L/C}$) с частотой φ; проходящий при этом по контуру затухающий колебательный ток $i = i_{нач} \sin(\omega t + \varphi) e^{-t/T}$, имеющий частоту предшествовавшего рабочего режима ω, используется для работы органа. Постоянная времени затухания тока $T = 2L/R$ должна быть для этого достаточной. Однако в защите может оказаться необходимым относительно длительное пребывание органа в конечном состоянии, когда требуемое трудно создать. Кроме того, при значительных T, как указывается в литературе, возможно неправильное функционирование некоторых органов из-за изменения действительной частоты по сравнению с заданной ω.

При втором способе используется дополнительное питание памяти током с частотой проходящего через орган тока $I_р$. Для устранения недостатков первого устройства используется только начальная фаза затухающего тока. В дальнейшем напряжение памяти изменяется с частотой тока КЗ и устройство получает энергию от цепей тока органа. В результате напряжение памяти можно считать вообще незатухающим. Возможен также подхват кратковременного действия контура памяти, например ступенями защит, имеющими характеристику $Z_{с.р}=f(\varphi_р)$, смещенную в третий квадрант плоскости Z.

При микропроцессорной элементной базе устранение мертвых зон решается, как и другие вопросы, программно.

6.8. ПОВЕДЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ПРИ КАЧАНИЯХ И АСИНХРОННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Анализ поведения токовых направленных защит в рассматриваемых режимах приведен в гл. 5. Работа дистанционных защит прежде всего зависит от поведения органов сопротивления и часто определяется сопротивлением на их зажимах $\underline{Z}_р=\underline{U}_р/\underline{I}_р$. Наличие при качаниях зависимостей $\underline{U}_р$ и $\underline{I}_р$ от угла δ между векторами эквивалентных ЭДС генераторов (см. гл. 1) дает возможность определения $Z_р=f(\delta)$, а зависимость $\delta=f(t)$ позволяет построить и $Z_р=f(t)$.

Примерные зависимости $Z_р=f(\delta)$ для различных точек сети приведены на рис. 6.9. При δ, близких к 180° у электрического центра системы *Ц* $Z_р$, как и напряжение $U_р$, оказывается равным нулю. С удалением рассматриваемой точки линии от электрического центра (который сам, например при неоднородных сопротивлениях элементов системы, при изменении δ перемещается вдоль линии или может оказываться внутри эквивалентных частей систем) предел снижения для нее $Z_р$ уменьшается (кривые $Z_р$ для точек *А*, *Б* и *В*). Орган сопротивления срабатывает при $Z_р \leqslant Z_{с.р}$. Для органа полного сопротивления $Z_{с.р}$ не зависит от $\varphi_р$, а следовательно, и от δ и изображается прямой, параллельной оси δ. Принимая для защит подстанций *А*, *Б* и *В* $Z_{с.р}$ одинаковыми, можно сделать вывод, что при качаниях срабатывает только орган сопротивления *Б*. С увеличением $Z_{с.р}$ и уменьшением времен срабатывания ступеней защит возможность ложных действий защит возрастает. Последние, III ступени защит обычно имеют $t^{III}>2\div3$ с, и их ложные действия при качаниях маловероятны. Необходимо, однако, отметить возможную значительную продолжительность первых периодов качаний и последних при втягивании в синхронизм, при которых могут быть ложные срабатывания и III ступеней. Наиболее вероятно ложное действие при качаниях I ступеней, как имеющих $t^{I}<0{,}1$ с. Однако и II ступени, часто имеющие $t^{II}\approx0{,}5$ с, также могут срабатывать ложно.

Более сложными являются соотношения при наложении качаний на КЗ. Анализ показывает, что и в этих условиях также возможны излишние действия защит и их отказы. Поэтому на практике дистанционные защиты сетей с несколькими источниками питания обычно снабжаются специальными устройствами, имеющими назначение предотвращать их ложные и излишние срабатывания при качаниях и асинхронных режимах и называемыми блокировками при качаниях.

Одними из первых работ, посвященных рассмотрению поведения защит при качаниях, явились исследования, проведенные в начале 30-х годов лабораторией им. А. А. Смурова (Р. С. Зурабов и др.). В последующие годы разработка мероприятий по улучшению работы защит при качаниях проводилась в Советском Союзе энергосистемами, СРЗиУ ТЭП, ВНИИЭ и ВНИИР.

6.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КАЧАНИЯХ

Наглядным и удобным для анализа поведения органов сопротивления с одноименными одним $U_р$ и одним $I_р$ при качаниях является использование комплексной плоскости, в которой могут быть сопоставлены характеристики $Z_{с.р}=f(\varphi_р)$ с сопротивлениями на их зажимах в рассматриваемых режимах. Некоторые положения этого метода были предложены в 1940—1941 гг. в МЭИ Н. А. Моралевым (см. гл. 1). В дальнейшем появились работы, содержащие его всестороннюю разработку. Эквивалентная схема сети приведена на рис. 6.10, *а*. Защита включена на линии *АБ* со стороны подстанции *А*. Сопротивление $\underline{Z}_р=\underline{U}_р/\underline{I}_р=\underline{U}_A/\underline{I}_{ур}=(\underline{E}_A-\underline{Z}_A\underline{I}_{ур})/\underline{I}_{ур}=(\underline{E}_A/\underline{I}_{ур})-\underline{Z}_A$; ток $\underline{I}_{ур}=[\underline{E}_A-\underline{E}_Б)/\underline{Z}_\Sigma=(\underline{E}_A(1-E_Б e^{-i\delta}/\underline{E}_A)]/\underline{Z}_\Sigma$ ($\underline{E}_Б$ принимается отстающей от $\underline{E}_A$ на угол δ). Учитывая эти соотношения, получаем $\underline{Z}_р=[\underline{Z}_\Sigma/(1-\underline{E}_Б e^{-i\delta}/\underline{E}_A)]-\underline{Z}_A$.

Для ряда приближенных расчетов можно полагать $\underline{E}_А = \underline{E}_Б$. В этом случае выражение для $\underline{Z}_р$ значительно упрощается (см., например, [2]) и приобретает вид $\underline{Z}_р = 0{,}5\,\underline{Z}_\Sigma - 0{,}5\,j\underline{Z}_\Sigma \operatorname{ctg}\delta/2 - \underline{Z}_А$. Последнее выражение является уравнением окружности $\underline{Z}_р = f(\delta)$ (рис. 6.10, *б*) с центром, расположенным на прямой, совпадающей с комплексом $\underline{Z}_\Sigma$; при $E_А < E_Б$ этот центр располагается в третьем квадранте и при $E_А > E_Б$ — в первом. Оно представляет собой уравнение прямой как частный случай окружности

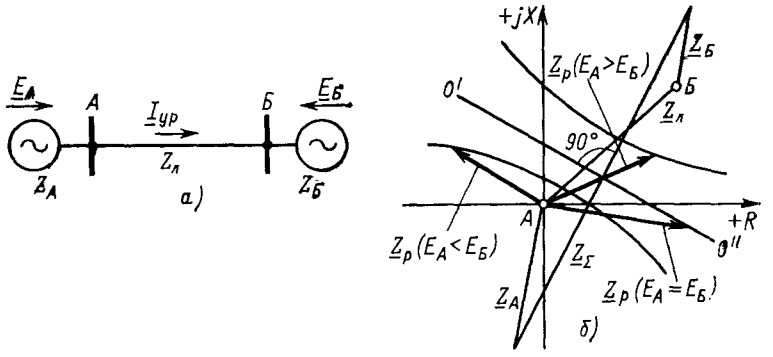
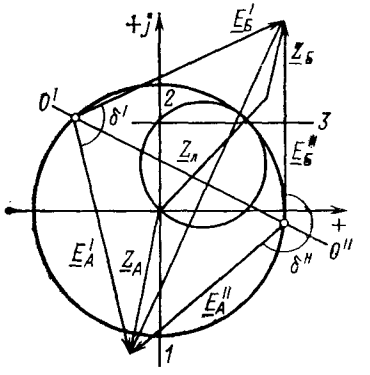


Рис. 6.10. Использованне комплексной плоскостн для анализа работы органа сопротивления при качаниях

с радиусом, равным бесконечности. Эта прямая проводится перпендикулярно прямой комплекса $\underline{Z}_\Sigma$ в его середине.

Построение комплексной диаграммы, необходимой для анализа работы защиты при качаниях, производится, например для случая $E_А = E_Б$, в следующей последовательности (рис. 6.10, *б*): за начало координат принимается место включения защиты (точка *А* на рис. 6.10, *а*); строится ломаная линия суммарного сопротивления $\underline{Z}_\Sigma$. При этом сопротивления рассматриваемой линии $\underline{Z}_л$ и следующих за ней элементов $\underline{Z}_Б$ располагаются в первом квадранте, а остальной части системы $\underline{Z}_А$ — в третьем; проводится прямая $O'O''$ геометрического места концов комплексов $\underline{Z}_р$ при качаниях перпендикулярно середине прямой $\underline{Z}_\Sigma$; строится характеристика срабатывания рассматриваемого органа (на рис. 6.11 в виде примера даны характеристи-

Рис. 6.11. Диаграмма, характеризующая поведение органа сопротивления прн качаниях



ки, исходя из уставок, соответствующих одной и той же защищаемой зоне: *1* — орган полного сопротивления; *2* — направленный орган сопротивления; *3* — орган реактивного сопротивления); определяются точки пересечения характеристик реле с линией $O'O''$. Эти точки определяют предельные углы δ сдвига фаз ЭДС, начиная с которых органы срабатывают, так как линия $O'O''$ может рассматриваться как линия нулевых потенциалов, а ЭДС — как расстояния от ее точек до концов Z_Σ. Так, например, органы полного сопротивления срабатывают при углах δ, находящихся в пределах δ'—δ''.

Из диаграммы следует, что из рассматриваемых органов наиболее подвержен влиянию качаний (работает в большом диапазоне углов δ) орган реактивного сопротивления и наименее — направленный орган сопротивления. Обобщая это положение, можно сказать, что подверженность влиянию качаний возрастает с увеличением в комплексной плоскости области срабатывания реле в направлении линий нулевых потенциалов.

6.10. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСТРОЙСТВ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩИХ ЛОЖНЫЕ И ИЗЛИШНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ ПРИ КАЧАНИЯХ

К устройствам предъявляются требования предотвращения срабатывания защит при качаниях, не сопровождающихся КЗ, и при внешних КЗ, сопровождающихся качаниями; при возникновении КЗ на защищаемом участке в процессе качаний, а также при отсутствии качаний устройство не должно препятствовать срабатыванию защиты.

В 30-х годах было предложено много принципов и схем для рассматриваемых устройств. Однако многие из них из-за сложности требований оказались недостаточно эффективными. Лучшие из схем, получивших широкое использование на практике, являются результатом успешной работы отечественных релейщиков.

Применяемые в настоящее время устройства могут быть разделены на две основные группы:

выполняющие пуск защиты на время, достаточное для срабатывания ее ступеней при КЗ в защищаемой зоне, в случае появления в системе хотя бы кратковременно аварийных слагающих (например, составляющих обратной последовательности);

использующие различие скоростей изменения действующих значений электрических величин (токов, напряжений) при КЗ и качаниях.

Устройства первой группы (см. § 6.11), выполняемые в соответствии с предложением, данным в 1938 г. в СРЗиУ ТЭП (А. Б. Барзамом), в Советском Союзе получили широкое применение. Большая заслуга в деле эксплуатационной проверки этого принципа принадлежит Уралэнерго.

Устройства второй группы (см. § 6.12) обычно выполняются по принципу, впервые предложенному в 1934 г. Донэнерго (О. П. Сусловым), с двумя пусковыми органами разной чувствительности. Возможны и модификации этого принципа, например с одним органом с двумя выходами, дающими одновременно две сдвинутые характеристики $\underline{Z}_{с,р}=f(\varphi_р)$.

Исследования и опыт эксплуатации устройств первой группы в СССР выявили определенные их достоинства, хотя в ряде других стран они не получили распространения. В зарубежной практике широкое применение получили схемы второй группы.

6.11. УСТРОЙСТВА, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ЗАЩИТУ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АВАРИЙНЫХ СЛАГАЮЩИХ НА ВРЕМЯ, ДОСТАТОЧНОЕ ДЛЯ ЕЕ СРАБАТЫВАНИЯ

Устройства данной группы удовлетворяют основным требованиям (см. § 6.10) за счет следующих особенностей выполнения. Предотвращение ложного срабатывания защит при качаниях без КЗ или после отключения КЗ обеспечивается пуском защиты только при хотя бы кратковременном появлении аварийных слагающих. Предотвращение их излишнего срабатывания при внешних КЗ, сопровождающихся развивающимися качаниями, достигается выводом ступеней защиты из действия через минимальное время, достаточное для их срабатывания, с учетом того, что в начале процесса КЗ углы расхождения векторов ЭДС генераторов невелики и возрастают постепенно; при этом пока ступень защиты (первая, часто вторая) введена в действие, расхождение фаз ЭДС не успевает достигнуть опасных значений. Для последних ступеней защиты, имеющих значительные выдержки времени, это устройство менее эффективно.

Защита, выведенная из действия рассматриваемым устройством, например при внешнем КЗ, после ликвидации этого КЗ должна по возможности быстро быть вновь готова к срабатыванию; это необходимо для обеспечения ее действия в случае возникновения нового КЗ, но уже на защищаемой линии. Разработанные схемы в логической части отличаются способом их возврата в исходное положение (см., например, [10]).

Первая разработанная в СРЗиУ ТЭП (А. Б. Барзамом) схема обеспечивает готовность к повторному действию без замедления после ликвидации причин действия. Однако она может давать защите возможность излишне срабатывать при неуспешном действии АПВ на смежных участках сети (когда повторное включение происходит на неустраненное повреждение) и успевшем к этому моменту возникнуть опасном расхождении фаз ЭДС генераторов. Примеры этому приведены, например, в работах В. А. Семенова (ЦДУ СССР). Поэтому в настоящее время признан более целесообразным вариант схемы, разработанной в том же СРЗиУ ТЭП Г. И. Атабековым и Я. М. Смородинским. В этой схеме готовность к повторному действию защиты происходит через время, большее максимальных выдержек времени защит сети (с учетом действия АПВ). Это мероприятие устраняет недостаток первой схемы, но может существенно задержать срабатывание защиты при повторном КЗ уже на защищаемом участке. Этот недостаток считается допустимым, если линия имеет основную быстродействующую защиту, не требующую блокировок от качаний. Так часто и выполняются блокировки дистанционных защит сети с $U_{ном}\geqslant 220$ кВ. В новых дистанционных защитах, разработанных ВНИИР для сетей высоких и сверхвысоких напряжений [15], рассмотренный недостаток второго варианта частично устраняется дополнительным, более грубым пусковым органом аварийных слагающих, отстроенным от внешних КЗ. Он разработан и введен в практику ВНИИР [15].

Недостатком рассматриваемых вариантов схемы блокировок также считался первоначально имевшийся пуск по составляющим I_2 и U_2, отстраиваемый от небалансов

фильтров и от составляющих обратной последовательности, определяемых наличием в сети несимметричной нагрузки (например, тяговой на переменном токе); это загрубляет пуск. Кроме того, I_2 и U_2 при КЗ в конце защищаемой зоны могут быть малы, а при $K^{(3)}$ возникающая несимметрия может быть очень кратковременной, иногда (практически очень редко) по существу отсутствующей. В настоящее время путем использования не I_2, U_2, а их аварийных слагающих с добавлением пуска по аварийной слагающей прямой последовательности или применения полных аварийных слагающих рассматриваемый недостаток при использовании новых элементных баз является устраненным. Поэтому в новом исполнении данная блокировка является наилучшей из существующих и используется в новых отечественных защитах.

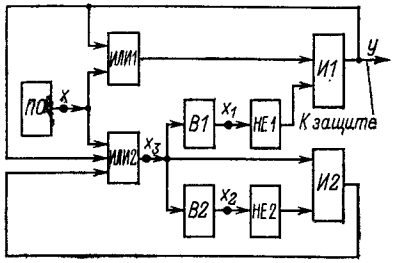


Рис. 6.12. Структурная схема блокировки при качаниях с возвратом через заданное время

Выполнение блокировки. Возможная структурная схема блокировки дана на рис. 6.12. Она имеет малое число органов — пусковой *ПО*, выдержки времени блокировки *В1*, выдержки времени деблокировки *В2* и некоторые элементарные логические органы *ИЛИ1*, *ИЛИ2*, *И1*, *И2*, *НЕ1* и *НЕ2*; однако их взаимодействие оригинально. Ниже сигналы на выходе обозначены: *ПО* — x, *В1* — x_1, *В2* — x_2, *ИЛИ2* — x_3 и блокировки в целом — y. При этом работа схемы в символах алгебры логики (см. гл. 1) представляется в виде (см., например, [11]) $y=(x+y)\bar{x}_1$ и $x_3=x+y+\bar{x}_2\cdot x_3$.

До включения устройства в целом в работу все сигналы отсутствуют, $y=0$ и оперативный ток на цепь отключения защитой выключателя не подается. Нормальный режим: $x=0$, $x+y=0$, $x_3=0$ и оперативный ток на ту же цепь также не подается. Качания, которым не предшествовало появление на *ПО* аварийных слагающих: оперативный ток не подается, как и при нормальной работе. Короткое замыкание в сети: появляются аварийные слагающие, срабатывает *ПО*, $x_1=1$, $x_3=1$, $y=1$ (разрешается действие защиты), пускаются органы *В1* и *В2*; через время $t_{бл}$, достаточное для срабатывания, например, I ступени защиты, действует *В1*, появляется $x_1=1$, но $\bar{x}_1=0$ и $y=0$ (оперативный ток с защиты снимается), однако сигнал x_3 сохраняется даже при $K^{(3)}$, так как было $x_3=1$ и, следовательно, $\bar{x}_2x_3=1$; защита остается выведенной из действия, так как $x_1=1$ и $y=0$; через время $t_{дебл}$ срабатывает орган *В2* и $x_2=1$; органы времени *В1* и *В2* возвращаются в начальное состояние ($x_1=0$, $x_2=0$) и вся схема блокировки приходит в исходное состояние.

Для быстрой деблокировки защиты при повторных КЗ к схеме, по предложению ВНИИР [15], добавляются более грубые ПО (на схеме не показаны).

Осуществление пусковых органов блокировки при качаниях. Первоначально использовавшиеся пусковые органы (ПО), включаемые на I_2 или U_2, имели отмеченные выше недостатки. Были известны разработанные в СРЗиУ ТЭП (Ю. А. Гаевенко) [52] принципиально более совершенные органы, включаемые на полные аварийные слагающие фазных величин (трехсистемный орган). Однако их конструктивное выполнение на электромеханической элементной базе было сложно. В 60-е годы во ВНИИЭ (А. М. Левиушем) был разработан ПО, использующий аварийную слагающую напряжения или тока только обратной последовательности (односистемный орган). Он оказался простым и получил применение [48]. В последнее время для новых дистанционных защит, как указывалось выше, ВНИИР (Э. М. Шнеерсон и др.) в содружестве с другими организациями для полного исключения возможности отказов защиты при симметричных $K^{(3)}$ решено добавлять к ПО часть, реагирующую на аварийную слагающую прямой последовательности [15].

Для обеспечения пуска защиты при быстром повторном КЗ (в защищаемой зоне), когда защита еще заблокирована, добавляются более грубые органы тех же исполнений. Это не вызывает особых затруднений при микроэлектронной элементной базе. При микропроцессорной элементной базе просто осуществляются и ПО на полных аварийных слагающих, впервые реализованные ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд и Л. С. Зисман).

6.12. УСТРОЙСТВА, ОТКЛЮЧАЮЩИЕ ЗАЩИТУ ПРИ КАЧАНИЯХ, С ДВУМЯ ПО РАЗНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Работа устройств основана, как указывалось, на разном характере изменения во времени электрических величин при КЗ и качаниях. В первом случае, например, действующие значения, токов, сопротивлений изменяются скачкообразно, практически почти мгновенно от рабочих значений до значений при КЗ (рис. 6.13, *а*), во втором — плавно (рис. 6.13, *б*). Поэтому, используя, например, два органа сопротивления разной чувствительности, при КЗ получают практически одновременное их срабатывание, а при качаниях сначала срабатывает более чувствительный орган с $Z_{ср,1}$, отстроенный от $Z_{раб\,min}$ в рабочих режимах, и только через небольшое время — более грубый с $Z_{с,р2} < Z_{с.р1}$ (органы минимальные). Последнее обстоятельство и используется для блокирования защиты.

Получающиеся соотношения при качаниях для органов с одним $U_р$ и одним $I_р$ часто бывает удобно рассмотреть в комплексной плоскости сопротивлений (рис. 6.13, *в*). Например, при использовании для защиты участка *АБ* сети направленных органов сопротивления *1* и *2* для *III* и *II* ступеней соответственно с $Z'''_{с.р1}$ и $Z''_{с.р2}$ при качаниях (в предположении равенства абсолютных значений ЭДС) получаем следующее: в момент, когда угол между ЭДС оказывается больше или равен δ_1, срабатывает орган *1*; угол δ продолжает увеличиваться и точка нулевого потенциала скользит по прямой $O'O''$, перпендикулярной Z_Σ

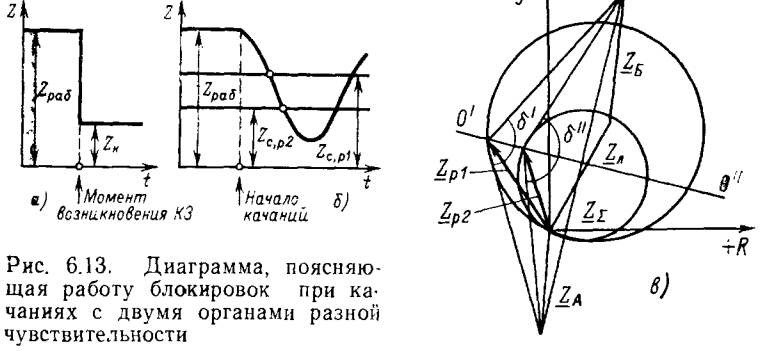


Рис. 6.13. Диаграмма, поясняющая работу блокировок при качаниях с двумя органами разной чувствительности

системы в его середине. Через некоторое время, определяемое скольжением, угол между ЭДС становится равным δ'' и срабатывает орган *2*. Наличие конечного времени перемещения точки нулевого потенциала от места с δ' до места с δ'' может использоваться для блокирования защиты.

Основным недостатком рассматриваемых устройств является невыполнение своей функции при качаниях, развивающихся в процессе недостаточно быстро отключаемых внешних КЗ. Поэтому при практическом осуществлении блокировки ее пришлось бы дополнять устройствами, подобными рассмотренному выше (см. § 6.11). С учетом изложенных требований к блокировкам, существующим в отечественной технике, а также хороших показателей современных устройств первой группы данное выполнение в настоящее время распространения не имеет.

6.13. ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

В общем случае пусковые органы могут выполнять ряд функций: подавать на дистанционные органы $U_р$ и $I_р$, соответствующие сочетанию поврежденных фаз (например, при односистемном выполнении защит), обеспечивать срабатывание на отключение только органа сопротивления, правильно устанавливающего место возникшего КЗ, обеспечивать начало работы части микропроцессорной системы, устанавливающей место КЗ, и некоторые другие.

Простейшими ПО, например односистемных защит для сетей с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ, являются органы тока. Они выполняют также функции III ступеней защит (при необходимости в сочетании с органами направления мощности). Иногда функции ПО выполняют органы сопротивления III ступеней защиты. В ряде случаев ПО оказываются ненужными и срабатывание защит разрешается устройствами блокировки при качаниях; в некоторых случаях ПО последних могут выполнять и отдельные функции защит.

Основной и наиболее сложной из перечисленных задач органов является выделение (если требуется) измерительного органа, правильно фиксирующего место возникшего КЗ. В отечественной практике функции выделения поврежденной фазы выполняются устройством ОАПВ при использовании на линиях однофазного отключения. Для линий с двусторонним питанием применяются избиратели поврежденной фазы в виде органов сопротивления, разработанные по первоначальному предложению ВНИИЭ

(П. К. Фейст), или фильтровые избирательные органы, разрабатывавшиеся в СРЗиУ ТЭП и ЭСП по предложениям В. М. Ермоленко и других и в РПИ (В. Л. Фабрикант). Здесь они не рассматриваются.

6.14. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЛОЖНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТ ПРИ НАРУШЕНИЯХ ИХ ЦЕПЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

При рассмотрении влияния нарушений питания цепей напряжения на работу дистанционных защит различают два возможных случая их выполнения:

защиты с ПО тока, имеющими $I_{с.з} > I_{рабmax}$ (сети с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ), или устройствами, разрешающими им работать только при наличии токов обратной или нулевой последовательности (например, устройствами, предотвращающими неправильные срабатывания при качаниях, с пуском от аварийных слагающих тока);

защиты с ПО сопротивления (обычно сети с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ).

В первом случае, как и при токовых направленных защитах (см. гл. 5), достаточно иметь только сигнализацию о нарушениях. Во втором случае с учетом того, что органы сопротивления имеют $I_{с.рmin} < I_{рабmax}$ и некоторые их исполнения могут работать при $U_р = 0$, требуется быстрое автоматическое выведение защиты из работы. Быстрота этого выведения должна быть такой, чтобы I ступень, действующая без выдержки времени, не успела сработать на отключение выключателя.

Наилучшие по принципу работы устройства (блокировки) для автоматического выведения защит были предложены Грузэнерго (Г. Г. Костанян и Г. Е. Туркия) в 40-е годы применительно к *TV*, имеющим две вторичные обмотки. Практически у *TV* 35 кВ и выше они всегда имеются (одна соединяется в звезду, вторая — в разомкнутый треугольник для получения напряжения $3U_0$). Действие устройств основано на сравнении напряжений двух вторичных обмоток.

На рис. 6.14 приведена схема такого устройства, разработанная ТЭП (В. Н. Вавин). На рис. 6.14, *а* приведен пример схемы включения *TV*, на рис. 6.14, *б* — соответствующая этой схеме диаграмма напряжений, на рис. 6.14, *в* — схема устройства и его включение и на рис. 6.14, *г* — векторная диаграмма токов, поясняющая работу устройства.

Четырехобмоточный промежуточный трансформатор *TL* имеет две первичные обмотки и одну компенсационную, подключаемые к цепям напряжения *TV* через добавочные резисторы. Ко вторичной обмотке трансформатора *TL* через выпрямитель *VS* присоединен реагирующий элемент *KV*.

Сопротивление резистора R_A должно быть меньше (или больше) одинаковых сопротивлений резисторов R_B,

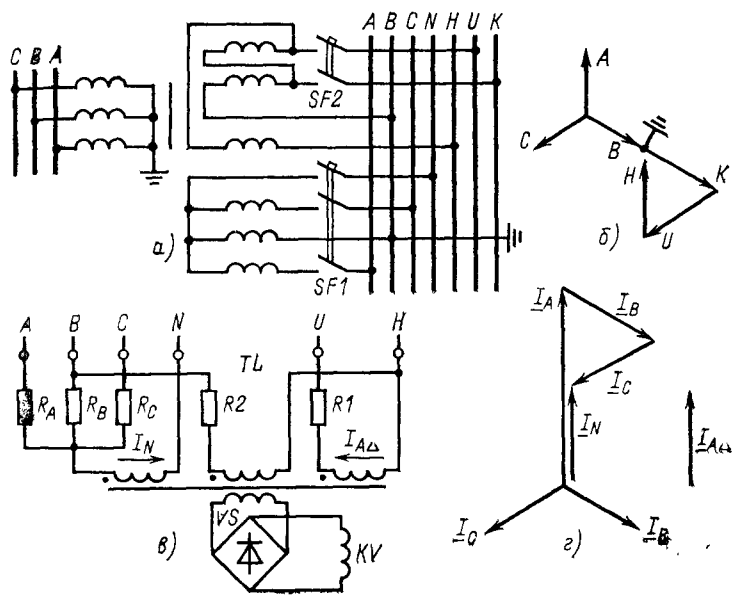


Рис. 6.14. Устройство для предотвращения ложных срабатываний защит при нарушениях цепей напряжения

R_C. Поэтому при симметрии напряжений $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ токи в этих сопротивлениях не одинаковы, что и показано на векторной диаграмме на рис. 6.14, *г*, соответствующей условию $R_A < R_B = R_C$. При $R_A > R_B = R_C$ ток $\underline{I}_N$, равный геометрической сумме токов $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$, имел бы противоположное направление.

В условиях нормального режима работы при исправных вторичных цепях *TV* совпадающие по фазе, но встречно направленные в первичных обмотках трансформатора

TL токи $\underline{I}_N$ (назван условно) и $\underline{I}_{A\Delta}$ создают в сердечнике TL взаимно уравновешивающиеся МДС. Вследствие этого отсутствуют магнитный поток в сердечнике TL и ток в KV. Создаваемые токами $\underline{I}_N$ и $\underline{I}_{A\Delta}$ МДС будут также уравновешиваться при любых нарушениях симметрии напряжений со стороны первичных обмоток трансформатора напряжения, не связанных с появлением напряжений нулевой последовательности.

При появлении напряжения нулевой последовательности на стороне высшего напряжения TV (например, при $K^{(1)}$) равновесие МДС в сердечнике трансформатора TL нарушается. Его восстановление обеспечивается с помощью компенсациониой обмотки трансформатора TL, включаемой в цепь $3U_0$ через добавочный резистор $R2$.

При обрыве одной или двух фаз в цепи напряжеиия защиты появляется напряжение нулевой последовательности и изменяются значение и фаза тока в обмотке трансформатора TL, включенной в нулевой провод. Вследствие этого нарушается равновесие МДС и в сердечнике трансформатора TL появляется магнитный поток. Это приводит к срабатыванию KV, который выводит из действия защиту и дает сигнал о неисправности цепей напряжения.

При отключении автоматического выключателя TV или при обрыве «нуля» снимается питание с обмотки TL, включенной в нулевой провод. При этом благодаря наличию питаиия на первичной обмотке трансформатора TL, подключеиной через резистор $R1$ к дополнительной обмотке трансформатора фазы A, также нарушается равновесие МДС и срабатывает KV. Устройство без замедления работает при всех видах КЗ в цепях напряжения, за исключением КЗ на фазах BC. В последнем случае оно подействует после срабатывания автоматического выключателя TV. Благодаря наличию компенсирующей обмотки в цепи $3U_0$ (включена через $R2$) это устройство может применяться в сетях как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью.

В последних исполнениях отечественных дистанционных защит схема рассмотренной блокировки претерпела некоторые изменения [15].

6.15. ОБЩАЯ ОЦЕНКА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Дистанционные защиты в их современном исполнении являются наиболее технически совершенным, но и наиболее сложным видом защит с относительной селективностью. Их существенными преимуществами по сравнению с токовыми направленными защитами являются значительно более четко фиксированная зона, защищаемая I ступенью, лучшая защита конца участка II ступенью, а при многофазных КЗ — значительно бóльшая чувствительность последней (III) ступени, используемой в основном для дальнего резервирования. Принципиальный недостаток III ступеней защиты (как и токовых направленных) — неполная селективность при внешних КЗ — частично иногда уменьшается сокращением защищаемых зон, выбором участка, отключаемого первым и превращающего конфигурацию сети в вид, дающий возможность остальным III ступеням защит работать селективно. С учетом сказанного дистанционные защиты широко применяются как основные (при $U_{\text{ном}} \leqslant 110 \div 220$ кВ) или резервные (при $U_{\text{ном}} \geqslant 220 \div 330$ кВ) защиты от многофазных КЗ. В последнее время в отечественной практике рассматривается вопрос об их использовании с новыми ИО сопротивления и для ликвидации $K^{(1)}$. В зарубежной практике это осуществлялось всегда. Необходимо также отметить, что новые возможности для осуществления достаточно простой (без большего числа ИО) защиты может предоставить использование микропроцессорной техники (ЭВМ) с ее программной реализацией устройства. Применение защит как основных от многофазных КЗ обычно считается возможным, когда допустимо отключение КЗ с одной из сторон с выдержкой времени t^{II} II ступени согласно упрощенному критерию сохранения устойчивости. Такое отключение допустимо, если в режиме каскадного отключения $K^{(3)}$ в начале второй зоны $U^{(3)}_{\text{ост}} \approx 0{,}85 \sqrt{3} z_1 l_{\text{АБ}} I^{(3)}_{\text{к}} \geqslant 0{,}6\, U_{\text{раб}}$ (рис. 6.15).

Ускорение действия дистанционных защит поврежденного участка в сетях сверхвысоких напряжений достигается добавлением к ним отключающего или разрешающего устройства, передающего сигналы по ВЧ каналам (см. гл. 1). Применение дистанциоиных защит с удлиненной l^{II}, перекрывающей всю длину участка (допущенной неселек-

тивностью), в отечественной практике обычно не применяется.

В настоящее время отечественной промышленностью осуществляется серийный выпуск комплектных дистанционных защит разных модификаций от многофазных КЗ на все классы напряжений выше 110 кВ, на интегральной

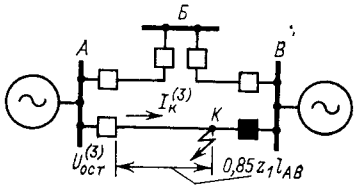


Рис. 6.15. Расчетное условие для проверки остаточных напряжений при КЗ в сети

микроэлектронике, с широким использованием операционных усилителей [15]. Часто в комплекты входят и токовые направленные защиты нулевой последовательности для действия при $K^{(1)}$. Во всем этом большая заслуга коллективов ВНИИР и ЧЭАЗ.

Вопросы для самопроверки

1. Какие защиты называются дистанционными?
2. Какие принципы используются для выполнения реле сопротивления дистанционных защит?
3. Какие искажающие факторы влияют на работу дистанционных защит при КЗ?
4. Как влияет учет качаний и переходных сопротивлений в месте КЗ на выбор вида характеристик срабатывания реле сопротивления?
5. Приведите некоторые основные виды характеристик срабатывания реле сопротивления. Назовите области их использования.
6. Какие существуют принципы выполнения устройств, предотвращающих ложные и излишние срабатывания защиты при качаниях?

Глава седьмая

ТОКОВЫЕ И НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ С КОСВЕННЫМ СРАВНЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

7.1. СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ

Токовыми и направленными защитами с косвенным сравнением электрических величин называются защиты с абсолютной селективностью (см. гл. 1), основанные на сравнении электрических величин по концам защищаемой линии или на линиях, присоединенных к общим шинам, посредством передаваемых по каналам связи сигналов от срабатывающих измерительных органов.

Защиты с косвенным сравнением в наиболее простом случае выполняются как токовые; в них сравниваются токи по сигналам максимальных органов тока, включаемых с питающих сторон защищаемых участков. Значительно чаще эти защиты выполняются направленными; в них сравниваются знаки мощностей КЗ по сигналам, получаемым от органов направления мощности.

Защиты делятся на *продольные*, сравнивающие величины по концам защищаемого участка, и *поперечные*, сравнивающие величины на разных элементах одной электроустановки.

Рассматриваемые защиты как обладающие абсолютной селективностью выполняются без выдержки времени, чем выгодно отличаются от токовых, токовых направленных и дистанционных защит с относительной селективностью (см. гл. 5 и 6). С другой стороны, рассматриваемые защиты не используются как единственные на элементе, так как не могут работать в качестве резервных при КЗ на смежных элементах и поэтому сочетаются с защитами, обладающими относительной селективностью. Необходимо отметить, что в защитах с косвенным сравнением величин используются те же типы органов тока и направления мощности, что и в описанных ранее защитах с относительной селективностью. Поэтому иногда эти элементы принимаются для защит общими.

7.2. ТОКОВЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ С БЛОКИРОВКОЙ

Принцип действия защиты и выбор ее параметров рассматриваются применительно к цепочке одиночных линий с односторонним питанием (рис. 7.1). С питающих сторон

линий включаются максимальные органы тока. На первом элементе (токоприемнике) они образуют максимальную токовую защиту без выдержки времени. Для того чтобы и другие защиты также могли работать без выдержки времени, каждая последующая из них выполняется так, что может срабатывать только при отсутствии блокирующего сигнала от предыдущей защиты, т. е. она оказывается связанной с последней логической операцией *ЗАПРЕТ* $y=x_1\cdot\bar{x}_2$ (см. гл. 1). Токи срабатывания защит, имеющих блокировку (если не предусматривается их дополнительное действие как резервных), могут выбираться бо́льшими

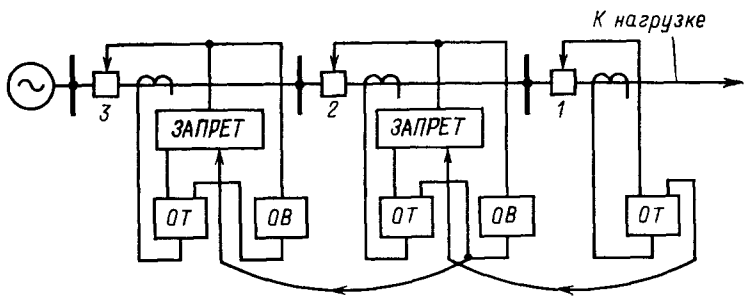


Рис. 7.1. Принципы работы токовой продольной защиты с блокировкой

только максимальных рабочих токов защищаемых участков без учета запуска потребителей (поскольку в режимах запуска защиты будут заблокированы) и должны согласовываться по чувствительности: $I_{с,зn}>I_{с,з(n-1)max}$. Для обеспечения блокировки последующие защиты имеют небольшое замедление. Рассматриваемая защита сети в представленном виде не может работать как резервная при КЗ на предыдущем участке. Для выполнения этих необходимых функций блокируемые защиты дополняются органами выдержки времени, работающими в обход схеме *ЗАПРЕТ*. Выдержки времени этих органов выбираются по ступенчатому принципу. Токи срабатывания при этом должны выбираться так же, как для максимальных токовых защит (см. гл. 5).

Рассматриваемая защита была разработана в Советском Союзе еще в начале 30-х годов применительно к защите шин подстанций, но распространения не получила в связи с некоторой сложностью логической части. Оценивались ее свойства и для понижающих трансформаторов. Она приведена также в работе 30-х годов Н. Нейгебауера (Германия). Применение защиты, вероятно, может иметь смысл для элементов, находящихся в пределах одной установки (например, защиты одиночных систем шин), когда обязательна быстрота отключения КЗ.

7.3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ЗАЩИТ

Защиты по принципу действия могут применяться в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания. Их работа рассматривается на примере сети на рис. 7.2. Полукомплекты защиты, включающие органы направления мощности (в общем случае двустороннего действия), устанавливаются с обеих сторон каждого участка. Защита срабатывает, если полные мощности КЗ на обоих концах участка направлены от шин в линию (для мощностей нулевой и обратной последовательностей — от линии к шинам, см. гл. 5), что характерно только для поврежденного участка. На неповрежденных участках сети мощности КЗ с одной стороны обязательно направлены к шинам и их защиты не срабатывают, хотя с другой стороны мощности направлены от шин. Такое действие защит обеспечивается за счет наличия логической связи между их полукомплектами, осуществляемой по каналам связи.

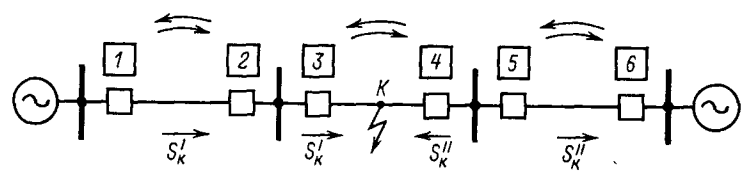


Рис. 7.2. Сеть с двусторонним питанием, защищаемая направленными продольными защитами

В зависимости от характера использования каналов защиты разделяются на две группы: с разрешающими сигналами (РС), когда приходящий с противоположной стороны сигнал разрешает отключение, и блокирующими сигналами (БС), когда приходящий с противоположной стороны сигнал, наоборот, препятствует отключению. При этом имеется в виду, что сигнал может подаваться как по-

явлением в канале нормально отсутствующего в нем тока (НО), так и нормально присутствующим в нем током (НП). В результате сравниваются четыре основных вида сигналов в канале: РС с НО или НП и БС с НО или НП.

Первые обобщающие работы по способам использования каналов были опубликованы в 30-х годах Н. Нейгебауером (Германия) и Н. Т. Кобяковой.

Проведенный (см., например, [1]) анализ принципов выполнения защит с разными каналами связи дал возможность сделать следующие выводы.

1. Для защит с ВЧ каналами целесообразно применение блокирующих сигналов, передаваемых по неповрежденным участкам (см. рис. 7.2) и предотвращающих срабатывание полукомплектов защиты, через которые мощность КЗ направлена от шин в линию. На поврежденном участке, где канал может быть нарушен, БС не требуется. Это исключает отказы защит поврежденного участка, если ВЧ сигнал не проходит через место КЗ (что было бы при РС). Схемы целесообразно строить с нормально отсутствующим током в канале, что обеспечивает работу как при одностороннем, так и при двустороннем питании.

2. При применении проводных и радиоканалов могут быть использованы как блокирующие, так и разрешающие отключения сигналы. Последние иногда используются как дополнительные к дистанционным защитам и токовым направленным защитам нулевой последовательности в сетях сверхвысоких напряжений (см. гл. 10).

7.4. НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ С ВЧ БЛОКИРОВКОЙ

Направленными защитами с ВЧ блокировкой называются защиты с косвенным сравнением направлений мощности по концам защищаемого участка, использующие ВЧ каналы, по которым при внешних КЗ передаются блокирующие сигналы, обеспечивающие в этих режимах их несрабатывание. Принципиально БС можно было бы использовать для предотвращения срабатывания защиты и при нормальной работе сети. Такие решения, однако, не применяются с учетом вероятности кратковременных (за счет помех) нарушений канала, при которых защита могла бы ложно срабатывать. Для отстройки от рабочих режимов используются отдельные пусковые органы. В некоторых частных случаях функции пуска возлагают на органы направления мощности (когда последние не могут срабатывать в рабочих режимах, например при включении на составляющие обратной последовательности). Схемы защиты принято строить с нормально отсутствующим током в канале. Первые данные о рассматриваемых защитах появились в 20-е годы. В конце 20-х и начале 30-х годов был создан ряд схем таких защит. Большая заслуга в деле разработки и внедрения в эксплуатацию направленных защит с ВЧ блокировкой принадлежит лаборатории им. А. А. Смурова, работники которой в конце 30-х и начале 40-х годов разработали, изготовили и установили в энергосистемах Советского Союза значительное число комплектов этой защиты.

Учет ряда факторов (сложные ПО при их включении на полные напряжения и токи фаз, возможность ложного действия при качаниях защит с ОНМ, включенными на полные напряжения и токи, и т. д.) приводит к значительному усложнению релейной части. С учетом этого обстоятельства Фаллю (Франция) в начале 30-х годов была разработана весьма простая по выполнению релейной части защита обратной последовательности от всех несимметричных КЗ. Простыми являются и защиты нулевой последовательности от КЗ на землю. Возможно также выполнение защиты с ОНМ, включенными на полные аварийные слагающие или их симметричные составляющие.

В Советском Союзе по предложению Г. И. Атабекова и Я. М. Смородинского (1946 г.) в СРЗиУ ТЭП (В. Л. Фабрикант и др.) были созданы фильтровые защиты с дистанционным пуском передатчиков. Некоторое время такие защиты выпускались промышленностью; в настоящее время они не применяются. Теми же авторами примерно в то же время была предложена фильтровая защита с мгновенной фиксацией знака мощности. Первые работы в этой области, проводившиеся в СРЗиУ ТЭП, выявили возможность кратковременных излишних срабатываний фильтровых органов направления мощности, обусловленных переходными процессами, что затрудняло их полноценное выполнение. Последующие исследования и разработки, проведенные во ВНИИЭ (А. И. Левиуш, Я. С. Гельфанд, Е. Д. Сапир и др.), показали возможность создания ОНМ, правильно фиксирующих знак мощности обратной последовательности в начальный момент КЗ, и достаточно полноценной фиксации (с использованием органа сопротивления) $K^{(3)}$. Такое выполнение продольных защит линий

находит в отечественной практике определенные области применения.

Известны два способа пуска передатчиков рассматриваемых защит:

при возникновении КЗ, расположенных в любых местах сети, — от быстродействующих ненаправленных ПО. Передатчики затем останавливаются ОНМ при повреждении в защищаемой зоне;

только при направлении мощности КЗ от линии к шинам.

Преимущество первого способа заключается в увеличении надежности несрабатывания при внешних КЗ за счет быстрой посылки БС. Серьезным недостатком являлась возможность отказа защиты, если при КЗ на защищаемой линии на одном из ее концов имеются условия для срабатывания ПО, а уровень воздействующих величин ОНМ недостаточен для его надежного срабатывания. Это характерно, например, для двух- или многоконцевых линий при отсутствии источника мощности на одном из ее концов. ВНИИЭ разработаны мероприятия, устраняющие этот недостаток.

Второй способ обеспечивает увеличение надежности срабатывания, так как при КЗ на защищаемой линии пуск не производится. Однако необходимо вводить дополнительную задержку для согласования по времени блокирующих и отключающих ОНМ по концам линии.

7.5. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СХЕМ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ С ВЧ БЛОКИРОВКОЙ

Как указывалось выше, в отечественной практике применяются защиты с ИО, включаемыми на составляющие обратной, иногда нулевой, последовательности. В этом случае принципы действия схем защит различаются в первую очередь способами пуска ВЧ передатчиков и использования отдельных ПО. Ниже рассматриваются структурные схемы защит: с пуском от ненаправленных ПО, с пуском, контролируемым ОНМ, и с пуском от ОНМ без отдельных ПО.

Схема с пуском от ненаправленных ПО (рис. 7.3). Пуск осуществляется для каждого из полукомплектов двумя органами (например, органами тока обратной последовательности) *ПО1* и *ПО2*. Они имеют разную чувствительность. Более чувствительные (при пуске от тока — с меньшими $I_{с.р}$) *ПО1* служат только для пуска ВЧ передатчиков, генерирующих ВЧ блокирующие сигналы. Более грубые *ПО2* предназначаются для отключения выключателей линии через выходной орган *ВО*, при срабатывании *ОНМ*, через логические элементы *ЗАПРЕТ*, используемые для блокирования защиты при внешних КЗ. Элемент *ЗАПРЕТ* ($y=x_1\cdot\bar{x}_2$) дает сигнал при получении сигнала x_1 от *ПО2* через *ОНМ* только своего полукомплекта. При наличии сигнала, получаемого через ВЧ приемник с противоположной стороны линии (x_2) или с обеих сторон, *ВО* не срабатывает. Для обеспечения недействия передатчиков при КЗ на защищаемом участке используется логический элемент НЕ.

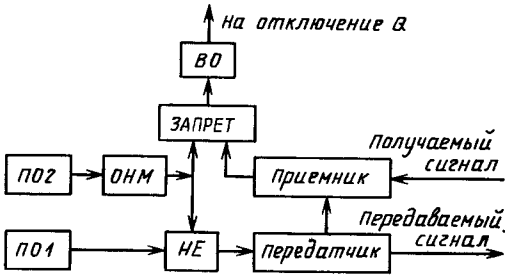


Рис. 7.3. Схема с пуском от ненаправленных пусковых органов

Исполнение защиты обеспечивает ее правильное функционирование как при двустороннем, так и при одностороннем питании места повреждения, если невозможны случаи, когда ПО срабатывает, а ОНМ — нет, например из-за низкого уровня напряжения на входе ОНМ.

Работа защиты не искажается при нарушении ВЧ связи на защищаемом участке в случае его повреждения, так как правильное функционирование канала, как уже указывалось, требуется только при внешних КЗ. В последних случаях, сопровождаемых нарушением канала, защита может сработать излишне. Практическая вероятность этого с учетом наличия контроля канала мала. В практике эксплуатации, однако, имели место случаи увеличения затухания в ВЧ канале сверх расчетного, например вследствие очень сильных гололедов. Для предотвращения возможности излишнего срабатывания защита при этом

должна выводиться из работы устройством автоматического контроля ВЧ канала.

Воздействующие величины при внешних КЗ могут оказываться близкими к параметрам срабатывания ПО. При этом за счет неодинаковых погрешностей измерительных преобразователей и уставок ПО двух полукомплектов защиты и некоторых других факторов может сработать ПО только с одной стороны защищаемой линии, где мощность КЗ направлена от шин в линию (см. рис. 7.2). В этом случае БС будет отсутствовать и защита может излишне отключить линию. При наличии двух ПО разной чувствительности более грубый *ПО2*, действующий на отключение, в рассматриваемом случае не должен срабатывать, что исключит излишнее действие защиты даже при отсутствии БС. Необходимо отметить, что в схемах с дистанционным пуском передатчиков удвоение пусковых органов не требуется. Параметры срабатывания более чувствительных органов, включаемых на составляющие нулевой или обратной последовательности, отстраиваются от расчетных небалансов. Токи небаланса в цепях тока возрастают при возрастании токов фаз (например, при внешних $K^{(3)}$ и качаниях). Отстройка от них *ПО1* может резко загрубить защиту. С напряжениями небаланса этого обычно не происходит. Поэтому оказывается целесообразным, например в защитах нулевой последовательности [10], для пуска использовать комбинированные ПО с сочетанием органов напряжения (ОН) и тока (ОТ), действующих по схеме И.

Аналогичная схема, но с несколько другой целью, была предложена ВНИИР и ВНИИЭ для направленной защиты с ВЧ блокировкой линий 110—333 кВ. Вольт-амперные характеристики более чувствительного пускового органа *ПО1* и *ОНМ*, срабатывающего при КЗ на защищаемой линии и прекращающего пуск ВЧ сигнала, и более грубого пускового органа *ПО2* показаны на рис. 7.4. При этом структура схемы на рис. 7.3 изменяется таким образом, чтобы для прекращения пуска ВЧ сигнала от *ОНМ* не требовалось срабатывание *ПО2*. Пуск ВЧ сигнала от *ПО1* — ненаправленный, однако ток и напряжение, требуемые для пуска, заведомо больше, чем необходимо для срабатывания *ОНМ*. Поэтому при исправной защите невозможен случай, когда при КЗ на защищаемой линии не будет остановлен блокирующий ВЧ сигнал. Такая схема пуска с помощью *ПО1* и *ОНМ* в большей степени сочетает достоинства ненаправленного и направленного пусков блокирующего ВЧ сигнала. Отключение поврежденной линии осуществляется при отсутствии блокирующего ВЧ сигнала и срабатывания грубого органа *ПО2*, также выполненного с помощью *ОН* и *ОТ*, действующих по схеме *И*.

Схема с пуском, контролируемым ОНМ (рис. 7.5). В схеме используются ОНМ двустороннего действия или два ОНМ, срабатывающие при разных направлениях мощности КЗ. При направлении мощности КЗ от шин в защищаемую линию *ОНМ* действует через более грубый *ПО2* на отключение через логический элемент *ЗАПРЕТ*, а при направлении мощности КЗ к шинам — через второй более чувствительный *ПО1* на пуск ВЧ передатчика. Функционирование элемента *ЗАПРЕТ*, удвоение ПО и их сочетание имеют такое же назначение, как и в предыдущей схеме (см. рис. 7.3).

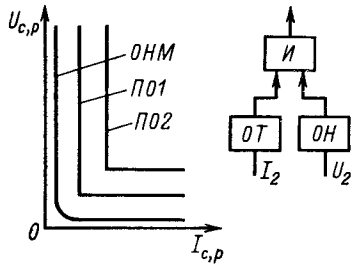


Рис. 7.4. Вольт-амперные характеристики ОНМ и ПО тока и напряжения обратной последовательности, соединенных по схеме И

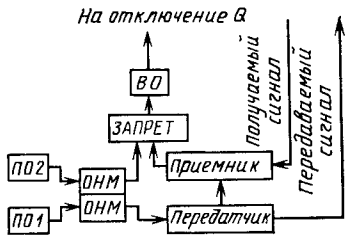


Рис. 7.5. Схема с пуском, контролируемым ОНМ

Схема с пуском, осуществляемым самим ОНМ (рис. 7.6). Эта схема соответствует первоначально предложенной Фаллю. Совмещение функций пуска и установления направления мощности КЗ для ОНМ принципиально допустимо, так как в нормальных рабочих режимах составляющих обратной и нулевой последовательностей практически почти нет и отстройку необходимо осуществлять в основном только от небалансов в цепях напряжения и тока. Обеспечение же разной чувствительности при пуске ВЧ передатчика и работе на отключение может производиться соответствующим выполнением ОНМ. Четкой ра-

боте схемы при внешних несимметричных КЗ способствует также то обстоятельство, что мощность обратной или нулевой последовательности (как и напряжения U_2 или U_0) уменьшается при удалении от места КЗ. Схема на рис. 7.6 более эффективна при использовании электромеханических ОНМ с разной мощностью срабатывания. Если применяются ОНМ на микроэлектронной элементной базе, то необходимо, чтобы вольт-амперные характеристики ОНМ, действующих на пуск и на отключение, были расположены соответственно как вольт-амперные характеристики *ПО1* и *ПО2* на рис. 7.4.

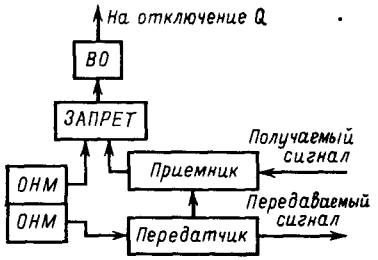


Рис. 7.6. Схема с пуском, осуществляемым самим ОНМ

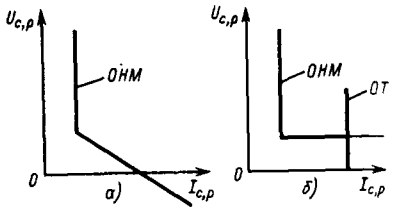


Рис. 7.7. Вольт-амперные характеристики ОНМ с компенсацией напряжения (*а*) и дополнительным органом тока (*б*)

Недостатком фильтровых направленных защит, в том числе с ВЧ блокировкой, является, как было показано в гл. 5, трудность обеспечения чувствительности по напряжению при удаленных КЗ, если мало́ сопротивление питающей системы (большая мощность системы). Для повышения чувствительности ОНМ по напряжению применяются в основном два способа:

1) использование комбинированного напряжения, например $\underline{U}_2—\underline{Z}_{2к}\underline{I}_2$ (предложение СРЗиУ ТЭП, В. М. Ермоленко и С. Я. Петров), что обеспечивает получение вольт-амперной характеристики ОНМ, показанной на рис. 7.7, *а*;

2) использование дополнительного *ОТ* I_2 или I_0 (предложение ВНИИЭ, Я. С. Гельфанд), уставка которого выбирается таким образом, чтобы при внешних КЗ действие защиты надежно блокировалось ОНМ одного из концов линии (при КЗ за удаленным концом линии — передачей БС). Результирующая вольт-амперная характеристика ОНМ и *ОТ* показана на рис. 7.7, *б*. Исследования ВНИИЭ показали, что на длинных линиях 110—220 кВ вариант с дополнительным реле тока может оказаться более предпочтительным.

Обеспечение работы схем защит при $K^{(3)}$. Этот вопрос возникает при использовании схем с включением на составляющие обратной последовательности, когда стремятся иметь односистемную схему защиты, реагирующую на все виды КЗ, в том числе и на $K^{(3)}$. При этом учитывается, что практически почти всякое $K^{(3)}$ характеризуется хотя бы кратковременной несимметрией, достаточной для срабатывания ОНМ. Далее это срабатывание фиксируется минимальным органом сопротивления, включаемым на $\underline{U}_{мф}$ и $\underline{I}_{мф}$. С этой точки зрения более предпочтительной являлась бы пока не применяемая схема с включением ОНМ на полные аварийные слагающие. Возможно также использование отдельного комплекта органов от $K^{(3)}$.

Одним из основных недостатков рассмотренных направленных защит является их неприспособленность для защиты линии в неполнофазном режиме, возникающем, например, в цикле ОАПВ.

Область применения направленных защит с ВЧ блокировкой. В Советском Союзе во ВНИИЭ (Е. Д. Сапир и др.) были разработаны весьма совершенные варианты дифференциально-фазных продольных токовых защит линий (см. гл. 8), на базе которых промышленностью выпускались защиты с общим названием ДФЗ. В связи с указанным дифференциально-фазные защиты в отечественной практике последних десятилетий (в отличие от зарубежной) получили очень широкое применение, вытеснив направленные защиты.

Однако направленные защиты по сравнению с дифференциально-фазными имеют некоторые принципиальные преимущества: значительно лучше приспособлены для работы на линиях с ответвлениями (см. гл. 9), могут быть выполнены несколько более быстродействующими, в них предъявляются меньшие требования к ВЧ каналу (см. гл. 1). Поэтому в настоящее время принято решение о выпуске в дальнейшем промышленностью только направленных защит на интегральной микроэлектронной базе—основной для устройства защиты. Для обеспечения полноценной защиты линий сверхвысоких и ультравысоких напряжений в цикле ОАПВ (такие линии, как правило, снабжаются устройствами однофазного АПВ) ВНИИЭ разработа-

ны варианты направленных защит, которые в рассматриваемом режиме переводятся в дифференциально-фазные; последние (см. гл. 8) функционируют при этом достаточно правильно.

7.6. СОЧЕТАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ С НАПРАВЛЕННЫМИ ПРОДОЛЬНЫМИ

Дистанционная защита отключает КЗ без выдержки времени с обеих сторон только примерно на 70 % длины участка (рис. 7.8). На остальных 30 % длины КЗ отключаются без выдержки времени только с одной стороны. Продольные направленные защиты не имеют выдержки времени, но не могут как резервные отключать КЗ на смеж-

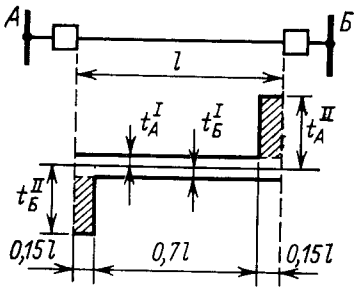


Рис. 7.8. Выигрыш во времени отключения КЗ при сочетании дистанционной защиты и направленной с ВЧ блокировкой

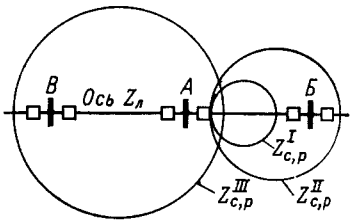


Рис. 7.9. Вариант характеристики $Z_{с.р}=f(\varphi_р)$ трех ступеней дистанционной защиты $А$ с ВЧ блокировкой

ных элементах. Обе защиты являются направленными и могут иметь некоторые общие органы. Поэтому имеются исполнения, органически сочетающие эти две защиты и обеспечивающие отключение КЗ на защищаемом участке без выдержки времени. Существуют варианты таких сочетаний.

1. Пуск передатчика при внешних КЗ от «вывернутой» третьей ступени с направленными реле сопротивления, имеющими характеристику, сдвинутую на защищаемую линию для исключения мертвой зоны (рис. 7.9). При этом III ступень дистанционной защиты действует в сторону, противоположную I и II ступеням, что имеет некоторые недостатки (см. гл. 1). Способ не получил распространения в отечественной практике.

2. Использование для направленной защиты не блокирующих, а разрешающих сигналов. Известным недостатком при ВЧ канале является возможность сильного затухания ВЧ сигнала при прохождении через место КЗ на защищаемой линии. Такой вариант применяется для резервных дистанционных защит (при наличии основных направленных защит с ВЧ блокировкой) линий сверхвысоких напряжений.

Основным преимуществом рассматриваемых комбинированных выполнений по сравнению с вариантом установки двух независимых защит — дистанционной и продольной направленной — является уменьшение числа сложных органов. Иногда такое объединение может быть также полезно для защиты линий с ответвлениями (см. например, [63]). Однако рассматриваемое объединение имеет и недостатки: неисправности в цепях одной из защит могут приводить к нарушению работы обеих защит; при ревизии или неисправности в цепях одной из защит может потребоваться вывод из работы обеих защит; чувствительность защиты как направленной с ВЧ блокировкой может быть меньше, чем отдельной направленной.

С учетом изложенного на практике объединенные защиты иногда применяют для менее ответственных сетей, где, однако, необходимо отключение КЗ в любых местах участков без выдержки времени. Это объединение относится только к дистанционным защитам от многофазных КЗ. Направленные ВЧ защиты от КЗ на землю выполняются при этом отдельными комплектами нулевой или обратной последовательности с ВЧ блокировкой и могут объединяться с токовыми направленными защитами нулевой последовательности со ступенчатыми характеристиками выдержек времени (см. гл. 5).

7.7. ВЫПОЛНЕНИЕ НОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ С ВЧ БЛОКИРОВКОЙ, ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

На основе разработок ВНИИЭ и ВНИИР созданы панели направленной защиты с ВЧ блокировкой для ВЛ напряжением 110—330 кВ [54].

Для работы при несимметричных КЗ используются ИО обратной последовательности, выполненные с помощью *ОТ*, *ОН* и *ОНМ*. Пуск блокирующего ВЧ сигнала и *ОНМ*, действующего в сторону отключения, осуществляется более чувствительными *ОТ* и *ОН*, действующими по схеме

И, а его остановка — *ОНМ*, причем вольт-амперные характеристики органов аналогичны показанным на рис. 7.4 для *ПО1* и *ОНМ*, что обеспечивает сочетание достоинств направленного и ненаправленного пусков. Действие защиты на отключение осуществляется более грубыми *ОТ* и *ОН*, действующими по схеме И с *ОНМ*. Эта схема эквивалентна *ОНМ* с вольт-амперной характеристикой *ПО2* на рис. 7.4. Для повышения чувствительности защиты по напряжению предусмотрен дополнительный *ОТ*, срабатывание которого при отсутствии блокирующего ВЧ сигнала приводит к действию защиты на отключение независимо от значения напряжения обратной последовательности (рис. 7.7, *б*).

Для работы при трехфазных КЗ используются два органа сопротивления (ОС), характеристики которых аналогичны характеристикам $Z_{с.р}^{II}$ и $Z_{с.р}^{III}$, показанным на рис. 7.9, но являются не круговыми, а эллиптическими, что обеспечивает лучшую отстройку от нагрузки. Отключающий *ОС* является направленным, охватывает с запасом всю защищаемую линию и имеет память для работы при близких трехфазных КЗ. Блокирующий *ОС* имеет характеристику, охватывающую начало линии, чтобы надежный пуск блокирующего ВЧ сигнала обеспечивался при близких КЗ на смежной линии. Отключающий *ОС* вводится в действие блокировкой при качаниях, ПО которой реагирует на I_2 и производную изменения фазного тока (см. гл. 6). Защита может работать как с ВЧ приемопередатчиком БС, так и с ВЧ приемопередатчиком, передающим в одной полосе частот как блокирующие, так и отключающие ВЧ сигналы.

7.8. ПРИНЦИП РАБОТЫ НАПРАВЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ЗАЩИТ

Направленными поперечными могут быть названы защиты с абсолютной селективностью, сравнивающие направление мощности КЗ в присоединениях (линиях) данной подстанции. Поврежденный элемент выявляется тем, что знак мощности КЗ на нем отличается от знаков мощности других присоединений: на поврежденном элементе мощность КЗ направлена от шин в линию, а на других — к тем же шинам. Анализ показывает, что такой принцип пригоден не во всех случаях. Возможная область его применения ограничивается в основном защитой линии, связывающей непосредственно два источника питания

(рис. 7.10, *а*), при наличии любых обходных связей без дополнительных источников питания, а также двух или нескольких параллельных цепей (рис. 7.10, *б* и *в*). Защита впервые была выполнена в Советском Союзе в конце 20-х годов для сети 110 кВ, аналогичной приведенной на рис. 7.10, *а*. В СРЗиУ ТЭП (В. М. Ермоленко) было предло-

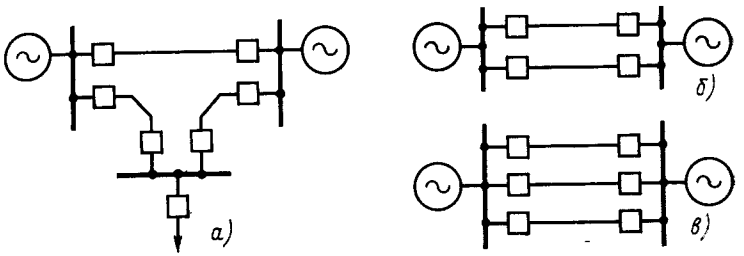


Рис. 7.10. Примеры схем сетей, в которых возможно использование направленных поперечных защит

жено использовать такой же принцип для защиты нулевой последовательности параллельных цепей. Он получил широкое применение. Ниже рассматриваются его особенности применительно к такому выполнению.

7.9. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

Принцип действия. Структурная схема защиты двух параллельных цепей линии (рис. 7.11, *а*) приведена на рис. 7.11, *б*. Предполагается присоединение защиты к выносным *ТА* и использование органов направления мощности *ОНМ* двустороннего действия. Они включаются на $3U_0$ и $3I_0$ так, чтобы защита действовала на отключение поврежденной цепи при направлении мощности КЗ в ней от шин в линию, если при этом на параллельной цепи мощность направлена от линии к шинам. Отключающий сигнал проходит через *ОНМ* и *ОТ* своей цепи, органы *ОНМ* и реле положения «включено» *KQC* выключателя *Q* параллельной цепи. Защиты двух сторон параллельных цепей могут срабатывать только каскадно, т. е. после отключения выключателя одной из них. Это определяется тем, что по неповрежденной цепи мощность КЗ только с одной стороны направлена к шинам (с другой при этом — от

шин). При КЗ в цепи I вблизи места установки защиты K_1 $ОНМ''$ цепи II дает разрешающий сигнал защите поврежденной цепи I, срабатывают ее $ОНМ'$, $ОТ'$ и через реле положения KQC'' отключается Q'. После этого направление мощности КЗ в неповрежденной цепи II меняется на обратное и срабатывает защита другой стороны линии. Контроль цепи отключения контактом KQC'' предотвращает возможность неправильного отключения неповрежденной цепи I при КЗ K_2 между Q'' и TA'' при от-

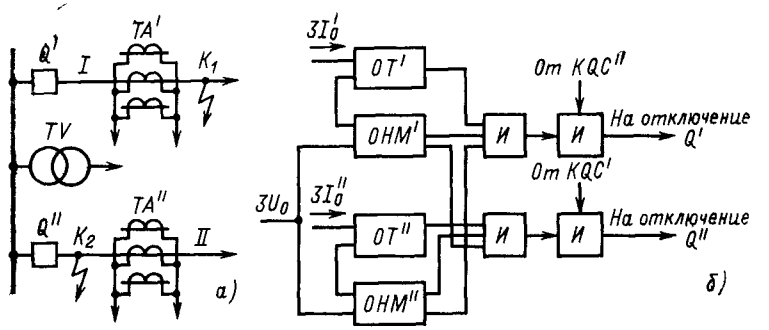


Рис. 7.11. Структурная схема направленной поперечной защиты для одной стороны двух параллельных цепей

ключенном Q''. Такой контроль цепи не требуется при включении защиты на TA, встроенные в высоковольтные вводы выключателей (например, масляных многообъемных).

При внешних КЗ и включенных обеих цепях оба $ОНМ$ действуют в одну сторону и защита сработать не может. Этим подтверждается ее абсолютная селективность и возможность выполнения без выдержки времени. При работе одной цепи защита также не работает, так как не действует $ОНМ$ отключенной цепи. При одностороннем питании защита может быть использована только с приемной стороны.

Выбор параметров и проверка чувствительности. Токи срабатывания ПО выбираются с учетом соображений, приведенных для продольных направленных защит (см. § 7.5).

При оценке чувствительности защиты учитывается (разработки Т. Н. Дородновой и В. А. Рубинчика, ЭСП) наличие на защищаемых участках передачи точки $K'_{расч}$

(рис. 7.12, *а*), при КЗ в которой ток в неповрежденной цепи и мощность КЗ оказываются равными нулю. При повреждении в этой точке защиты сторон не срабатывают, так как не срабатывают ОНМ неповрежденной цепи, т. е. защита характеризуется наличием мертвой зоны. При небольшом отходе от $K'_{расч}$ в неповрежденной цепи появляются ток и мощность КЗ и защиты каскадно срабатывают. Для обеспечения необходимой чувствительности защиты по току при повреждениях вблизи $K'_{расч}$ должен обеспечиваться $k_ч \geqslant 1{,}5 \div 2$ (учет КЗ через $R_п$). Местоположение $K'_{расч}$ определяется из схемы замещения защищаемой сети (рис. 7.12, *б*) с учетом того, что в этом режиме остаточ-

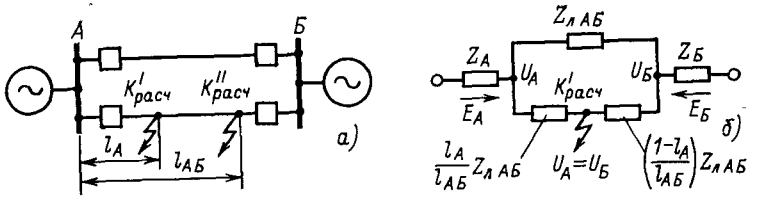


Рис. 7.12. Определение местоположения точки $K'_{расч}$, при КЗ в которой направленные поперечные защиты не работают

ные напряжения на шинах $А$ и $Б$ одинаковы. Тогда получаем расстояние до $K'_{расч}$, например, от шин $А$ $l_А \approx \approx Z_А l_{АБ}/(Z_А + Z_Б)$, где $Z_А$ и $Z_Б$ — приведенные к шинам $А$ и $Б$ эквивалентные сопротивления систем $А$ и $Б$. Чувствительность проверяется также при повреждении в точке $K''_{расч}$, соответствующей концу участка при отключении защитой его противоположной стороны (каскадно). Наличие мертвой зоны у $K'_{расч}$ практически исключается действием на одной из сторон другой установленной защиты, после которого срабатывает и рассматриваемая.

Область применения. Достоинствами защиты являются относительно быстрая ликвидация КЗ с временем $t \approx \approx 2(t_з + t_в)$ и весьма малая вероятность отключения обеих цепей при КЗ на одной цепи с обрывом фазы или просто при обрыве фазы в отличие от отключения в указанных случаях обеих цепей при использовании поперечных дифференциальных токовых направленных защит (см. гл. 8). Недостатки: пригодность только для некоторых схем се-

тей (прежде всего параллельных цепей) и невозможность применения в качестве единственной, так как она не работает при отключении одной из цепей, при КЗ на шинах и не может резервировать отключение КЗ на смежных элементах.

Защита широко применяется в отечественной практике в виде защиты нулевой последовательности от $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ параллельных цепей линий с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ в сетях, имеющих заземленные нейтрали трансформаторов (автотрансформаторов), с использованием ОТ и ОНМ токовых направленных защит со ступенчатыми характеристиками выдержки времени (см. гл. 5). При наличии заземления только с одной стороны линий защита может использоваться лишь с противоположной стороны линий, примыкающих к трансформаторам с изолированными нейтралями. Применение рассматриваемой защиты облегчает также согласование II ступеней токовых и токовых направленных защит нулевой последовательности (см., например, [36]).

Вопросы для самопроверки

1. Какие защиты называются токовыми и направленными с косвенным сравнением электрических величин?
2. Какие электрические величины могут сравниваться в защитах по сигналам с питающих сторон защищаемых участков и какие имеют преимущественное использование?
3. Могут ли рассматриваемые защиты использоваться как единственные на элементе?
4. Какие основные виды сигналов в канале могут сравниваться в защите? Объясните их особенности. Какие принципы выполнения защит с разными каналами связи целесообразны для использования?
5. Какие существуют способы пуска передатчиков направленных защит с ВЧ блокировкой? Их достоинства и недостатки при использовании отдельных ПО.
6. Назовите преимущества использования сочетания дистанционных защит с рассматриваемыми направленными продольными.
7. Какие защиты называются направленными поперечными? Поясните их области применения.

Глава восьмая

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ И ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

8.1. СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ

Дифференциальными токовыми и токовыми направленными называются защиты с абсолютной селективностью, непосредственно (см. гл. 1) сравнивающие электрические величины в заданных местах защищаемых элементов, например по концам линии (рис. 8.1, *а*), — продольные защиты или в элементах одной электроустановки, например в параллельных цепях линии (рис. 8.1, *б* и *в*), — попереч-

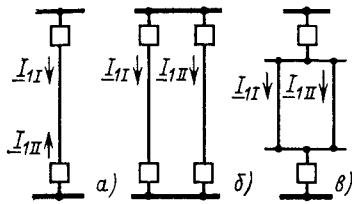


Рис. 8.1. Примеры схем сетей, в которых могут использоваться дифференциальные токовые и токовые направленные защиты

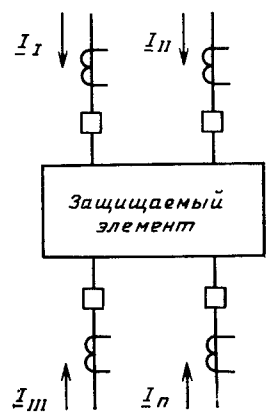


Рис. 8.2. Элемент, защищаемый дифференциальной токовой защитой

ные защиты. Защита может быть также использована для трансформаторов, статорных обмоток генераторов, сборных шин электроустановки и т. д. В общем случае принцип действия дифференциальной токовой (ненаправленной) защиты базируется на том, что геометрическая сумма токов со всех сторон защищаемого элемента (предполагается, что они условно направлены внутрь элемента) при отсутствии КЗ в нем равна нулю — $\sum_{n=1}^{n} \underline{I}_n = 0$, а при наличии КЗ она равна току в месте повреждения — $\sum_{n=1}^{n} \underline{I}_{кn} = \underline{I}_к$ (рис. 8.2).

Защищаемую зону ограничивают установкой *ТА* со всех сторон элемента; измерительный орган тока включают на геометрическую сумму вторичных токов *ТА*. Предполагая *ТА* идеально точными (полная погрешность $\varepsilon=0$), с одинаковыми коэффициентами трансформации K_I, получаем ток в органе тока при отсутствии повреждения в защищаемой зоне $I_р=0$, а при КЗ $I_р=I_к/K_I$. Это обеспечит срабатывание защиты.

В реальных условиях необходимо считаться с погрешностями *ТА*, для трансформаторов и автотрансформаторов — с наличием у них намагничивающих токов, воспринимаемых защитой как повреждение в защищаемой зоне, и с рядом других факторов, учитываемых ниже.

Все рассматриваемые виды дифференциальных защит как обладающие абсолютной селективностью выполняются без выдержки времени и используются в сочетании с другими, например резервными защитами с относительной селективностью.

В продольных дифференциальных токовых защитах могут сравниваться мгновенные значения токов, одновременно модули и фазы токов или только их фазы; сравнение только модулей (абсолютных значений) токов не может выявить поврежденный элемент. В поперечных защитах в общем случае могут сравниваться мгновенные значения токов, их фазы или модули, а также направления мощностей КЗ. В последнее время схемы со сравнением модулей, как правило, не применяются. Для продольных защит обычно применяются проводные и ВЧ каналы (см. гл. 1), для поперечных — проводные.

Принцип действия дифференциальных токовых направленных защит рассматривается в конце главы особо. Ниже в первую очередь более подробно рассматриваются дифференциальные токовые защиты на примере их применения как продольных для защиты линий.

8.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С ПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ

Принцип действия защиты рассматривается применительно к ее выполнению с проводным каналом (вспомогательными проводами) для элемента небольшой протяженности (рис. 8.3). На концах защищаемого элемента устанавливаются *ТА* с одинаковым K_I. Их вторичные обмотки на одноименных фазах соединяются проводами и подключаются к обмотке измерительного органа тока *ОТ* так, чтобы при внешних КЗ ток в органе отсутствовал, а при КЗ в защищаемой зоне определялся током в месте повреждения. Возможны два соединения, удовлетворяющие этим условиям, носящие названия схем с *циркулирующими токами и уравновешенными напряжениями*. На практике обычно используется как имеющий некоторые преимущества рассматриваемый ниже первый вариант. В нем вторичные обмотки *ТА* (если считать, как всегда, что одноименные концы первичной и вторичной обмоток расположены с одной стороны) соединяются между собой при помощи вспомогательных проводов концами, обращенными внутрь защищаемой зоны, ограниченной *ТА*, и наружу; параллельно им (дифференциально) включается обмотка *ОТ*.

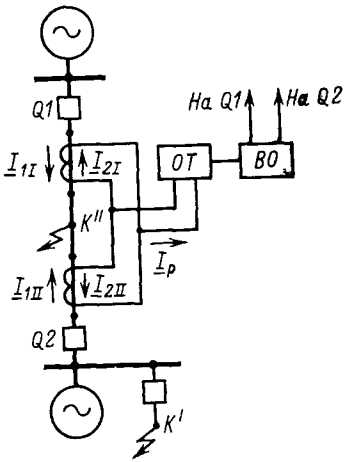


Рис. 8.3. Однолинейная схема продольной дифференциальной токовой защиты

Ток в *ОТ* с учетом условных положительных направлений токов, указанных на рис. 8.3 стрелками (внутрь защищаемой зоны), $\underline{I}_р=\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}$.

Ток $\underline{I}_р$ равен геометрической сумме токов, подходящих к *ОТ* от *ТА*. При нормальной работе, качаниях и внешних КЗ (точка K') первичные токи $\underline{I}_{1I}$ и $\underline{I}_{1II}$, если пренебречь поперечной проводимостью защищаемого элемента, равны и сдвинуты по фазе на 180°. Поэтому при точной трансформации вторичные токи связаны соотношением $\underline{I}_{2I}=-\underline{I}_{2II}$, ток $\underline{I}_р=0$ как определяемый действительной разностью токов, и *ОТ* не срабатывает, хотя по вспомогательным проводам и циркулируют токи. С учетом изложенного защита называется *дифференциальной*, а ее схема — схемой с *циркулирующими токами*. В ней могут сравниваться мгновенные и комплексные значения токов.

При КЗ в защищаемой зоне (точка K'') токи $\underline{I}_{1I}$ и $\underline{I}_{1II}$ в общем случае неодинаковы и в сумме равны току в месте

КЗ: $\underline{I}_к=\underline{I}_{II}+\underline{I}_{III}$. Ток $I_р=I_к/K_I$. Если $I_р>I_{с.р}$, *ОТ* срабатывает и через выходной орган *ОВ* подает сигналы на отключение выключателей с обеих сторон элемента. При одностороннем питании, например $\underline{I}_{III}=0$, существует ток $\underline{I}_{2I}$. Можно приближенно принять, что он полностью замыкается через *ОТ*, не ответвляясь во вторичную обмотку *ТА* с $\underline{I}_{III}=0$, так как ее сопротивление, определяемое в основном сопротивлением ветви намагничивания (первичную обмотку этого *ТА* следует считать как бы разомкнутой), обычно больше сопротивления обмотки *ОТ*. Поэтому $I_р\approx\approx I_{2I}$, и защита в случае $I_р\geqslant I_{с.р}$ также срабатывает. В об-

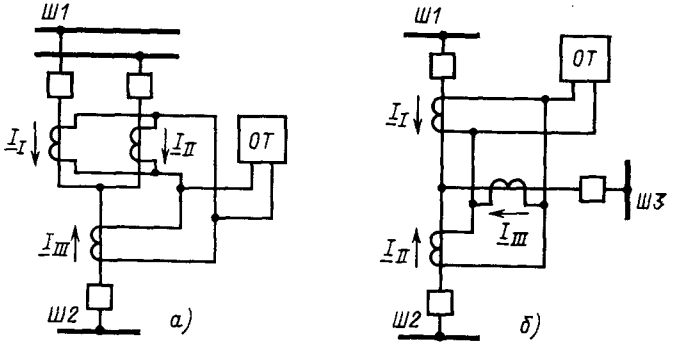


Рис. 8.4. Дифференциальные токовые защиты при числе групп *ТА* больше двух

щем случае число групп *ТА*, образующих защиту, может быть больше двух, например при защите линии, присоединяемой к шинам с одной (рис. 8.4, *а*) или с обеих сторон через два выключателя, или при защите многоконцевой линии, присоединяемой к трем системам шин (рис. 8.4, *б*). Соединяя *ТА* и *ОТ* в соответствии с положениями, изложенными выше, и принимая, в частности, условные положительные направления всех первичных токов ($\underline{I}_I$, $\underline{I}_{II}$, $\underline{I}_{III}$) внутрь защищаемой зоны, имеем при внешних КЗ $\underline{I}_I+\underline{I}_{II}+\underline{I}_{III}=0$, $\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}+\underline{I}_{2III}=0$, $I_р=0$, и защита не срабатывает. При КЗ в защищаемой зоне, определяемой тремя группами *ТА*, $\underline{I}_I+\underline{I}_{II}+\underline{I}_{III}=\underline{I}_к$ в месте повреждения. Если ток $I_р=I_к/K_I\geqslant I_{с.р}$, защита срабатывает и отключает выключатели.

8.3. ТОК НЕБАЛАНСА, ТОК СРАБАТЫВАНИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С ПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ

Токи небаланса. При рассмотрении принципа действия защиты по рис. 8.3 предполагалось, что при отсутствии КЗ в защищаемой зоне $I_р=0$. В действительных условиях ток $\underline{I}_2=\underline{I}'_1-\underline{I}'_0$, где $\underline{I}'_0$ — приведенный намагничивающий ток (см. гл. 3), причем даже при в точности одинаковых K_I *ТА* и поэтому равенстве I'_1 токи I'_0 и I_2 практически всегда неодинаковы. В связи с этим в рассматриваемом режиме в *ОТ* появляется ток, называемый *током небаланса* (вторичным):

$$\underline{I}_{нб}=\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}=-(\underline{I}'_{0I}+\underline{I}'_{0II}). \qquad (8.1)$$

Для рис. 8.4 $\underline{I}_{нб}=\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}+\underline{I}_{2III}=-(\underline{I}'_{0I}+\underline{I}'_{0II}+\underline{I}'_{0III})$. Наиболее просто действующие, средние и мгновенные значения тока небаланса определяются для случая, когда со-

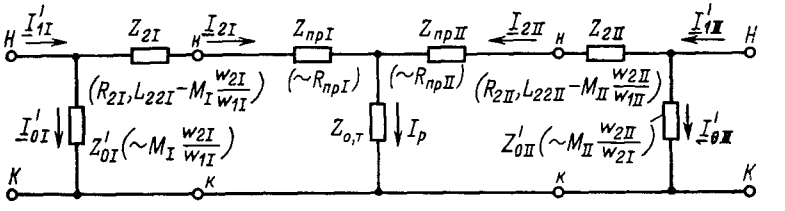


Рис. 8.5. Схема замещения защиты по рис. 8.3

противление цепи *ОТ* мало по сравнению с сопротивлениями $Z_{пр}$ «плеч» защиты — вспомогательных проводов от вторичных зажимов *ТА* до *ОТ*. В этом случае, если считать сопротивление *ОТ* равным нулю, каждый *ТА* работает независимо и для определения намагничивающих токов могут быть использованы соотношения, рассмотренные в гл. 3.

Соотношения значительно усложняются при учете сопротивления *ОТ*. Первые работы в этом направлении были проведены лабораторией им. А. А. Смурова и СРЗиУ ТЭП (Н. Ф. Марголин) в начале 30-х годов. Факторы, определяющие $I_{нб}$ в установившемся синусоидальном режиме для схемы на рис. 8.3, выявлялись из рассмотрения ее схемы

замещения (рис. 8.5) в предположении, что все элементы имеют линейные характеристики. Составляя для этой схемы уравнения токов для узловых точек и уравнения падений напряжения для случая отсутствия КЗ в защищаемой зоне ($\underline{I}'_{1I}=-\underline{I}'_{1II}$) и обозначая $\underline{Z}'_{0I}-\underline{Z}'_{0II}=\Delta\underline{Z}'_0$ и $(\underline{Z}_{2I}+\underline{Z}_{прI})-(\underline{Z}_{2II}+\underline{Z}_{прII})=\underline{Z}_I-\underline{Z}_{II}=\Delta\underline{Z}$, с учетом ряда упрощений получаем следующее выражение для установившегося тока небаланса: $\underline{I}_{нб}\approx(\Delta\underline{Z}'_0\underline{Z}_I-\Delta\underline{Z}\underline{Z}'_{0I})I'^2_1/Z'^2_{0I}+2\underline{Z}_{0I}\underline{Z}_{о,т})$.

Рассмотрение соотношений, получающихся в схеме, дает возможность сделать следующие выводы:

ток $I_{нб}$ уменьшается с увеличением сопротивления дифференциальной цепи $Z_{о,т}$. Необходимо, однако, отметить, что при этом будет соответственно уменьшаться и ток $I_р$ при внутреннем КЗ. Поэтому для рассматриваемого частного случая — линейных цепей и установившегося режима — такое увеличение $Z_{о,т}$ эффекта не дает, однако с учетом переходных режимов и насыщения *ТА* увеличение $Z_{о,т}$, как отмечалось лабораторией им. А. А. Смурова, может быть целесообразным;

на ток $I_{нб}$ оказывают влияние совместная работа *ТА* и соотношение сопротивлений плеч и ветвей намагничивания, так как падение напряжения на обмотке *ОТ* $\Delta U_р=\underline{Z}_{о,т}I_{нб}$ определяется обоими *ТА*; при этом с учетом знака $\Delta U_р$ менее мощный *ТА* (имеющий меньшее Z_0) разгружается, а более мощный нагружается. Выбирая сопротивление плеч так, чтобы $\Delta\underline{Z}'_0\underline{Z}_I-\Delta\underline{Z}\underline{Z}'_{0I}=0$, теоретически получаем $I_{нб}=0$;

для снижения $I_{нб}$ целесообразно уменьшать нагрузку — сопротивление провода плеча $Z_{пр}$ менее мощного *ТА* (имеющего меньшее Z_0). При одинаковых *ТА* целесообразно иметь равными и сопротивления плеч;

ток $I_{нб}$ возрастает с увеличением первичного тока внешнего КЗ I_I.

Для определения тока небаланса в переходном режиме внешнего КЗ могут быть составлены соответствующие дифференциальные уравнения. Однако они непосредственно не могут быть использованы, так как индуктивности ветвей намагничивания *ТА* нелинейны, последние насыщаются, причем в общем случае неодинаково и неодновременно; при этом в начальные моменты КЗ сказывается наличие у *ТА* возможно неодинаковых остаточных индукций и т. д. Поэтому действительные соотношения оказываются весьма сложными.

Первые серьезные исследования в этой области, как уже указывалось, были осуществлены в начале 30-х годов в лаборатории имени А. А. Смурова (М. П. Поташевым). В 40-е годы они проводились во ВНИИЭ (Г. И. Атабековым и др. [12]) и далее в ИЭД АН УССР (И. М. Сиротой [69], Б. С. Стогнием и др.). Особенно глубокие и полезные исследования с разработкой конкретных рекомендаций по отстройке защиты от переходных $i_{нб}$ проводились в НПИ под руководством А. Д. Дроздова Э. В. Подгорным, В. В. Платоновым, С. Л. Кужековым, С. Д. Хлебниковым, В. В. Михайловым и др. Должны быть также отмечены полезные исследования в БПИ (В. И. Новаш и др.), в НЭТИ (Л. В. Багинским и др.) и некоторые другие. Рассматриваемым вопросом занимались и ряд зарубежных специалистов и фирм.

Сложности получающихся соотношений для реальных *ТА*, на практике не подбираемых в специальные комплекты (что в общем случае особого эффекта может и не давать) и насыщающихся в переходных режимах, определили целесообразность применения для анализа аналоговых и цифровых вычислительных машин. Для практической оценки использовались также многочисленные опытные данные.

Проведенные исследования по определению переходных $i_{нб}$ дали ряд ценных дополнительных соображений, которые учитываются при выполнении дифференциальных токовых защит: ток $i_{нб}$ переходного режима может содержать значительные апериодические слагающие и во много раз превосходить свои установившиеся значения, обычно не превышающие 10 % номинального тока *ТА* (рис. 8.6, *а*);

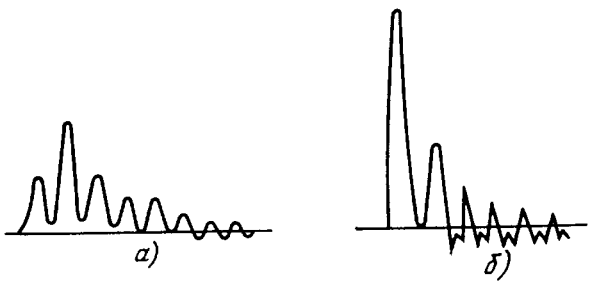


Рис. 8.6. Осциллограммы переходных токов небаланса в ИО дифференциальных токовых защит

при этом $i_{нб}$ может иметь максимальное значение не в начальные моменты возникновения КЗ, а несколько позже; возможно возникновение переходного $i_{нб}$ в трехфазных схемах защит, имеющего знакопеременный характер (рис. 8.6, *б*), отмеченный (одним из первых) А. М. Раковичем; время существования больших переходных $i_{нб}$ не превосходит долей секунды; для снижения $i_{нб}$ полезно включение в дифференциальную цепь последовательно с *ОТ* добавочного (обычно активного) сопротивления; значительное влияние на процесс оказывают постоянные времени T_1 и T_2 соответственно первичной цепи до точки внешнего КЗ и вторичной цепи защиты. Следует, однако, учитывать, как это уже отмечалось в гл. 3, что для появления в токах i_0, определяющих $i_{нб}$, больших апериодических слагающих повреждение должно возникать в моменты, когда мгновенные значения напряжений в системе малы; однако перекрытия более вероятны при u, приближающихся к U_m. Поэтому при вероятностном подходе появление $i_{нб}$ с большими апериодическими слагающими менее вероятно, чем с малыми.

Как и для токов небаланса в фильтрах (см. гл. 3), в дифференциальных защитах часто используется понятие о первичном токе небаланса, имеющем, в общем, тот же смысл, что и в фильтрах.

Ток срабатывания защит. Для обеспечения несрабатывания защиты, выполненной по рассматриваемой элементарной схеме (см. рис. 8.3), при внешних КЗ и качаниях, когда уравнительные токи могут быть даже больше $I_{к.вн\ max}$,

$$I_{с.з} \geqslant k_{отс} I_{нб max расч}. \qquad (8.2)$$

Необходимо отметить, что токи $I_{нб}$ при качаниях с учетом отсутствия в них больших апериодических слагающих оказываются меньшими, чем при внешних КЗ. Однако приходится считаться со случаями наложения КЗ на качания, когда соотношения могут быть другими. В процессе эксплуатации защиты приходится, в основном в случае прокладки вспомогательных проводов вне пределов данной установки, считаться с возможностью их повреждения. При КЗ между жилами вспомогательных проводов цепь тока *ОТ* шунтируется местом повреждения и защита может отказать при КЗ в защищаемой зоне. При разрыве этих проводов I_2 одного из *ТА* пройдет через *ОТ* и в случае $I_{с.р} < I_{раб}$ защита ложно отключит неповрежденный элемент. Поэтому при прокладке вспомогательных проводов вне территории установки осуществляют автоматический контроль их исправности. При этом при работе устройства контроля только на сигнал дополнительно к (8.2) выбирают $I_{с.з} > I_{раб}$. Простейшая схема контроля осуществляется включением дополнительного органа тока на ток $3I_0$ дифференциальной цепи последовательно с основными органами, четко реагирующего только на несимметричные разрывы цепей циркуляции. Необходимо отметить, что такой орган может быть использован и для других целей — реагирования на повреждения, связанные с замыканием на землю (например, $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$, $K_{дв}^{(1,1)}$).

Коэффициент чувствительности. Коэффициент чувствительности (см. гл. 1) $k_ч = I_{к\ min}/I_{с.з}$. Расчетным обычно является случай одностороннего питания места КЗ, когда $I_{к\ min}$ определяется током, проходящим через одну группу *ТА*.

8.4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ОТСТРОЕННОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С ПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ

В большинстве случаев чувствительность защиты, выполненной по элементарной схеме (см. рис. 8.3), оказывается недостаточной, а трудность правильного определения $I_{нб\ max\ расч}$ может ухудшать отстроенность защиты от внешних КЗ. Существует большое число способов повышения чувствительности и отстроенности защиты.

Замедление действия защиты на время существования больших переходных $i_{нб}$. При этом снижается основное качество защиты — быстрота срабатывания. Поэтому способ не рекомендуется.

Включение последовательно с цепью тока ОТ добавочного сопротивления. Этот способ предлагался, а иногда и использовался в отечественных разработках (обычно в качестве дополнительного мероприятия). При больших значениях добавочных сопротивлений для защиты от перенапряжений при внутренних КЗ встает вопрос о необходимости шунтирования ОТ специальными устройствами (например, нелинейными резисторами).

Использование органа напряжения (ОН) с большим внутренним сопротивлением вместо ОТ. Способ находит применение в ряде зарубежных исполнений защит. Основная его идея заключается в том, что при насыщении одного из *ТА* происходит шунтирование ОН сопротивлением пле-

ча дифференциальной схемы с малым сопротивлением намагничивания насыщенного *ТА*. В предельном случае полного насыщения *ТА* напряжение на ОН равно падению напряжения на сопротивлении плеча схемы от прохождения тока ненасыщенного *ТА*. Этот случай является расчетным для выбора уставок ОН. При использовании схемы обязательно ограничение перенапряжений с помощью, например, нелинейных резисторов.

Использование сравнения фаз токов плеч. Неодинаковое насыщение *ТА* при внешних КЗ не может обусловить изменение угла между комплексами вторичных токов со значений 180° до значений, характерных для КЗ в защищаемой зоне. Поэтому может быть получена удовлетворительная отстройка от внешних КЗ. Возможны различные схемы реализации способа. Он нашел широкое применение для осуществления дифференциально-фазных продольных токовых защит с ВЧ блокировкой (см. § 8.7) и для дифференциальных продольных токовых защит со вспомогательными проводами (см. § 8.5).

Использование апериодических слагающих в токе $i_{нб}$ для отстройки защит от переходных токов небаланса. Способ обеспечивает загрубление защит при внешних КЗ двумя путями: включением ОТ через промежуточные насыщающиеся *ТА* (*TALT*) или выделением апериодической слагающей и использованием ее для торможения специального дифференциального ОТ, что позволяет автоматически загрублять защиту при внешних КЗ, увеличивая ее $I_{с,з}$ (разрабатывался в СРЗиУ ТЭП Г. Т. Греком и В. Л. Фабрикантом). Возможно также загрубление защиты при внешних КЗ всеми составляющими $i_{нб}$, кроме первой гармоники.

В отечественной практике для дифференциальных токовых защит машин, аппаратов и шин, выполняемых на электромеханической элементной базе, широкое применение получил первый вариант способа. В этом большая заслуга коллектива НПИ (А. Д. Дроздов, В. В. Платонов и др.), давшего не только глубокий анализ получающихся соотношений, но и разработавшего ряд эффективных конструктивных решений и рекомендаций по выбору параметров защит, выполняемых с использованием этого способа [56]. Его сущность кратко (более полно см. гл. 12) сводится к следующему. При внешних КЗ апериодическая слагающая $i_{нб}$ обусловливает насыщение магнитопровода *TALT*, резкое уменьшение сопротивления его ветви намагничивания в схеме замещения. В этих условиях значительная часть периодической слагающей и знакопеременных слагающих замыкается через указанную ветвь намагничивания и не попадает в ОТ. Это и определяет автоматическое загрубление защиты на время прохождения переходных $i_{нб}$. При этом $I_{с,з}$ может выбираться меньшим, чем в схеме без *TALT*. При КЗ в защищаемой зоне ток в дифференциальной цепи кратковременно также может содержать апериодическую слагающую, насыщающую *TALT*. Однако она быстро затухает, и получающееся замедление действия защиты обычно не превосходит нескольких десятков миллисекунд. Недостатком способа является отсутствие загрубления защиты при периодическом $i_{нб}$ и малое загрубление при небольших смещениях $i_{нб}$ относительно оси времени с сохранением полуволн обратного знака. Для защиты линий, где апериодические слагающие при внешних (сквозных) КЗ быстро затухают, способ применяется редко.

В заключение необходимо отметить, что первоначально, в 30-е годы, первый вариант способа был предложен в Германии только для отстройки защит от бросков токов намагничивания трансформаторов. Однако, отчасти в связи с неудачно выбранными параметрами *TALT*, он широкого применения не получил. Эффективность его использования для этих целей при более правильно выбранных параметрах *TALT* была показана в 40-е годы опытными исследованиями ВНИИЭ (М. И. Царев). Использование первого варианта способа для отстройки от $i_{нб}$, содержащих апериодическую слагающую, впервые было предложено в 40-е годы в ТПИ (И. Д. Кутявин). Более подробно рассмотрение работы *TALT* дано в гл. 12.

Использование для сравнения токов первых долей полупериода промышленной частоты. В это время *ТА* еще не успевают начать насыщаться, работают с линейными характеристиками, и поэтому при правильном выполнении схемы можно ожидать появления незначительных $i_{нб}$. Выполнение защит с учетом указанного фактора было предложено за рубежом (см. гл. 3) для быстродействующих защит, осуществляемых на микроэлектронной элементной базе.

Применение специальных ОТ с торможением. Органами тока с торможением применительно к дифференциальным защитам называются такие, ток срабатывания которых возрастает с увеличением тока в плечах защиты за счет тор-

можения, создаваемого этими токами. Основы теории работы дифференциальных токовых защит применительно к электромеханическим реле тока с торможением впервые были разработаны НПИ (А. Д. Дроздов) в 30-е годы. В дальнейшем там же были разработаны защиты с магнитным торможением. В зарубежной практике также использовалось магнитное торможение. Общие принципы торможения базируются на следующих рассуждениях. Ток небаланса $I_{нб}$ возрастает с увеличением тока сквозного КЗ или тока качаний. Поэтому целесообразно для отстройки от него иметь при этом автоматическое увеличение и тока срабатывания $I_{с.р}$ ОТ, однако такое, чтобы при КЗ на защищаемом элементе, когда также под действием $I_к$ возможно увеличение $I_{с.р}$, чувствительность защиты была большей, чем при выполнении ее без торможения. Это оказывается выполнимым при правильно выбранных значении торможения и схеме его реализации. Осуществление торможения возможно при использовании любой элементной базы.

Ниже рассматривается схема (рис. 8.7, *а*), в которой для осуществления торможения используется ток I_{2II} только одного ее II плеча. Предполагая линейную зависимость торможения от тока торможения $I_{торм}=I_{2II}$, получаем ОТ, характеристика которого определяется выражением

$$I_{с.р} = I_{с.р\,min} + k_{торм} I_{торм}, \qquad (8.3)$$

где $I_{с.р\,min}$ — минимальный ток срабатывания ОТ, соответствующий отсутствию $I_{торм}$ (например, при внутреннем КЗ с односторонним питанием со стороны I плеча), выбираемый так, чтобы защита была с запасом отстроена от $I_{нб}$ в рабочих режимах защищаемой линии, а $k_{торм}$ — коэффициент торможения, который при возможности питания только со стороны II плеча (откуда осуществляется торможение) должен быть меньше единицы. Зависимость (8.3) представляет в системе координат ($I_{с.р}$, $I_{торм}$) прямую (рис. 8.7, *б*), отсекающую на оси $I_{с.р}$ отрезок $I_{с.р\,min}$; ее наклон к оси $I_{торм}$ определяется $k_{торм}=\operatorname{tg}\alpha$. При нелинейной зависимости торможения от $I_{торм}$ (например, при магнитном торможении) примерный вид зависимостей $I_{с.р}=f(I_{торм})$ дан на рис. 8.7, *в* (наличие семейства зависимостей определяется характерными для этого исполнения разбросами). Применение защит с торможением, как указывалось выше, должно обеспечивать их бо́льшую чувствительность. Это иллюстрируется соотношениями, приведенными на рис. 8.8.

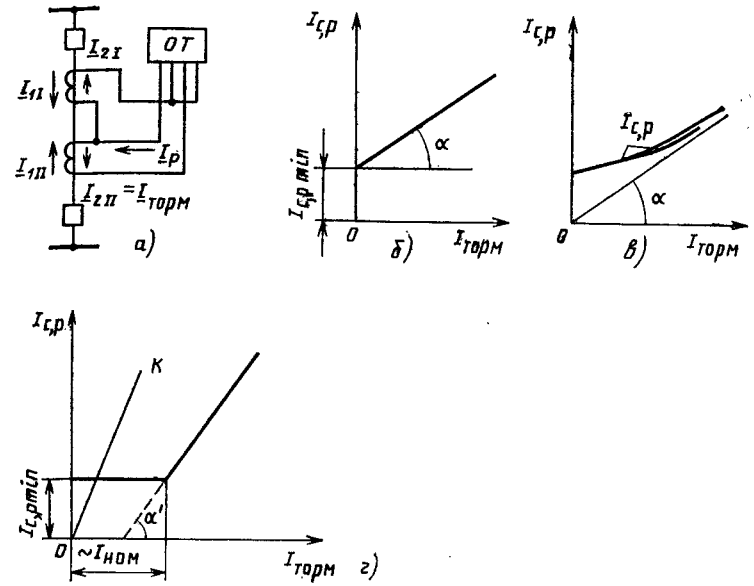


Рис. 8.7. Схема дифференциальной токовой защиты с торможением от тока одного плеча защиты (*а*) и ее характеристики срабатывания (*б*, *в* и *г*)

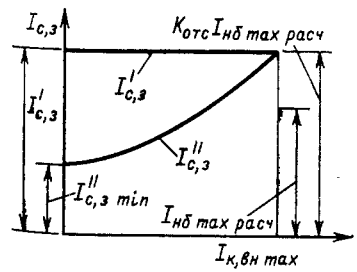


Рис. 8.8. Сравнение чувствительности дифференциальных токовых защит с органами тока без торможения и с торможением

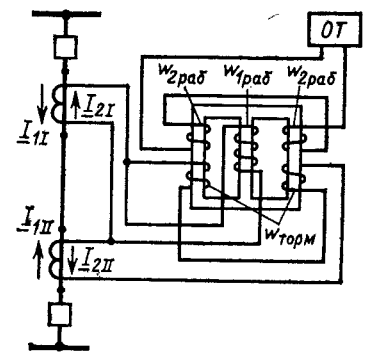


Рис. 8.9. Дифференциальная токовая защита с магнитным торможением от тока одного плеча

на котором представлены зависимости (в первичных величинах) $I'_{с,з}$ — без торможения и $I''_{с,з}$ — с торможением в функции тока $I_{к,вн}$ внешнего КЗ. При $I_{к,вн\,max}$ эти токи срабатывания должны иметь общее значение, равное $k_{отс}I_{нб\,max\,расч}$. При меньших $I_{торм}$, соответствующих КЗ в защищаемой зоне, $I'_{с,з}$ остается неизменным, а $I''_{с,з}$ снижается.

При определении коэффициента чувствительности $k_ч$ защиты с торможением, характеризующего ее способность срабатывать при снижении тока КЗ (например, за счет $R_п$), следует учитывать, что обычно для линий с уменьшением $I_к$ уменьшаются $I_{с,з}$ и $I_{торм}$. Поэтому определение $k_ч$ как отношения минимального тока при металлическом КЗ $I_{к\,min}$ к $I_{с,з}$ (принятое для токовых защит) является неоправданным. Используются другие способы (см., например, [10]).

В настоящее время иногда (для трансформаторов очень часто) при выполнении защит на современной элементной базе характеристики срабатывания таковы, что при токах $I_{торм}<I_{раб}$ торможение отсутствует, а при $I_{торм}>I_{раб}$ их наклон характеризуется бо́льшим углом α (рис. 8.7, *г*). Это обеспечивает при небольших токах КЗ повышение чувствительности защиты $k_ч=I_{к,расч}/I_{с,р\,min}$, где $I_{к,расч}$ соответствует минимальному току металлического КЗ в зоне защиты (точка K на рис. 8.7, *г*), $I_{с,р\,min}$ определяется пересечением прямой OK (уменьшение $I_к$ за счет $R_п$) с тормозной характеристикой, в частности на участке, параллельном оси $I_{торм}$ (точка K соответствует $I_{к,расч}$ при $R_п=0$).

Из рассмотрения также следует, что $k_{торм}$ для приведенной схемы при наличии питания места сквозного КЗ со стороны включения торможения должен быть меньше 1. При $k_{торм}\geqslant 1$ защита будет отказывать в работе в случае повреждения на защищаемом элементе.

Органы тока с торможением для дифференциальных защит вне зависимости от элементной базы могут иметь разные варианты исполнения. Так, например, возможно осуществление независимого торможения от токов не одного, а обоих плеч, создание *симметричных схем* торможения, при которых торможения от токов плеч при внутренних КЗ действуют в разные стороны, повышая чувствительность защиты, и т. д. (см., например, [10]).

Особо выполняется и магнитное торможение. Оно осуществляется дополнительным подмагничиванием промежуточного трехстержневого насыщающегося *TALT* токами плеч, например плеча II (рис. 8.9). Такой *TALT* по рис. 8.9 имеет три обмотки: рабочую первичную с числом витков $w_{1раб}$, расположенную на среднем стержне; рабочую вторичную с числом витков на каждом крайнем стержне $w_{2раб}$, питающую обычный максимальный орган тока ОТ, и тормозную с числом витков $w_{торм}$ на каждом крайнем стержне; при этом результирующее число витков последней, приведенное к среднему стержню, оказывается равным $w_{торм}$ (без удвоения, если учитывать разветвление потока среднего стержня). Рабочая обмотка (первичная) включается на $\underline{I}_{раб}=\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}$, тормозная, как отмечено выше, — на $\underline{I}_{торм}=\underline{I}_{2II}$.

В общем случае обмотки могут размещаться на стержнях различным образом при обязательном выполнении следующих условий: тормозная система не должна создавать тока в ОТ, а под воздействием тока плеча должна только насыщать магнитопровод и за счет этого ухудшать магнитную связь между первичной и вторичной обмотками рабочей системы; ток в обмотке $w_{1раб}$ $\underline{I}_{раб}=\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}$ должен создавать в секциях $w_{2раб}$ складывающиеся ЭДС.

С возрастанием $I_{торм}$ увеличивается насыщение крайних стержней *TALT*, $I_{раб}$ трансформируется в $w_{2раб}$ хуже и поэтому в условиях срабатывания вторичный $I_{с,з,в}=I_{раб}$ увеличивается, хотя $I_{с,р}$ ОТ остается неизменным.

Промежуточные *TALT* выбираются со значительными индукциями при срабатывании. При внешних КЗ и наличии в $I_{раб}=I_{нб}$ апериодической слагающей они глубоко насыщаются и плохо трансформируют в $w_{2раб}$ не только апериодическую слагающую, но и весь $I_{нб}$. Поэтому рассматриваемые *TALT* могут одновременно использоваться как для осуществления магнитного торможения, так и для отстройки от $I_{нб}$, содержащих апериодические слагающие. В этом заключается преимущество магнитного торможения по сравнению с обычным.

Торможение в настоящее время широко применяется при выполнении дифференциальных токовых защит. Одним из его недостатков в обычном исполнении является невозможность отстройки от больших переходных значений $I_{нб}$ в связи с невозможностью иметь большие $k_{торм}$. В этих случаях применительно к защитам линий такое торможение сочетается, например, со сравнением не мгновенных значений токов, а их фаз.

Существовали предложения о выполнении органов тока с торможением, которые при внутреннем КЗ торможения не имеют и поэтому как будто могут иметь очень большие торможения при внешних КЗ. Однако, как показали исследования (см., например, [10]), это не так и принципиально они выигрыша в чувствительности не дают.

Необходимо отметить, что принцип торможения, первоначально использовавшийся только в дифференциальных защитах, в последние годы получил применение и в других областях. Так, например, с его помощью повышают чувствительность ПО тока обратной последовательности в блокировках при качаниях, автоматически загрубляя их при токах качаний, обусловливающих повышенные токи небаланса в фильтрах тока, загрубляют по току в тех же режимах органы направления мощности обратной последовательности продольных направленных защит линий и т. п.

8.5. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ С ПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ

Схемы с циркулирующими токами в рассмотренном выше исполнении могут применяться только для линий малой длины, при TA с $I_{2ном}=5$ А не превосходящей несколько сотен метров (например, линий собственных нужд станции). При бóльших длинах и обеспечении допустимой нагрузки на TA, определяемой сопротивлением плеч, сечение вспомогательных проводов оказывается недопустимо большим. Возникают также затруднения с выбором места включения ОТ, действием их на выключатели, с обеспечением чувствительности, надежности каналов связи и др. В СССР, как и за рубежом, были разработаны защиты, в которых применяются мероприятия по преодолению этих затруднений. Ниже в качестве примера рассматривается выполнение защиты, часто используемое на практике. Необходимо при этом отметить, что это выполнение, как и другие существующие, обладает некоторыми недостатками. В связи с этим отечественными организациями — РПИ (Л. А. Орехов и др.). ЧГУ (В. А. Борисов и др.), ЭСП — ведутся работы по созданию более совершенных выполнений рассматриваемых защит.

Принципы выполнения существующей защиты с электромеханическим реле (рис. 8.10). Для сокращения числа жил вспомогательных проводов (до двух), обеспечения большей чувствительности при несимметричных КЗ, упрощения защиты в целом она выполняется (рис. 8.10, $а$) односистемной, включаемой через комбинированные фильтры тока ZA' и ZA''. Лучшими считаются фильтры $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$; в связи с дифференциальным выполнением защиты эти фильтры не имеют недостатков, делающих их мало пригодными для токовых защит. Коэффициент k не может, очевидно, выбираться равным единице, так как в случае, например, $K_{BC}^{(2)}$ в защищаемой зоне и в маркировке фильтра на фазу A как особую ток на его выходе равнялся бы

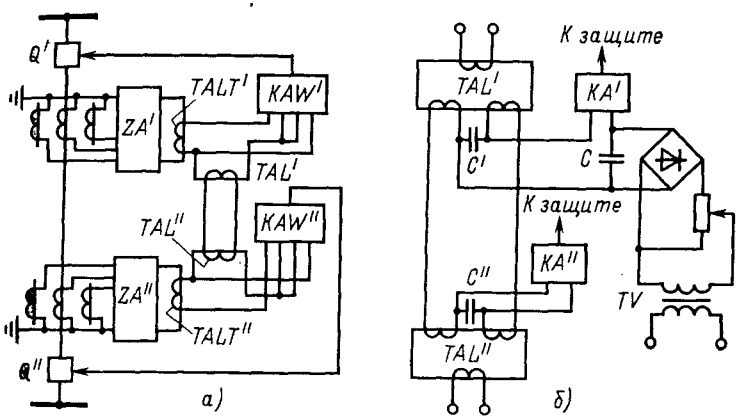


Рис. 8.10. Структурная схема продольной дифференциальной токовой защиты линий ($а$) и упрощенная схема контроля исправности вспомогательных проводов ($б$)

нулю ($\underline{I}_{1A}-\underline{I}_{2A}$). Коэффициент k выбирается таким образом, чтобы при несимметричных КЗ в защищаемой зоне соблюдалось соотношение $kI_2>I_1$. При этом обеспечивается преобладающее значение токов I_2, которые всегда имеют примерно одинаковые с обеих сторон участка фазы. Коэффициент k желательно выбирать достаточно большим (как правило, положительным). Однако его максимальное значение ограничивается прежде всего значительными погрешностями фильтров при больших токах $I_к^{(3)}$, обусловливающими появление недопустимых токов небаланса. Практически для применяемых конструкций фильтров значение k ограничивают 8—10. В сетях с изолированной нейтралью ($U_{ном}\leqslant 35$ кВ), имеющих двухфазное исполнение защит, фильтры целесообразно включать по предложе-

нию Н. И. Овчаренко (МЭИ) на токи двух фаз (A и C) и ток в обратном проводе.

Предусматриваются два дифференциальных реле тока с торможением KAW' и KAW'' (рабочие обмотки которых включаются параллельно друг другу) — по одному на каждой подстанции. Через выходные промежуточные реле они действуют на отключение соответственно выключателей Q' и Q''.

Для уменьшения нагрузки на TA и возможности выбора вспомогательных проводов малого сечения токи, циркулирующие по последним, снижаются промежуточными TAL: при снижении токов в n раз нагрузка от вспомогательных проводов уменьшается в n^2 раз. В защите эту функцию выполняют изолирующие TAL' и TAL'', а также дополнительно $TALT'$ и $TALT''$. Необходимо, однако, отметить, что указанная трансформация во столько же раз увеличивает приведенную емкость между жилами, которая, шунтируя рабочие обмотки реле, может неблагоприятно сказываться на работе защиты.

Промежуточные трансформаторы $TALT$ выполняются насыщающимися. Это не только обеспечивает дальнейшее снижение нагрузки на TA, но при глубоком насыщении $TALT$ превращает защиту в сравнивающую не мгновенные токи, а их фазы.

В качестве вспомогательных проводов обычно применяются жилы бронированного кабеля, иногда кордельного кабеля, используемого одновременно для других системных нужд. Кабели во многих случаях прокладываются вдоль трассы линии. Поэтому при КЗ на землю в сети во вспомогательных проводах наводятся ЭДС влияния $E_{вл} = k_э \omega M l I$, где $k_э < 1$ — коэффициент, учитывающий экранирующее действие оболочки кабеля; ωM — удельное сопротивление взаимоиндукции между кабелем и линией; l — длина участка сближения; $I = 3I_0$ — влияющий ток.

Электродвижущие силы $E_{вл}$ в обоих проводах примерно равны, токов в защите не обусловливают и могут быть опасны только для обслуживающего персонала, а также для изоляции кабеля и защитной аппаратуры. Поэтому TAL используются и для гальванического разделения цепей ИО и вспомогательных проводов. Необходимо, однако, отметить, что замыкание вспомогательного провода на землю может приводить к излишнему срабатыванию защиты [1]. В связи с изложенным заслуживает внимания применение оптико-волоконных кабелей (см. гл. 1), имеющих хорошую помехозащищенность.

Повреждение вспомогательных проводов может приводить к отказам или излишним срабатываниям защиты. Поэтому она снабжается специальным контролем исправности вспомогательных проводов. К устройству контроля, автоматически выводящему защиту без выдержки времени, предъявляются очень жесткие требования по быстродействию. При работе устройства на сигнал приходится выбирать $I_{с.з} > I_{раб}$, что загрубляет защиту. Устройства контроля чаще всего выполняются по схемам, использующим наложение постоянного тока от постороннего источника тока. Впервые они были предложены на ХЭМЗ И. А. Кравцовым в 30-е годы. В дальнейшем был разработан ряд их модификаций в СРЗиУ ТЭП и Мосэнерго. Способ основывается на том, что накладываемый постоянный ток не может обусловить срабатывание защиты, работающей на переменном токе.

На рис. 8.10, *б* приведена упрощенная схема устройства контроля. Схема выполнена с циркуляцией постоянного тока по вспомогательным проводам при их исправном состоянии. Вторичные обмотки TAL выполняются в виде двух секций, соединенных разделительным конденсатором C' (C''), представляющим собой бесконечно большое сопротивление для постоянного и малое для переменного тока. К зажимам конденсатора C присоединяется источник выпрямленного тока, получающий питание от измерительного TV. Минимальные быстродействующие реле тока контроля KA' и KA'' включаются последовательно в цепь циркуляции тока соответственно со стороны источника питания и приемной стороны. Замыкающие контакты этих реле контролируют цепи выходных реле защиты.

При обрыве вспомогательных проводов реле контроля KA срабатывают, выводят защиту из работы и действуют на сигнал.

При замыкании между вспомогательными проводами срабатывает только реле контроля с приемной стороны KA''. Для предотвращения выведения защиты из работы при КЗ на защищаемой линии, когда напряжение питания устройства контроля может снижаться до нуля, предусматривается подпитка в течение 1—3 с реле KA от конденсатора C.

Устройство контроля должно при обрывах вспомогательных проводов срабатывать быстрее защиты. Этому

препятствуют переходные процессы в цепи контроля, определяемые емкостями конденсаторов. Поэтому реальная схема выполнения устройства с учетом отстройки от них оказывается значительно более сложной. Однако и при этом защита с контролем, действующим на выведение ее из работы, оказывается не очень быстродействующей.

Дополнительно в устройстве контроля предусматриваются приспособления для периодических измерений сопротивления изоляции вспомогательных проводов относительно земли и тока контроля, а также заземляющий дроссель, ограничивающий напряжение на вспомогательных проводах относительно земли при появлении больших потенциалов на заземляющем контуре электроустановки.

Изложенные принципы осуществления продольной дифференциальной защиты и контроля исправности вспомогательных проводов приняты в выпускаемой промышленностью защите типа ДЗЛ.

В схемах с двумя комплектами реле возникают условия для появления дополнительной слагающей $I_{нб,д}$, обусловленной сопротивлением соединительных проводов $Z_{пр}$; в пределе при $Z_{пр}\to\infty$ $I_{нб,д}=I_{раб}$. Практически при небольшой длине линий, принятии мер к уменьшению приведенного сопротивления $Z_{пр}$ $I_{нб,д}$ невелики и обычно способы отстройки от $I_{нб}$ достаточны и для рассматриваемого явления. Для линий относительно большой длины влияние параметров соединительных проводов рассматривалось за рубежом (Гамильтоном) и в Советском Союзе (В. Л. Фабрикантом, Л. А. Ореховым и Я. С. Гельфандом).

Основные отрицательные показатели рассмотренной схемы, как и других ей подобных, определяются вспомогательными проводами (см. гл. 1): нарушение их исправности, что не исключено, может приводить к длительному выходу защиты из работы и отказам функционирования (при несовершенстве устройства контроля); стоимость осуществления защиты, в основном определяемая затратами на провода и их прокладку, растет примерно пропорционально длине участка и может быть большой; быстродействие защиты при используемых способах контроля исправности проводов является сильно ограниченным. Необходимо также отметить затруднительность применения существующих схем защиты для многоконцевых линий (например, линий с ответвлениями).

С учетом изложенного области применения защиты, в особенности при существующих устаревших способах ее

выполнения, являются весьма ограниченными. Ее иногда применяют для линий длиной до нескольких километров при нецелесообразности или невозможности использования других, более эффективных защит.

8.6. ПРОДОЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ С ВЧ КАНАЛАМИ И РАДИОКАНАЛАМИ

В общем случае для защит, в которых информация о сравниваемых токах двух сторон участка передается по ВЧ или радиоканалу (см. гл. 1), можно, как и для направленных защит, (см. гл. 7) рассматривать использование блокирующих сигналов (БС) и разрешающих сигналов (РС), выполняемых нормально присутствующими (НП) и нормально отсутствующими (НО) токами в канале. Однако для дифференциальных токовых защит в отличие от направленных количество возможных вариантов значительно возрастает за счет необходимости манипуляции (управления) ВЧ и радиосигналами токами промышленной частоты, а также возможности производить эти манипуляции в один и тот же или разные полупериоды указанных токов. Выполненные в РПИ работы [напрмер, Гэ-Яо-Цзун (КНР] намечали наиболее целесообразные для применений варианты, причем они оказались разными при ВЧ и радиоканалах.

Пока широкое применение имеют только защиты с ВЧ каналами. Для них, как и для направленных защит, целесообразно использование БС с НО токами ВЧ. Такое выполнение не требует передачи сигналов через место повреждения на защищаемом участке; они используются только на неповрежденных участках для блокирования действия защит последних.

Возможно сравнение модулей и фаз или только фаз токов. Обычно применяется последнее как упрощающее ВЧ часть защиты (требуется один, а не два сигнала) и обеспечивающее отстройку от переходных режимов внешних КЗ, когда *ТА* могут работать с большими токовыми погрешностями. Защиты выполняются односистемными, осуществляющими сравнение токов, получаемых через комбинированные фильтры, обычно $\dot{I}_1+k\dot{I}_2$, а не пофазное сравнение токов; это не только упрощает защиту и канал, но и обеспечивает ее бо́льшую чувствительность к несимметричным КЗ.

Необходимо, однако, отметить, что и сравнение фаз токов I_1+kI_2 имеет некоторые недостатки:

защита может отказать в действии на линии с большой нагрузкой при обрыве фазы с односторонним КЗ на землю [2] (с этой точки зрения было бы предпочтительней сравнивать не фазы, а модули и фазы токов), как подчеркивалось, например, Хо-Дя-Ли (КНР);

возможны значительные фазовые погрешности фильтров при больших k, которые иногда хотелось бы принимать для обеспечения $kI_2 \gg I_1$.

Защиты должны иметь ПО, отстраиваемые от токов рабочих режимов линий, как и направленная защита с ВЧ блокировкой, использующая фазные величины (см. гл. 7).

Первые данные о дифференциальных токовых защитах с ВЧ блокировкой относятся к концу 20-х годов. Однако только в конце 40-х — начале 50-х годов были проведены успешные работы во ВНИИЭ и ЦЛЭМ Мосэнерго по созданию более совершенных вариантов этой защиты. В результате ВНИИЭ (Е. Д. Сапир и др.) была создана отечественная *дифференциально-фазная защита*, значительно лучшая, чем зарубежные.

Необходимо, однако, отметить, как это обосновывалось в гл. 7, что в последнее время вновь стали отдавать предпочтение продольным направленным защитам, косвенно сравнивающим электрические величины по концам защищаемого участка. Поэтому ниже кратко рассматриваются только некоторые особенности дифференциально-фазных токовых защит с ВЧ блокировкой.

8.7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ВЧ БЛОКИРОВКОЙ, РАЗРАБОТАННАЯ ВНИИЭ

Принцип действия и выполнение. Отечественной промышленностью выпускались несколько вариантов рассматриваемой защиты, предназначенной для работы в сетях от 110 до 500 кВ включительно. Принципы работы этих вариантов защиты одинаковы. Ниже рассматривается работа защиты на примере более простого выполнения ее для сетей 110—220 кВ. Структурная схема защиты, принятая в методических работах МЭИ (Э. И. Басс, Н. И. Овчаренко), дана на рис. 8.11. Измерительная часть схемы включает ПО, орган управления передатчиком и орган сравнения фаз токов $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$ по концам защищаемой линии *БВ*

(рис. 8.12), для которых приняты условные положительные направления внутрь защищаемой зоны.

Как и в продольных направленных защитах (см. гл. 7), более чувствительные элементы основных ПО пускают ВЧ приемопередатчики, которые посылают и принимают ВЧ сигналы, менее чувствительные подготавливают цепи отключения. Для обеспечения надежного блокирования защиты при внешнем КЗ передатчики пускаются до начала сравнения фаз, а останавливаются с некоторой задержкой после отключения повреждения. При этом предусматрива-

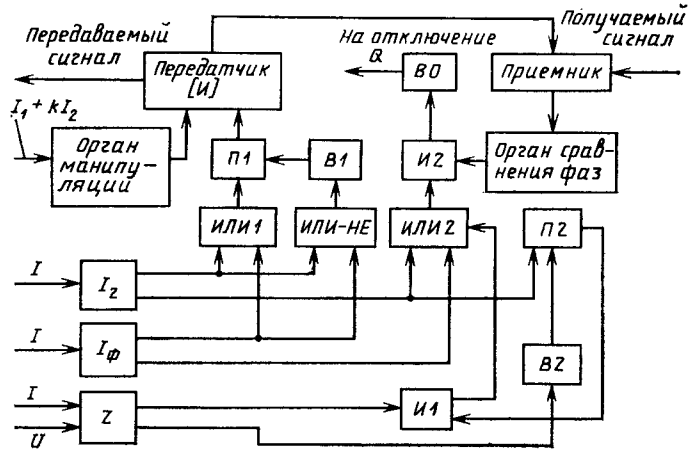


Рис. 8.11. Структурная схема дифференциально-фазной ВЧ защиты типа ДФЗ

ется немедленная остановка передатчика при внутреннем КЗ и отключении выключателя сначала только с одной из сторон линии (для предотвращения блокирования полукомплекта защиты противоположной стороны линии на некоторое время, определяемое указанным замедлением остановки передатчиков). Это мероприятие сокращает время ликвидации КЗ при каскадном действии защиты. Указанные операции осуществляются логической частью защиты.

С помощью органа управления передатчиком (органа манипуляции), обеспечивающего работу передатчика в течение каждого положительного полупериода промышленной частоты, производится передача фазы манипулирующего тока $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$ со стороны данного полукомплекта. При-

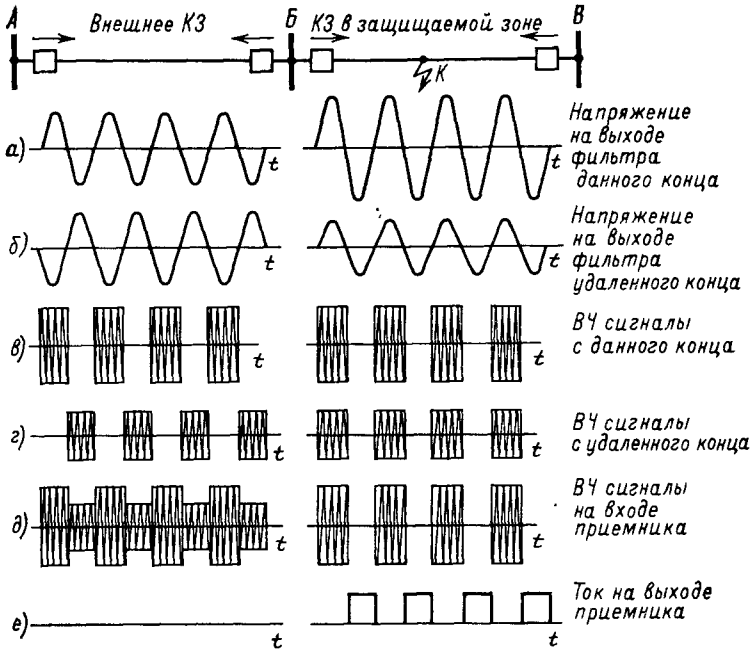


Рис. 8.12. Действие защиты по рис. 8.11 при внешних КЗ и КЗ в защищаемой зоне

емники принимают ВЧ сигналы как своего передатчика, так и другой стороны и выполнены так, что выдают токи в органы сравнения фаз только при отсутствии принимаемых сигналов. Манипулирующие токи сфазированы таким образом, что передатчики при внешних КЗ работают в разные полупериоды, создавая в совокупности в приемниках непрерывные ВЧ сигналы и тем самым обеспечивая несрабатывание защиты. При внутренних КЗ принимаемые приемниками ВЧ сигналы имеют скважности, за счет которых обеспечивается срабатывание защиты. Так осуществляется сравнение фаз токов $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$ по концам линии.

Работа защиты, выполненной указанным образом, иллюстрируется обычно приводимыми условными диаграммами, данными на рис. 8.12, *а — е* для внешнего и внутреннего КЗ со сдвигом фаз сравниваемых токов на 180° в первом случае и при отсутствии такового во втором.

Практически токи двух сторон линии при внутреннем КЗ часто сдвинуты на значительный угол, определяемый сдвигом фаз ЭДС частей системы, неодинаковыми углами сопротивлений этих частей, погрешностями *ТА* и комбинированных фильтров, создающих ток, пропорциональный $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$, а также свойствами фильтров. Поэтому желательно увеличение угла между этими токами, при котором защита могла бы срабатывать. Его предельное значение, однако, ограничивается условиями предотвращения излишних срабатываний защиты за счет разницы в угловых погрешностях тех же *ТА*, фильтров, конечной скорости распространения электромагнитных волн (см. гл. 1) и сдвига фаз первичных токов, определяемого емкостной проводимостью защищаемого участка. Зона блокирования защиты обычно составляет 40—50°, и, следовательно, допустимый сдвиг по фазе сравниваемых токов $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$ при внутренних КЗ меньше 140—130°, что обычно приемлемо. При одностороннем питании места КЗ, когда ПО с приемной стороны не срабатывают, БС нет и защита может срабатывать. Однако при обычно используемых ПО последние иногда могут сработать с приемной стороны, например от бросков тока двигателей потребителей, от тока несимметрии, и запустить свой передатчик, который будет посылать сплошные БС. Для предотвращения затягивания отключения КЗ в таких случаях приходится принимать специальные меры.

Некоторые особенности выполнения пусковых органов. Защита выполняется для действия при всех видах КЗ в сетях с глухозаземленными нейтралями, в том числе и при $K^{(3)}$. Однако основные ПО защиты включаются на составляющие токов обратной последовательности $\underline{I}_2$ или сумму абсолютных значений $|\underline{I}_2|+k'|\underline{I}_0|$. Для повышения их чувствительности иногда используются также компенсированные напряжения обратной последовательности; тогда органы включаются на $|\underline{U}_2-\underline{Z}_{2к}\underline{I}_2|+k''|\underline{I}_0|$, где $\underline{Z}_{2к}$ — сопротивление компенсации, соответствующее части защищаемого участка. Действие при $K^{(3)}$ обеспечивается за счет хотя бы кратковременно появляющейся в начальный момент несимметрии; при этом кратковременное срабатывание указанных органов фиксируется при $K^{(3)}$ дополнительным ПО сопротивления, включаемым, как это принято в дистанционных защитах, на $\underline{U}_{м,ф}$ и соответствующее ему $\underline{I}_{мф}$. В защите предусматриваются также дополнительные органы

ОТ, включаемые на фазные токи $I_ф$, отстраиваемые от $I_{раб\,max}$ линии.

Более чувствительный ОТ обеспечивает пуск ВЧ передатчика и поэтому позволяет облегчить выполнение фильтров I_2 ПО, поскольку не требуется ограничение их небалансов при внешних $K^{(3)}$ и качаниях с токами, превышающими $I_{раб\,max}$. Более грубый ОТ позволяет обеспечить срабатывание защиты при $K^{(3)}$ без предварительной несимметрии, когда фильтровый ПО может отказать.

Логическая часть. Особенности логической части защиты определяются рассмотренными принципами ее действия и выполнения. Она осуществляет логические операции ИЛИ, И, ИЛИ—НЕ, ВРЕМЯ, ПАМЯТЬ (см. рис. 8.11). Пуск передатчика и подготовка цепей отключения от ПО происходит через логические элементы *ИЛИ1* и *ИЛИ2*. Посылка передатчиком ВЧ импульсов имеет место при наличии сигнала от ПО и напряжения от органов манипуляции через логический элемент *И*, который выполнен в собственно передатчике. Передатчик должен запускаться даже при кратковременном срабатывании основных ПО; это обеспечивается элементом временной памяти *П1*. Остановка передатчика с некоторой задержкой осуществляется элементом времени *В1*, запускаемым чувствительными элементами *ПО* I_2 и $I_ф$ при их возврате, т. е. через элемент *ИЛИ — НЕ*. Работа защиты на отключение происходит при срабатывании более грубых элементов ПО и появлении сигнала на выходе органа сравнения фаз, что обеспечивается элементом *И2*. Подготовка цепей отключения указанными ПО осуществляется с помощью логического элемента *ИЛИ2*; при этом подготовка этих цепей от органа сопротивления возможна при хотя бы кратковременном срабатывании более чувствительного элемента основного ПО I_2 через элемент временной памяти *П2*, что обеспечивается элементом *И1*. Память *П2* снимается элементом времени *В2*, пускаемым органом сопротивления.

Учет поперечной емкостной проводимости защищаемой линии. При рассмотрении дифференциальных токовых защит выше предполагалось, что от влияния поперечной емкостной проводимости защита может отстраиваться соответствующим выбором ее параметров срабатывания. Однако для длинных линий сверх- и ультравысокого напряжения, имеющих значительные емкостные проводимости, такое решение вопроса, как показали исследования ЭСП (В. М. Ермоленко, С. Я. Петров) и ВНИИЭ (Е. Д. Сапир), оказывается неприемлемым. Емкостные проводимости обусловливают емкостные слагающие токов, наличие которых приводит к неравенству токов в полукомплектах защит в случаях внешних КЗ и рабочих режимов. Это неравенство может даже определять направление токов с двух сторон внутрь неповрежденной линии, как при внутреннем КЗ (в случае повреждения на одной из параллельных цепей или на обходной связи). В результате при внешних КЗ возникает возможность излишнего срабатывания защиты при выполнении ее с требуемой чувствительностью.

Для обеспечения правильного действия защиты при внешних КЗ применяется искусственное выравнивание вторичных сравниваемых токов в полукомплектах защиты компенсацией емкостного тока. Условие выравнивания токов записывается в виде $\underline{I}_I+\underline{I}_{Iк}=\underline{I}_{II}+\underline{I}_{IIк}$, где $\underline{I}_{Iк}$ и $\underline{I}_{IIк}$ — комплексы токов компенсации соответственно на сторонах с токами $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$, определяемыми $\underline{I}_1+k\underline{I}_2$. Учитывая, что для четырехполюсника, которым может быть заменена защищаемая линия, $\underline{U}_I=\underline{A}\underline{U}_{II}+\underline{B}\underline{I}_{II}$ и $\underline{I}_I=\underline{C}\underline{U}_{II}+\underline{D}\underline{I}_{II}$; $\underline{A}\underline{D}-\underline{B}\underline{C}=1$, получаем следующую связь между токами компенсации: $\underline{I}_{Iк}-\underline{I}_{IIк}=(1-\underline{D})\underline{U}_I/\underline{B}-(\underline{A}-1)\underline{U}_{II}/\underline{B}$. Приведенное соотношение может иметь множество реализаций. Конкретные решения принимаются с учетом сложности выполнения и того, что компенсация может снижать результирующую чувствительность защиты. Так, например, простое решение получается при питании компенсирующих устройств только от *TV* в месте включения полукомплектов защиты. В этом случае токи компенсации определяются выражениями $\underline{I}_{Iк}=(1-\underline{D})\underline{U}_I/\underline{B}$ и $\underline{I}_{IIк}=(\underline{A}-1)\underline{U}_{II}/\underline{B}$. Однако такое выполнение компенсации может быть не лучшим с точки зрения чувствительности защиты.

Общая оценка защиты. Как указывалось выше, разработанные в Советском Союзе (ВНИИЭ) дифференциально-фазные защиты разных исполнений с общим названием ДФЗ зарекомендовали себя с хорошей стороны. Их недостатками по сравнению с направленными защитами с ВЧ блокировкой являются несколько меньшее быстродействие (определяемое тем, что в момент начала сравнения фаз при внутреннем КЗ ВЧ импульсы с двух сторон могут оказываться временно блокирующими защиту), более высокие требования к ВЧ каналу, меньшая приспособленность для защиты линий, имеющих ответвления. Необходимо также отметить, что при происходящем переходе на новую эле-

ментную базу (интегральную микроэлектронику) потребовалась бы существенная переработка защиты. Поэтому было принято решение перейти на использование направленных защит. Однако они не приспособлены для защиты линий в цикле ОАПВ. В связи с этим в направленных защитах для ответственных линий сверхвысоких напряжений предусматривается их перевод в дифференциально-фазные на время этого цикла [55].

8.8. ПРИМЕНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ И ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ

Поперечные дифференциальные защиты применяются для параллельных цепей с одинаковыми или не очень резко различающимися параметрами, присоединяемых к шинам через отдельные или иногда общие выключатели (см. рис. 8.1, *б* и *в*). Их выполнение основывается на том, что токи в параллельных цепях при нормальной работе и внешних КЗ бывают одинаковыми или не сильно различающимися, а при возникновении КЗ на одной из цепей становятся неодинаковыми. Для цепей с отдельными выключателями могут применяться защиты, сравнивающие абсолютные значения токов цепей (*балансные защиты*) или токи и направления мощностей в цепях. Балансные защиты пригодны для установки только с питающих сторон и в отечественной практике используются редко. Применение находят *поперечные дифференциальные токовые направленные защиты*, которые рассматриваются ниже.

8.9. ПОПЕРЕЧНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

Принцип действия и выполнение. Защита используется для двух параллельных цепей, присоединяемых к шинам через отдельные выключатели. При повреждении на одной из цепей защита должна отключать только ее, оставляя в работе вторую цепь. Это достигается включением комплектов защиты на обеих сторонах цепей и использованием в них двух ОНМ или одного двустороннего действия, включаемых на разность комплексов токов цепей I и II и напряжение на шинах (рис. 8.13, *а*). Вектор напряжения на шинах не зависит от того, на какой цепи происходит КЗ; разность же токов цепей будет опережать вектор напряжения или отставать от него в зависимости от того, на какой цепи возникает КЗ. Поэтому ОНМ, включенные так, чтобы срабатывать, как и у токовых направленных защит, при направлении мощности КЗ в данной цепи от шин в линию, будут выбирать поврежденную цепь и обеспечивать ее отключение.

Упрощенная структурная схема защиты приведена на рис. 8.13, *б*. Защита требует использования отдельных ПО для обеспечения прежде всего отстройки ее от токов небаланса $I_{нб}$ дифференциально включенных *ТА* при внешних КЗ, когда чувствительные ОНМ могут срабатывать под воздействием остаточных напряжений и $I_{нб}$, имеющих произвольную фазу. Дополнительным назначением ПО может явиться необходимость предотвращения неправильного срабатывания защиты при отключении в рабочих режимах выключателя одной из цепей с противоположной стороны линии.

Предусматривается выведение защиты из действия при отключении выключателя любой из защищаемых линий, осуществляемое разрывом цепи оперативного тока контактом его реле положения «включено» *KQC* (например, по варианту, указанному на рис. 8.13, *б*). Указанное требует-

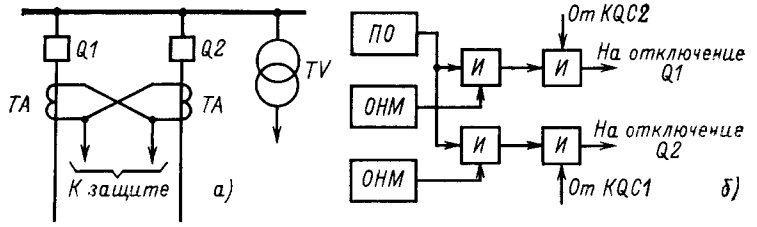


Рис. 8.13. Структурная схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных цепей

ся по двум причинам. Во-первых, защиты стороны могут работать каскадно при расположении места КЗ ближе к одной из сторон линии, так как в этом случае необходимая для срабатывания ПО разность токов цепей вначале может быть только с одной стороны. После отключения одного выключателя поврежденной цепи ток и мощность КЗ в ней оказываются равными нулю. Поэтому тот же комплект защиты переориентируется на отключение неповрежденной цепи. Очевидно, что в этом случае оперативный ток с указанного комплекта должен сниматься автоматически. Во-

вторых, после отключения одной из цепей с одной или обеих сторон защита может срабатывать излишне при внешних КЗ. Следует отметить, что в последнем случае оперативный ток со стороны, где оба выключателя остаются включенными, должен сниматься, например от руки накладками.

Особенности выполнения ПО. В простейшем случае (например, для защит линий напряжением $U_{ном} \leqslant 35$ кВ) ПО выполняются токовыми. Ток срабатывания защиты выбирается в этом случае по двум условиям: 1) как и для всякой дифференциальной токовой защиты, $I_{с,з} \geqslant k_{отс} I_{нб\ max\ расч}$; 2) комплект защиты данного конца не должен срабатывать при отключении одной из цепей с другого конца, так как мощность на данном конце может быть направлена от шин в линию, поэтому $I_{с,з} \geqslant k_{отс} I_{раб\ max}/k_{в}$. Ток $I_{с,з}$ выбирается по большему из полученных значений с учетом того, что $I_{нб\ max\ расч}$ может быть больше, чем в продольных защитах, за счет неравенства сопротивлений параллельных цепей.

Выполнение ПО защит сетей с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ, работающих с глухозаземленными нейтралями, обычно осуществляется по-другому. Учитывается, что $I_{с,з}$ должен в этом случае отстраиваться дополнительно от токов неповрежденных фаз при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, которые могли бы приводить к неправильному срабатыванию защиты в режиме каскадного отключения повреждения [1]. Эта отстройка может приводить к ее недопустимому загрублению. Поэтому рассматриваемые защиты, как и токовые направленные (см. гл. 5), включенные на полные токи фаз, при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ автоматически выводятся из действия. Для работы же используется специальный комплект нулевой последовательности. В целях повышения чувствительности последнего по току в СРЗиУ ТЭП Т. В. Смирновой было предложено осуществлять комбинированный пуск от разности токов $3I_0$ и напряжения $3U_0$ (которое не появляется при междуфазных КЗ) по схеме И, действующей на запрет работы междуфазного комплекта. Для повышения чувствительности последнего вводится дополнительный пуск от органов напряжения (ОН), включаемых с ОТ по схеме И; при этом ток срабатывания ОТ не должен отстраиваться от $I_{раб\ max}$, так как при одностороннем отключении цепи ОН не срабатывает.

Проверка чувствительности. Чувствительность защиты оценивается коэффициентами чувствительности пускового органа, зоной каскадного действия и мертвой зоной ОНМ междуфазного комплекта. Коэффициенты чувствительности $k_{ч}$ определяются для двух режимов: при включенных выключателях с обеих сторон цепей и в режиме каскадного отключения, когда выключатель с противоположной стороны поврежденной цепи уже отключен. В первом случае достаточно обеспечить необходимый $k'_{ч}$ при КЗ в точке $K_{р,ч}$, где чувствительности защит обеих сторон линии одинаковы (предложено в ЭСП Т. Н. Дородновой и Э. П. Смирновым). При этом учитывается, что при КЗ в других местах цепей чувствительность одной из защит будет увеличиваться. Нетрудно показать, что положение точки $K_{р,ч}$, характеризуемое расстоянием $l_{р,ч}$ от шин, например, подстанции $Б$ (рис. 8.14, $а$), определяется как $l_{р,чБ} = [I_{с,зА}/(I_{с,зА} + I_{с,зБ})]l$.

В частном, но распространенном случае, когда токи срабатывания защит равны ($I_{сз,А} = I_{с,зБ}$), $l_{р,ч} = 0{,}5l$, т. е. $K_{р,ч}$ лежит посредине цепи.

Коэффициент чувствительности в точке $K_{р,ч}$ равен $k'_{ч} = I_{зА}/I_{с,зА} = I_{зБ}/I_{с,зБ}$. Считается необходимым иметь $k'_{ч} \geqslant 2$. Во втором случае $k''_{ч}$ определяется при КЗ на противоположном конце цепи с отключением у этого места ее выключателя.

Зона каскадного действия определяется из тех же со-

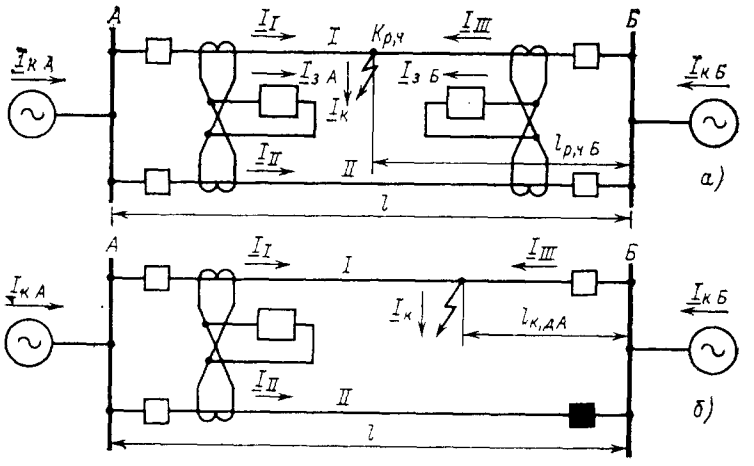


Рис. 8.14. Определение чувствительности ($а$) и зоны каскадного действия ($б$) защиты по рис. 8.13

отношений с заменой $l_{р.ч}$ на $l_{к,д}$ (рис. 14, *б*) и, например, для защиты *А* равна $l_{к,дА} = I_{с.зА}/I_к$; в первом приближении ток $I_к$ определяется при КЗ у шин *Б*. Аналогично может быть вычислена зона $l_{к,дБ}$. В целом каскадно ликвидируются КЗ на длине $l_{к,д} = l_{к,дА} + l_{к,дБ}$. Если $l_{к,д} \geqslant l$, то в средней части линии появляется зона, при КЗ в которой ни одна из защит не срабатывает. Наличие ее недопустимо; поэтому необходимо иметь $l_{к,д} < l$. С учетом возможного $R_п$ часто считают необходимым иметь $l_{к,д} < 0{,}5l$. Необходимо отметить, что при $k'_ч \geqslant 2$ условие $l_{к,д} < 0{,}5l$ практически всегда выполняется.

Мертвая зона определяется ОНМ при включении его на полные напряжения и токи фаз. При 90°-ной схеме включения она может быть только при $K^{(3)}$ (см. гл. 5).

Возможные случаи неправильного срабатывания защиты. Были выявлены два возможных случая неправильных срабатываний защиты. При обрыве с односторонним КЗ на землю на цепи I (рис. 8.15, *а*) защита, включенная на полные токи и напряжения фаз, излишне срабатывает, отключая неповрежденную цепь II, так как мощность КЗ направлена в ней от шин, а в поврежденной цепи ток равен нулю. Для защиты, включаемой на составляющие нулевой последовательности, соотношения получаются более сложными, но могут приводить к тем же последствиям. А. М. Раковичем, В. А. Андреевым и В. М. Ермоленко вносились предложения по устранению этого органического недостатка. Так, например, А. М. Ракович предлагал фиксировать правильное срабатывание ОНМ в момент обрыва, до возникновения КЗ; фиксация осуществляется ОТ с достаточно малым $I_{с.р}$, включаемым на ток $3I_0$ дифференциальной цепи; при обрыве орган срабатывает под воздействием появляющейся нулевой последовательности в токе. При последующем одностороннем КЗ защита вне зависимости от действия ОНМ отключает только поврежденную цепь. Предложенные способы широкого распространения не получили в связи с повышением качества монтажа и эксплуатации линий, а также использованием защит только для менее ответственных линий.

В сетях с напряжением $U_{ном} \leqslant 35$ кВ неправильное срабатывание защиты, как было показано в 30-е годы СРЗиУ ТЭП (см., например, [1]), может произойти при некоторых видах $k^{(,1)}_{дв}$ (рис. 8.15, *б*). Если одно из мест повреждения расположено на фазе с *ТА* (например, *А*) в зоне каскадного действия защиты, а другое — соответственно

на фазе *С* линии, отходящей от шин подстанции, то сначала отключится выключатель поврежденной параллельной цепи; далее защита неправильно отключит выключатель неповрежденной цепи, так как сработают ОТ и ОНМ фазы *С*.

Общая оценка защиты. С учетом перечисленных недостатков защиты и появления поперечных направленных защит с косвенным сравнением величин (см. гл. 7), включаемых на составляющие U_0 и I_0 и практически не имеющих неправильных срабатываний при обрывах с односторонним КЗ на землю, рассматриваемая защита с годами имеет все меньшее применение и используется в основном только в менее ответственных сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ.

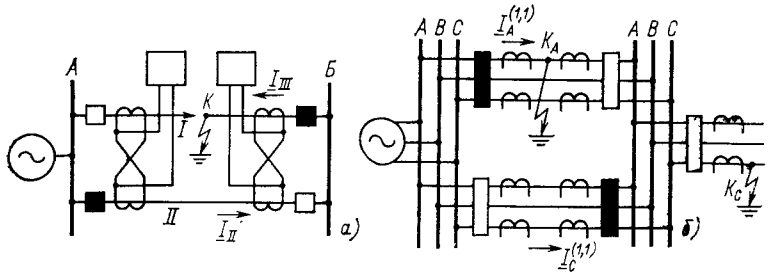


Рис. 8.15. Случаи неправильного действия защиты по рис. 8.13

8.10. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ДЛЯ ЛИНИЙ

Из изложенного следует, что дифференциальный принцип применительно к защите линий постепенно находит и, вероятно, будет находить все меньшую область использования.

Этот принцип целесообразно применять в основном для защит от КЗ генераторов, трансформаторов (автотрансформаторов), шин станций и подстанций, крупных двигателей, где другие известные принципы выполнения защит конкурировать с ним в ряде случаев не могут.

Вопросы для самопроверки

1. Какие защиты называются дифференциальными токовыми и токовыми направленными? Приведите примеры выполнения защиты отдельных элементов.

2. Какие электрические величины могут сравниваться в продольных дифференциальных токовых защитах и какие в поперечных?

3. Каковы причины возникновения тока небаланса в продольной дифференциальной защите с проводными каналами?

4. Какие применяются способы повышения чувствительности и отстроенности продольной защиты с проводными каналами?

5. В чем сущность способа загрубления защиты при внешних КЗ, основанного на включении ОТ через промежуточные насыщающиеся трансформаторы тока (*ТАЛТ*)?

6. Объясните сущность способа магнитного торможения в ОТ.

7. Объясните способ выполнения устройства контроля исправности вспомогательных проводов продольных дифференциальных токовых защит с проводными каналами.

8. Поясните принцип действия дифференциально-фазной токовой защиты с ВЧ блокировкой.

9. Каким приблизительно принимается допустимый сдвиг по фазе сравниваемых токов (например, $\dot{I}_1+k\dot{I}_2$) при внутренних КЗ и какие факторы влияют на значение угла блокировки ДФЗ?

10. Объясните принцип выполнения поперечных дифференциальных токовых и токовых направленных защит.

Глава девятая

ЗАЩИТА ЛИНИЙ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

9.1. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Рассмотрение соотношений электрических величин при $K_з^{(1)}$ (см. § 1.6) показывает, что этот вид повреждений в отличие от КЗ характеризуется следующими особенностями: треугольник междуфазных напряжений остается неизменным и поэтому работа потребителей непосредственно не нарушается; токи, проходящие через место пробоя на землю, при правильном выполнении режима заземления нейтралей не превосходят 20—30 А, а для сетей с повышенными требованиями к безопасности обслуживания — 5 А; на неповрежденных фазах даже в установившемся режиме

напряжения могут повышаться в $\sqrt{3}$ раз, а в переходных режимах, например при перемежающейся дуге, оказываются еще бо́льшими, что может приводить к возникновению тяжелых $K_{дв}^{(1,1)}$; возможны кратковременные, самоустраняющиеся $K_з^{(1)}$. Защита может выполняться селективной (токовая защита) или неселективной (максимальная защита напряжения нулевой последовательности).

С учетом изложенного формируются требования к токовым защитам линий, реагирующим на рассматриваемый специфический вид повреждений: 1) в большинстве случаев допускается действие защиты на сигнал; это облегчает и упрощает ее осуществление, а также дает возможность в пределах разрешенного времени (до 2 ч) осуществить более полное выявление поврежденного элемента, перевод потребителя (если это возможно) на другой источник питания и, наконец, отключить поврежденный элемент; 2) защита должна действовать на отключение без выдержки времени в случаях, когда это необходимо по требованиям техники безопасности, например на линиях, питающих торфоразработки, передвижные строительные механизмы и другие аналогичные установки; при этом сокращается вероятность перехода $K_з^{(1)}$ в $K_{дв}^{(1,1)}$, сопровождающееся большими токами КЗ, напряжениями прикосновения и шаговыми напряжениями, могущими быть причиной несчастных случаев; 3) защиты должны удовлетворять требованиям селективности при внешних $K_з^{(1)}$; при этом селективность в случае действия на сигнал понимается в смысле выявления по сработавшим защитам участка или хотя бы направления (например, на цепочке участков), в пределах которого произошло $K_з^{(1)}$; 4) в целях упрощения допускается не устанавливать защиту на элементах, удаленных от источников питания, а также в случаях, когда возникновение $K_з^{(1)}$ маловероятно или выполнение защиты затруднительно (например, на воздушных линиях); 5) защита должна реагировать также на $K_з^{(1)}$ через перемежающуюся дугу и кратковременные, самоликвидирующиеся $K_з^{(1)}$, если возможно и целесообразно выявление их мест возникновения; 6) желательно иметь непрерывность действия защит, возвращенных персоналом в исходное положение, для возможности проверки устойчивого $K_з^{(1)}$ на данном направлении, например после отключения персоналом одного из элементов с предполагаемым повреждением.

Удовлетворить одновременно одним устройством все перечисленные требования бывает трудно. Поэтому на практике иногда применяют устройства, удовлетворяющие им не в полной мере, или используют совокупность устройств.

9.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ

Токи нулевой последовательности промышленной частоты. Возможность использования этих токов определяется тем, что они в симметричной системе отсутствуют в рабочих режимах и появляются только при возникновении повреждений фаз на землю. Поэтому не требуется непосредственная отстройка от $I_{раб}$. Рассмотрение распределения токов при $K_з^{(1)}$ может производиться по заданным ЭДС источников питания (см. § 1.6) или методом наложения с использованием составляющих нулевой последовательности аварийного режима (см. гл. 1).

Первый способ иллюстрируется для радиальной сети с односторонним питанием (рис. 9.1). Защита предполагается включенной с питающей стороны участка $АБ$. Фазы последнего имеют по отношению к земле емкости $C_{0л}$. Вся остальная сеть представлена эквивалентной линией $АВ$ с емкостью фаз по отношению к земле $C_{0Σ}$. При металлическом $K_з^{(1)}$ в точке K_1 на фазе $А$ линии $АБ$ (рис. 9.1, *а*) через место повреждения будет проходить (см. § 1.6) ток $I_{зА}^{(1)} = 3ω(C_{0л}+C_{0Σ})U_ф$, определяемый емкостями неповрежденных фаз $В$ и $С$ всей сети (емкости поврежденной фазы в создании этого тока не участвуют, так как они зашунтированы в месте повреждения, напряжение $U_{фА}=0$). Ток $I_{зА}^{(1)}$ возвращается в сеть через указанные емкости (показано пунктиром). В начале поврежденного участка геометрическая сумма токов трех фаз определяется только емкостями $C_{0Σ}$ неповрежденных участков сети, так как такая же сумма, определяемая $C_{0л}$, равна нулю (§ 1.6). В результате ток в начале участка $3I_{з0}^{(1)} = 3ωC_{0Σ}U_ф$; на этот ток будет реагировать защита. При $K_з^{(1)}$ вне защищаемой зоны в точке K_2 (рис. 9.1, *б*) через начало защищаемого участка $АБ$ с учетом тех же соображений проходит ток $3I_{з0л}^{(1)} = 3ωC_{0л}U_ф$, от которого защита по условию селективности должна отстраиваться. В начальные моменты внешних $K_з^{(1)}$ возникает переходный затухающий режим,

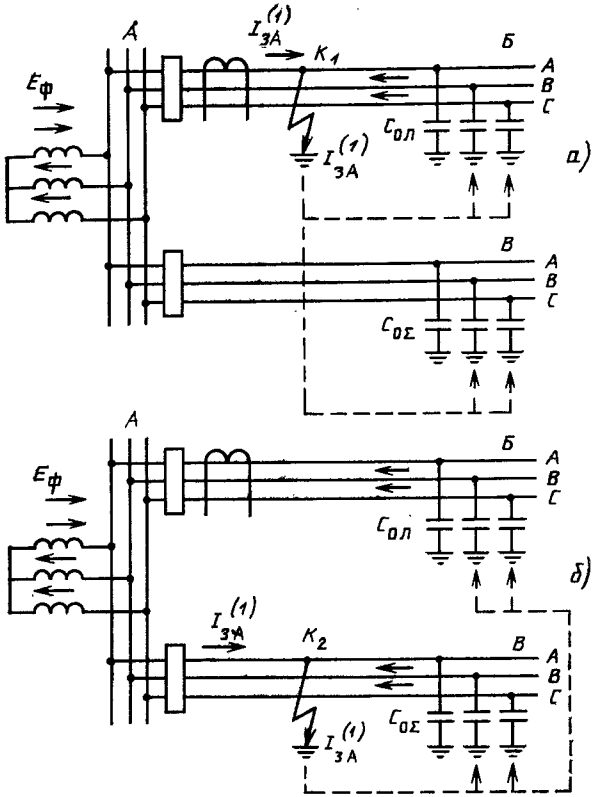


Рис. 9.1. Распределение токов при $K_з^{(1)}$ и заданных ЭДС

в котором действующие значения бросков $3i_{з0л}^{(1)}$ могут в несколько раз превосходить их установившиеся значения $3I_{з0л}^{(1)}$. Отстройка от них возможна, например, выполнением защиты с выдержкой времени.

Применение метода наложения с использованием аварийных составляющих нулевой последовательности для тех же условий работы сети иллюстрируется рис. 9.2; ЭДС источника питания исключается. В месте возникновения $K_з^{(1)}$ включается источник напряжения с ЭДС, равной по значению напряжению нулевой последовательности, которое при металлическом повреждении равно смещению нейтра-

ли системы $\underline{U}_{з0}^{(1)} = \underline{U}_{зн}^{(1)} = -\underline{E}_ф$ (см. § 1.6). В целях сохранения для последнего условного положительного направления по рис. 1.40 (от места повреждения или нейтрали системы к земле) новый источник напряжения принимается условно действующим от земли к точке K повреждения. Распределение токов нулевой последовательности показано пунктиром на рис. 9.2. Результаты получаем те же, что и при первом способе, но более просто и наглядно. Например, для учета $R_п$ в месте пробоя достаточно в схеме замещения по рис. 9.2 включить его последовательно с источником напряжения. Напряжения $\underline{U}_{зн}^{(1)}$ и $\underline{U}_{з0}^{(1)}$ изменятся при этом по значению (уменьшатся) и фазе, однако распределение токов I_0 останется прежним.

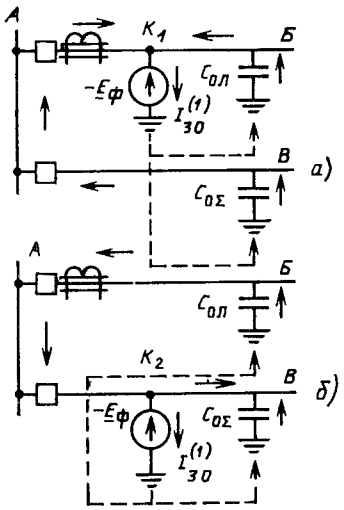


Рис. 9.2. Распределение токов при $K_з^{(1)}$ с использованием метода наложения

Чувствительность токовых защит, реагирующих на установившиеся $I_з^{(1)}$, оценивается $k_ч = 3\omega C_{0\Sigma} U_ф / I_{с.з}$ или иногда коэффициентом полноты замыкания на землю b (см. § 1.6), при котором защита может срабатывать. Рассмотренные выше условия ее действия при внутренних и внешних $K_з^{(1)}$ показывают, что в недостаточно разветвленной сети достичь необходимой чувствительности бывает затруднительно или даже невозможно при наличии всего двух линий с одинаковыми параметрами ($C_{0л} = C_{0\Sigma}$), токи $3I_0$ в начале участков при внутренних и внешних $K_з^{(1)}$ оказываются одинаковыми. Для исключения этого недостатка защиты выполняются направленными. Для улучшения работы защиты иногда создаются дополнительные активные слагающие в токах поврежденных участков с помощью заземления нейтрали системы через резисторы с большим сопротивлением $R_з$. Их влияние на улучшение работы защиты легко выявить включением в схеме замещения на рис. 9.2 дополнительной ветви с сопротивлением $3R_з$ (коэффициент 3 учитывает, что емкости C даны для одной фазы, а не для трех, а $R_з$ является общим для трех фаз). Это мероприятие оказывается полезным и для снижения перенапряжений при $K_з^{(1)}$, как это было отмечено еще в конце 20-х годов Петерсеном (Германия) — автором дугогасящих реакторов. Особенно оно эффективно, по литературным данным, при активном токе, близком к емкостному. Для создания активной слагающей тока в начале 30-х годов СРЗиУ ТЭП предлагалось использовать трансформаторы малой мощности с закорачиванием их вторичных обмоток. По данным ИЭД АН УССР, закорачивая вторичную обмотку TV, соединенную в разомкнутый треугольник (см. гл. 4), можно получать активные слагающие тока замыкания на землю до 2 А в сетях 6 кВ и 3А в сетях 10 кВ.

Как известно и как уже указывалось выше, широкое применение в рассматриваемых сетях (сначала в Германии, а в последующем — в ряде других стран) в отечественной практике, особенно в послевоенные годы, получили дугогасящие реакторы (катушки Петерсена). Используют понятие о резонансно заземленных нейтралях сетей, поскольку реакторы должны иметь резонансную настройку, искусственно создавая добавочный индуктивный ток $I_{зL}^{(1)} \approx I_{зC}^{(1)}$. В последние годы специалистами ставится вопрос о снижении значений емкостных токов $I_{зC}^{(1)}$ примерно до 5 А против упоминавшихся выше 10—30 А, начиная с которых было бы целесообразно осуществлять компенсацию. Реактор включается в цепь заземления нейтрали системы (рис. 9.3).

Получающееся распределение токов I_0 при использовании метода наложения приведено на рис. 9.3. Индуктивность реактора принята утроенной, равной $3L_р$, так же, как и выше для сопротивления $3R_з$. При точно резонансной настройке $[1/(3\omega L_р) = \omega(C_{0л} + C_{0\Sigma})]$ в начале поврежденного участка $I_{з\Sigma л}^{(1)} = 3U_ф[1/(3\omega L_р) - \omega C_{0\Sigma}]$; так как $1/(3\omega L_р) > \omega C_{0\Sigma}$, ток $I_{з\Sigma л}^{(1)}$ оказывается индуктивным, отстающим от $U_ф$ на 90°. По неповрежденной же линии проходит емкостный ток $3I_{0\Sigma}^{(1)}$, определяемый C_0 ее двух фаз, находящихся под напряжением, но направленный к шинам питающей электроустановки и поэтому также отстающий от $U_ф$ на 90°.

В результате и токовые, и направленные защиты нуле-

вой последовательности, реагирующие на слагающие промышленной частоты ω, для сетей с резонансно заземленной нейтралью оказываются неэффективными. Были найдены и осуществлены другие пути решения вопроса защиты от $K_з^{(1)}$, рассматриваемые ниже.

Токи естественных высших гармоник установившегося режима. В фазах сети практически всегда имеются слагающие высших гармоник, обусловленные наличием намагничивающих токов всех силовых трансформаторов сети, нелинейных нагрузок в виде печных, тяговых и других

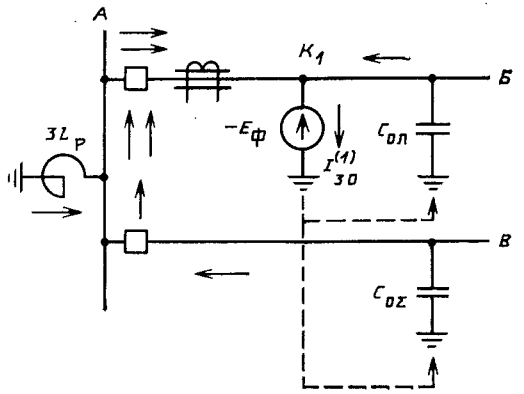


Рис. 9.3. Распределение токов при $K_з^{(1)}$ в компенсированной сети

подобных им потребителей. При возникновении $K_з^{(1)}$ распределение токов этих гармоник в сети оказывается примерно таким же, как емкостных токов замыкания на землю по рис. 9.1; при этом учитывается, что наличие дугогасящих реакторов, настроенных на основную гармонику, на это токораспределение оказывает не очень существенное влияние и им часто можно пренебречь (см., например, [48]).

Использование естественных высших гармоник установившегося режима впервые для целей релейной защиты предложено и проработано ВНИИЭ (В. М. Кискачи и др.) еще в начале 60-х годов. В последующие годы разработки в этом направлении развивались, и в настоящее время существует много вариантов их реализации [48, 57 и др.]. Выделяются они двумя способами: использованием токов $I_{зов,г}$ или путем сравнения их значений в поврежденной

и неповрежденной фазах; было установлено (ВНИИЭ, В. М. Кискачи), что рассматриваемые токи в поврежденной фазе много больше токов в неповрежденных фазах. Своеобразно второй вариант реализуется в новых защитах от $K_з^{(1)}$ в статорных обмотках генераторов (см. гл. 12). В кабельных сетях обычно используется первый вариант. Он пригоден для сетей с изолированной нейтралью, но особенно эффективен для сетей с резонансно заземленной нейтралью.

Токи переходных процессов. Рассматриваются токи, возникающие в первые моменты после возникновения $K_в^{(1)}$ в сети с дугогасящим реактором. Переходный процесс при появлении $K_з^{(1)}$ имеет две основные стадии (см., например, [58]), показанные на рис. 9.4, *а* (распределенные емкости условно даны сосредоточенными). Первая стадия характеризуется появлением разрядных волн, распространяю-

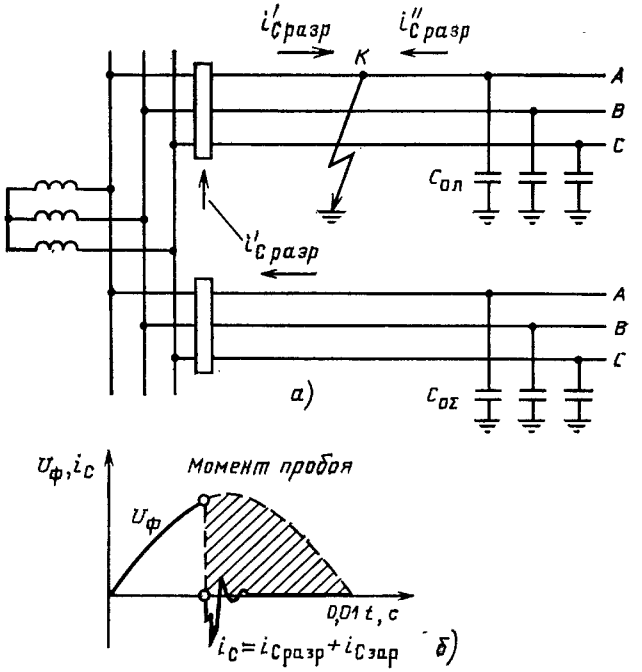


Рис. 9.4. Распределение переходных токов замыкания на землю (*а*) и диаграмма их изменений во времени (*б*)

щихся в сети в обе стороны от места пробоя. Они определяются в основном мгновенным значением напряжения сети u и волновым сопротивлением $z_в$: $i_{с\,разр}=u/z_в$. Максимальные значения $i_{с\,разр}$ появляются при напряжениях, близких к амплитудным (рис. 9.4, *б*), поскольку они определяются в основном емкостями $C_{0л}$ и $C_{0\Sigma}$ (рис. 9.4, *а*) (переходный ток i_L дугогасящего реактора нарастает относительно медленно, имеет меньшие значения и его можно не учитывать). Токи $i_{Cразр}$ имеют высокие «частоты» (достигают многих килогерц), проходят, минуя источники питания, и быстро затухают. Развитие переходного процесса, его вторая стадия, характеризуется дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз через обмотки источника питания. Волны заряда имеют более низкие «частоты» (начиная с нескольких сотен герц) и затухают медленнее. В точке $K_з^{(1)}$ $i_{с\,разр}$ и $i_{с\,зар}$ складываются. Впервые результаты исследования вопросов использования переходных емкостных токов для защит от $K_з^{(1)}$ были опубликованы Нейгебауером (Германия) в середине 30-х годов. В СССР возможности применения для разных защит переходных токов начали исследоваться в основном в ЭНИН во второй половине 40-х годов (И. Н. Поповым и др.). Результаты работ ЭНИН обобщены в [59]. В последующие годы в эти разработки включились и другие организации: ИЭИ (О. В. Лебедев, В. А. Шуин), ВНИИЭ (В. М. Кискачи) и др. Исследования показывали, что лучшие результаты в общем случае получаются при использовании качественных признаков процесса (например, направления распространения волн), а не количественных (амплитуд токов). В связи с этим защиты часто выполняются реагирующими на знак мгновенной мощности; при этом предпочтение принципиально отдается использованию разрядной волны, хотя практически это трудно осуществимо. Неплохие результаты получены при относительном сравнении амплитуд токов присоединений (работы ИЭИ) с учетом того, что абсолютный их уровень может колебаться в широких пределах в зависимости, например, от места замыкания.

Наложенные токи. Для действия защит от $K_з^{(1)}$ в сетях обычно предпочитают использование наложенного переменного тока с частотами, отличными от рабочей. Так, например, разработки ИЭД АН УССР (И. М. Сирота и др.) базируются на токе 100 Гц. В другой разработке (А. В. Григорьев, Магнитогорский индустриальный институт) предлагалось применять ток частотой в несколько сотен герц, вводимый в сеть через измерительный *TV* на питающей подстанции. Предел повышения частоты определяется увеличивающейся при этом долей наложенного тока, проходящего при $K_з^{(1)}$ через $R_п$ мимо места $K_з^{(1)}$ и защиты через емкость неповрежденной части сети. Применение наложенных токов для защит от $K_з^{(1)}$ линий на практике распространения не получило.

Напряжения нулевой последовательности. Они в установившемся режиме при $K_з^{(1)}$ практически одинаковы во всей сети данного напряжения, так как падения напряжения от токов I_0 в сопротивлениях Z_0 линий ничтожно малы по сравнению с падениями напряжений в емкостных сопротивлениях фаз сети на землю. Поэтому использование $U_0^{(1)}$ для выявления участка или направления с $K_з^{(1)}$ невозможно, и на их появлении строятся только устройства контроля изоляции, устанавливаемые на шинах подстанций.

9.3. ФИЛЬТРЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Фильтры токов. В гл. 4 рассматривались трехтрансформаторные фильтры и указывалось на наличие и однотрансформаторных фильтров. Для защит от $K_з^{(1)}$ там, где это возможно, применяются однотрансформаторные фильтры *TA* нулевой последовательности (*TA* Ферранти) как более простые, имеющие малые токи небаланса и обеспечивающие более эффективное выделение обычно весьма небольших токов $I_з^{(1)}$ из больших первичных токов фаз. Однотрансформаторные фильтры в сетях устанавливаются на кабельных линиях или воздушных линиях с кабельными выводами. Типичное выполнение кабельного *TA* нулевой последовательности приведено на рис. 9.5. При $K_з^{(1)}$ токи повреждения могут возвращаться в сеть как через землю, так и по проводящей оболочке и броне кабелей. Для предотвращения возможности срабатывания под воздействием этих токов защит неповрежденных линий и понижения чувствительности защит поврежденных кабели на участке от *TA* до «воронок» и «воронки» изолируются от земли, а защитное заземление последних выполняется проводом, пропущенным через отверстие магнитопровода *TA* в направлении кабеля. При этом токи в заземляющем про-

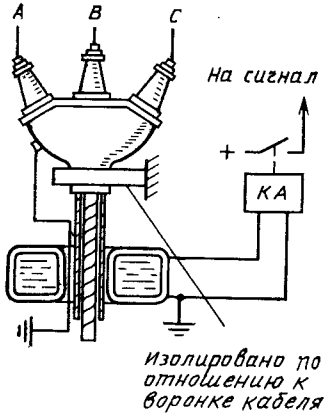


Рис. 9.5. Кабельный трансформатор тока нулевой последовательности с присоединенным к нему органом тока

воде и оболочке с броней равны и направлены в разные стороны, поэтому поток в стальном сердечнике они не создают.

Качество схем фильтр-токовых измерительных органов прежде всего характеризуется их первичным током срабатывания $I_{с,з}$, т. е. минимальным током $3I_0$, необходимым для их срабатывания. Трудность получения часто необходимых малых $I_{с,з}$ определяется малой мощностью, отдаваемой этими фильтрами, как имеющими первичную обмотку в виде кусков фаз кабеля (одновитковые *ТА*) с проходящими по ним небольшими $3I_0$ (работа *ТА* в начальной части кривой $B_{max}=f(H)$ за счет малых МДС, пропорциональных $3I_0w$); качество их снижается дополнительно при разъемных магнитопроводах, используемых в случаях установки *ТА* на смонтированной установке. Для улучшения работы схем фильтр — ИО применяются ИО с малыми мощностями, потребляемыми при срабатывании. В настоящее время это легко достигается в схемах с ИО, выполненными на интегральной микроэлектронной базе. Малые токи небаланса обусловлены отсутствием основной слагающей $I_{нб}$ — намагничивающих токов *ТА* в трехтрансформаторных фильтрах. Необходимо отметить, что однотрансформаторный фильтр нельзя получить путем навивки вторичной обмотки на кабель. Для получения фильтров без стального сердечника, насаживаемого на кабель, могут быть использованы специальные фильтры, разработанные ОЗАП Мосэнерго (Ю. М. Силаев) и показанные на рис. 9.6 (см., например, [10]). Они могут отдавать еще меньшие мощности.

Трехтрансформаторные фильтры иногда используются для защит, реагирующих на начальные значения переходных емкостных токов, намного превышающих их установившиеся значения (примерно пропорциональные частотам их составляющих). На практике в распределительных воздушных сетях часто применяются весьма простые трех-

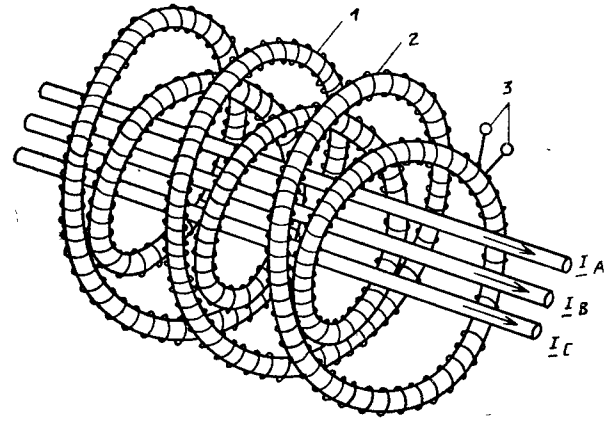


Рис. 9.6. Трансформатор тока нулевой последовательности в виде многовитковой спирали:

1 — немагнитный сердечник; *2* — обмотка; *3* — зажимы вторичной обмотки

трансформаторные фильтры с использованием магнитных зондов — магнитных *ТА*, разработанных В. Е. Казанским и др. [44]. Они имеют, однако, весьма малую отдаваемую мощность (см. гл. 4).

Фильтры напряжений. В качестве фильтров напряжения нулевой последовательности часто применяются *TV* (см. гл. 4). Однако они, в отличие от *ТА*, способны без существенных искажений трансформировать составляющие переходного процесса с частотами только до нескольких килогерц. При бо́льших частотах начинают сказываться межвитковые емкости первичных обмоток *TV*; приходится также учитывать возникающие в них переходные процессы. Поэтому для направленных защит, использующих начальные значения переходных токов, вопрос о вторичных напряжениях требует особого рассмотрения. Для упрощенных защит с магнитными зондами иногда напряжения берутся, например, с антенн.

Многие вопросы выполнения и работы фильтров нулевой последовательности тока и напряжения обобщены в [60].

Токовые защиты нулевой последовательности, реагирующие на первые гармоники тока $I_з^{(1)}$ или сумму всех гармоник. Структурная схема простейшего выполнения защиты с кабельным *ТА* нулевой последовательности приведена на рис. 9.7, *а*. Предполагается действие ее на сигнал. Ток $I_{с,з}$ должен отстраиваться от емкостного тока $3I_{0Cл}^{(1)}$ при внешних замыканиях, суммирующегося с $I_{нб,п}$ фильтра, который

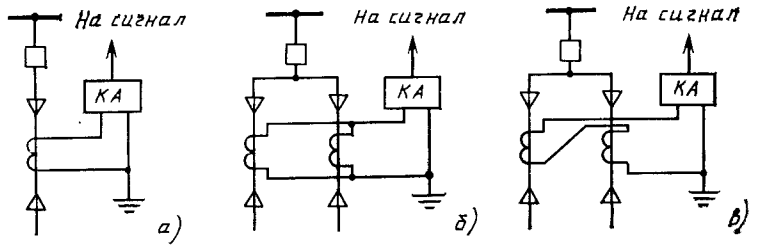


Рис. 9.7. Структурные совмещенные схемы токовой защиты с кабельными *ТА* нулевой последовательности

при кабельном выполнении последнего весьма мал. При внутреннем $K_з^{(1)}$ ток в защите для сети с изолированной нейтралью определяется током $3I_{0C\Sigma}^{(1)}$ всех других присоединений. Защита может использоваться только в разветвленной радиальной сети, когда $C_{0\Sigma min} \gg C_{0л}$ данного присоединения; она может нечетко работать при перемежающихся замыканиях, не контролирует самоликвидирующихся повреждений, непригодна для сетей с дугогасящими реакторами. С учетом изложенного области ее применения в настоящее время весьма ограничены. При ее применении необходимо учитывать, что при $K_{дв}^{(1,1)}$ в фильтре возможно прохождение большого тока $3I_{к0}^{(1,1)}$, при котором современные ИО могут быть повреждены; для их защиты используются обычно разрядники на входе.

При осуществлении защиты кабельной линии, имеющей, например, два кабеля, вторичные обмотки *ТА* нулевой последовательности могут соединяться параллельно (рис. 9.7, *б*) или последовательно (рис. 9.7, *в*). Соображения по сравнительной оценке этих схем даны в работе СРЗиУ ТЭП [10].

Промышленностью по разработкам ВНИИЭ серийно выпускаются усовершенствованные варианты рассмотренной защиты на микроэлектронной элементной базе [48].

Направленные защиты нулевой последовательности, предназначенные для реагирования на основные гармоники токов и напряжений. Структурная схема простейшего выполнения защиты применительно к условиям, оговоренным для токовой защиты по рис. 9.7, приведена на рис. 9.8. Напряжение $3U_0^{(1)}$ к измерительному органу подводится от вторичной обмотки *TV*, соединенной в разомкнутый треугольник; *TV* включен на сборные шины. Отстройка от тока $3I_{0C,л}$ обеспечивается направленностью действия защиты. Для отстройки от воздействующих на ИО $I_{нб}$ и $U_{нб}$ фильтров ИО должен иметь регулируемую чувствительность, так как отдельных органов тока в защите нет. С учетом этого применяются не органы направления мощности, как в защитах от КЗ, а *органы мощности*. В настоящее время промышленностью по разработкам ВНИИЭ на микроэлектронной элементной базе выпускается улучшенный вариант защиты. Для подобных же защит, использовавшихся в 30—40-е годы на генераторах, в Ленэнерго (П. П. Виноградовым) и СРЗиУ ТЭП была предложена и реализована схема с косвенной компенсацией тока $I_{нб}$, осуществляемой с помощью дополнительного тормозного тока, подаваемого в токовые цепи ИО от *TV* нулевой последовательности [1]. Рассматривался также вопрос и о компенсации собственных емкостных токов для токовых защит при внешних $K_з^{(1)}$ с использованием тока, создаваемого $U_0^{(1)}$. Однако последнее предложение было оценено как несвоевременное. Схема практически непригодна для сетей с дугогасящими реакторами. Использование при их наличии остаточных активных слагающих токов неэффективно. В настоящее время защита используется иногда при заземлении нейтрали через резистор большого сопротивления с реле мощности активно-реактивного типа (например, по разработкам ИЭД АН УССР).

Токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности, реагирующие на составляющие переходного процесса, возникающие в начальный момент $K_з^{(1)}$. Устройства этого вида, как указывалось выше, могут реагировать на знак мгновенной мощности, сравнивать знаки импульсов тока и напряжения, амплитуды первых импульсов тока на всех отходящих присоединениях.

В настоящее время для воздушных сетей напряжением 20—35 кВ промышленностью выпускается по разработке ЭНИН импульсная направленная защита. Ее действие основано на контроле начального знака мощности нулевой последовательности. Она включается на трехтрансформаторный фильтр токов и на напряжение нулевой последовательности через фильтры, подавляющие основные гармоники. Защита может работать как без выдержки времени, так и с выдержкой времени, например на сигнал. В опытной эксплуатации находится также защита ЭНИН, разработанная для линий сверхвысоких напряжений. Ее отличительной особенностью является устройство, предназначенное для отстройки от воздействия волн, возникающих при разряде молнии. Необходимо отметить, что в последние годы ИЭИ (В. А. Шуиным и др.) для направленных защит, реагирующих на переходные процессы, было предложено использовать не напряжение u_0 в переходном процессе, а производную от этого напряжения du_0/dt. Проведенный авторами анализ указывает на эффективность предложения для осуществления направлеиных защит рассматриваемого вида.

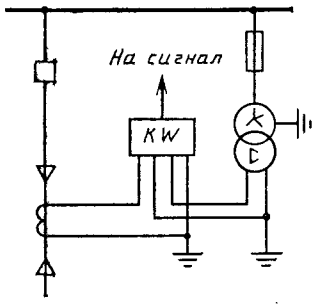


Рис. 9.8. Структурная совмещенная схема защиты мощности иулевой последовательности

Устройства, сравнивающие амплитуды токов, выполняются как централизованные по разработкам ИЭИ (О. В. Лебедев и В. А. Шуин) и частично ВНИИЭ для осуществления защит от $K_з^{(1)}$ с действием на сигнал. Промышленностью серийно выпускается вариант такой защиты по разработке ВНИИР [48].

Необходимо подчеркнуть, что рассмотренные принципы выполнения защит, реагирующих на начальные слагающие переходных процессов, фиксируют как кратковременные самоликвидирующиеся, так и дуговые перемежающиеся замыкания, а также устойчивые $K_з^{(1)}$. Поэтому принципиально они являются более универсальными, чем другие исполнения. Их недостатки — малая чувствительность при постепенном снижении изоляции, когда пробой может быть при малых $u_к$.

Токовые защиты, реагирующие на установившиеся значения высших гармоник. По разработкам ВНИИЭ (В. М. Кискачи др.) промышленностью выпускается или готовится к выпуску значительное число исполнений таких защит, получивших широкое применение [48]. В настоящее время они строятся на современной микроэлектронной элементной базе и предназначены для включения на *ТА* нулевой последовательности. В [48] отмечается ряд мероприятий, направленных на повышение технического совершенства в разных вариантах таких защит. К ним, в частности, относятся следующие: фильтрация воздействующих величин с целью отстройки от слагающих рабочей частоты, могущих неблагоприятно влиять на эффективность функционирования; обеспечение работы при перемежающихся замыканиях; подпитка цепей тока от устройства, моделирующего с запасом мгновенное значение тока защищаемого присоединения согласно выражению $i_{0сл}^{(1)}=3C_{0л}du_0/dt$ и компенсирующего бросок емкостного тока присоединения; устройства для защиты от больших токов $I_к$ при $K_{дв}^{(1,1)}$ и некоторые другие.

Устройства наиболее эффективны в кабельных сетях с дугогасящими реакторами, но могут использоваться и в сетях с изолированными нейтралями. Они выполняются как индивидуальными для каждого присоединения (с измерением абсолютного значения), так и централизованными (с измерением относительного значения). Каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки. Существенным достоинством второго варианта является возможность получения более чувствительной защиты. Некоторым недостатком рассматриваемых защит является неприспособленность для фиксации кратковременных самоустраняющихся повреждений (если такая требуется).

Особым является вариант выполнения защиты, в котором сравниваются значения гармоник в поврежденной и неповрежденной фазах и который не требует фильтров нулевой последовательности. Как уже отмечалось выше, в работах ВНИИЭ была показана возможная эффективность таких защит [57, 48]. В настоящее время рассматриваемое выполнение начало пока получать практическую реализацию преимущественно при осуществлении защит от $K_з^{(1)}$ статорных обмоток генераторов (см. гл. 12).

Общая оценка защит линий от $K_з^{(1)}$. Как следует из изложенного, разносторонние работы, проводящиеся в стране

по исследованию и осуществлению защит от $K_з^{(1)}$, дают основание полагать, что такие защиты могут быть осуществлены при любых режимах заземления нейтралей сетей. Однако характер заземления может существенно сказываться на принимаемых решениях. Поэтому назрел вопрос о критической оценке существующих режимов заземления, которые требуют уточнения с учетом зарубежного и отечественного опыта.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните особенности $K_з^{(1)}$ по сравнению с КЗ и сформулируйте требования к защитам линий, реагирующим на этот вид повреждения.
2. Какие электрические величины используются для выполнения защиты от $K_з^{(1)}$?
3. Почему для выполнения защиты от $K_з^{(1)}$ преимущественно используются однотрансформаторные фильтры тока нулевой последовательности, а не трехтрансформаторные?
4. Какие принципы выполнения защит линий от $K_з^{(1)}$ используются в отечественной практике?

Глава десятая

ВЫБОР ПРИНЦИПОВ ЗАЩИТ ЛИНИЙ

10.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ

При выполнении защит линий разных номинальных напряжений учитывается ряд требований и соображений, а также разрешается много научно-технических и практических вопросов. Осуществление защит в отечественных условиях облегчается рядом обстоятельств. Это, во-первых, наличие ПУЭ, в которых приведены как общие требования, так и достаточно конкретные указания по осуществлению защит линий до 500 кВ включительно. Во-вторых, выпускались РУ по защитам разных исполнений, ряд разделов которых не устарел и содержит конкретные указания по выбору параметров и оценке чувствительности защит. Многие вопросы изложены в предыдущих главах, а также в ряде книг, в которых дано более глубокое рассмотрение как отдельных защит, так и их комплексов. Необходимо, наконец, отметить, что отечественная промышленность выпускает устройства, с использованием которых представляется возможным осуществлять защиты любых элементов электрических систем на все напряжения. Поэтому ниже коротко рассмотрены лишь некоторые общие вопросы.

10.2. ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 6—10 кВ

По линиям 6—10 кВ может осуществляться питание городских, промышленных и сельскохозяйственных потребителей. Они бывают кабельные (преимущественно в промышленных и городских сетях) и воздушные (преимущественно в сельскохозяйственных сетях) и образуют сети различной конфигурации, понижающие трансформаторы которых часто имеют небольшую мощность и защищаются от КЗ предохранителями. В нормальных режимах линии обычно работают как радиальные с односторонним питанием; поэтому для защиты от КЗ, как правило, оказывается достаточной токовая релейная защита (см. гл. 5). Для обеспечения бесперебойного питания потребителей предусматривается ряд мероприятий. К ним в первую очередь относятся следующие: осуществление резервного питания по другой линии, питаемой от той же подстанции или другого синхронно работающего источника, с помощью АВР или специального сетевого резервирования, часто используемого в существующих сельскохозяйственных сетях; применение АПВ поврежденной линии, которое эффективно в воздушных сетях и малоэффективно в кабельных; выполнение защит с возможно малыми временами срабатывания или без выдержки времени, последнее считается обязательным на нереактивированных линиях при $U_{ост}^{(3)} \leqslant 0{,}5 \div 0{,}6 U_{ном}$ на шинах подстанции при питании по линиям синхронных двигателей и других потребителей, не допускающих затяжки в ликвидации КЗ; в связи с этим допускается неселективная работа защиты линии в сочетании с АВР и АПВ, исправляющими по возможности допущенные излишние срабатывания.

На линиях обычно используется единственная защита, которая должна осуществлять и дальнее резервирование. В некоторых случаях, например на ответственных линиях малой длины, предусматриваются в качестве основных продольные дифференциальные токовые защиты (см. гл. 8). Тогда токовые защиты устанавливаются в качестве резерв-

ных. Иногда применяются токовые защиты с блокировкой по вспомогательным проводам (гл. 7).

Сети 6—10 кВ имеют нейтрали изолированные или заземленные через дугогасящие реакторы. Поэтому защиты от КЗ должны учитывать только многофазные повреждения — $K^{(3)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ и $K_{дв}^{(1,1)}$. Защиты от $K_з^{(1)}$ действуют, как правило, на сигнал; а на отключение — только когда это необходимо прежде всего по условиям техники безопасности (см. гл. 9). Защиты от КЗ выполняются двухфазными (для отключения при $K_{дв}^{(1)}$ по возможности одного места повреждения), при реле косвенного действия — часто односистемными (с одним измерительным органом). Целесообразно (в городских, сельскохозяйственных сетях) использование защит с реле прямого действия или на оперативном переменном токе (см. гл. 4). Оперативный постоянный ток применяется на объектах, имеющих аккумуляторные батареи, установленные для других целей.

Часто применяются реле тока с комбинированной характеристикой $t=f(I_к)$ — при значительных $I_к$ выдержки времени нет (отсечка), при малых $I_к$ характеристика ограниченно зависимая или близкая к ней зависимая, облегчающая согласование с характеристиками предохранителей защит трансформаторов потребителей.

Конкретные указания по выбору параметров защит, согласование их характеристик для распределительных сетей даны в [61].

10.3. ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 20 и 35 кВ

Сети 20 и 35 кВ работают с теми же режимами заземления нейтралей, что и сети 6—10 кВ. Поэтому защиты линий 20 и 35 кВ должны реагировать на аналогичные виды повреждений. Защиты от $K_з^{(1)}$ работают на сигнал. Защиты от КЗ выполняются двухфазными.

Для одиночных линий с односторонним питанием стремятся применять более простые токовые ступенчатые защиты. Допускается при наличии у линии нескольких последовательных участков для обеспечения быстрого отключения тяжелых повреждений ($U_{ост}^{(3)} \leqslant 0{,}6U_{ном}$ на шинах питающих подстанций) выполнять первые ступени защит неселективными, исправляя их излишние срабатывания устройствами поочередного АПВ (см., например, [1, 48]).

Сети 20 и 35 кВ часто имеют кольцевую конфигурацию,

параллельные цепи, в них возможно наличие двух источников питания. В таких сетях применение только токовых ступенчатых направленных защит часто невозможно или неэффективно. В этих случаях используются дистанционные, обычно односистемные, защиты с ИО полного сопротивления. Для одиночных цепей используются единственные защиты, осуществляющие и дальнее резервирование. Дополнительно на параллельных цепях предусматриваются поперечные дифференциальные токовые направленные защиты. При направленных защитах дополнительно устанавливаются токовые ненаправленные отсечки от многофазных КЗ. Иногда для первых двух ступеней вместо органов сопротивления применяются комбинированные отсечки по току и напряжению (см. гл. 5). Однако при современных элементных базах такое решение представляется недостаточно обоснованным.

10.4. ЗАЩИТА ЛИНИЙ 110—220 кВ

Сети, как правило, работают с глухозаземленными нейтралями. Поэтому защиты выполняются как от многофазных (за исключением $K_{дв}^{(1,1)}$), так и от однофазных КЗ. Сети часто имеют сложную конфигурацию, несколько источников питания. Поэтому для защиты от многофазных КЗ (включая $K^{(1,1)}$) часто применяются дистанционные ступенчатые защиты с разными характеристиками $Z_р=f(\varphi_р)$ (см. гл. 6) органов сопротивления, снабжаемые блокировками от качаний и нарушений вторичных цепей TV. От $K^{(1)}$ в СССР обычно применяются не дистанционные защиты, а токовые многоступенчатые направленные защиты нулевой последовательности (см. гл. 5).

Необходимо подчеркнуть, что для линий рассматриваемых и более высоких напряжений, как правило, осуществляется сочетание дальнего и ближнего резервирования. Ближнее резервирование сводится к тому, что на каждой линии устанавливается два комплекта защиты, причем второй для рассматриваемого выполнения защит (дистанционных и токовых нулевой последовательности) может иметь упрощенное выполнение тех же защит — с меньшим числом ступеней, например, с первой и второй. На практике часто используется еще более простое осуществление рассмотренного резервирования (см., например, [70]). Единственный комплект, включающий дистанционную защиту и токовую направленную защиту нулевой последовательности,

разделяется по цепям воздействующих величин и по цепям оперативного тока на две части. В одну из них входят I и II ступени дистанционной и IV ступень токовой направленной защит, а во вторую — соответственно III ступень дистанционной и I, II и III ступени токовой направленной защит. Во всех случаях здесь и далее дополнительно устанавливаются токовые ненаправленные отсечки от многофазных КЗ. На подстанциях сетей, особенно с воздушными или малообъемными масляными выключателями, не имеющими встроенных во втулки TA, предусматриваются УРОВ (см. гл. 15).

В последние годы выявилась тенденция к применению и для ликвидации $K^{(1)}$ дистанционных защит, как практикуется за рубежом. Эта тенденция обусловлена появлением более удачных исполнений органов сопротивления, предназначенных для указанных целей (см. гл. 6). Пока на практике такие исполнения не используются.

В случаях, когда по условиям обеспечения устойчивости системы и ответственных потребителей требуется действие защиты на всей длине защищаемого участка без выдержки времени [на шинах станций и узловых подстанций $U^{(3)}_{ост} \leqslant 0{,}6 \div 0{,}7 U_{ном}$], возможны два решения вопроса: дополнение ступенчатых защит устройствами ВЧ блокировки или передачи отключающих сигналов и использование в качестве основной отдельной продольной защиты с абсолютной селективностью. Предпочтение отдается второму варианту, обеспечивающему независимость в эксплуатации и более совершенное ближнее резервирование. В настоящее время в качестве основных применяются направленные защиты с ВЧ блокировкой (см. гл. 7) вместо ранее использовавшихся дифференциально-фазных защит с ВЧ блокировкой (см. гл. 8). Продольные дифференциальные защиты со вспомогательными проводами используются редко, на очень коротких участках.

При наличии на линии параллельных цепей дополнительно устанавливаются поперечные направленные защиты с косвенным сравнением знаков мощности (см. гл. 7). Всегда в качестве дополнительных предусматриваются токовые ненаправленные отсечки.

На тупиковых линиях иногда удается использовать и более простые токовые ступенчатые защиты.

10.5. ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Системы сверхвысоких напряжений, как и при $U_{ном} = 110 \div 220$ кВ, работают с глухозаземленными нейтралями. Поэтому их защиты должны работать при аналогичных видах КЗ и иметь схожие по принципам действия выполнения. Однако требования, предъявляемые к выполнению защит, являются значительно более жесткими и имеют некоторые специфические особенности, коротко отмеченные ниже.

Системы с рассматриваемыми линиями работают обычно с малыми запасами по устойчивости. Поэтому в качестве основных на линиях всегда предусматриваются наиболее быстродействующие продольные защиты — направленные с ВЧ блокировкой (см. гл. 6), собственное время срабатывания которых не превосходит 0,02 с. К резервным защитам со ступенчатыми характеристиками выдержки времени, обеспечивающим ближнее и дальнее резервирование, также предъявляется требование отключения КЗ на защищаемом участке без выдержки времени. Для этого они снабжаются устройствами, осуществляющими передачу отключающих и разрешающих ВЧ сигналов. Большие работы по созданию систем телеотключения были проведены во ВНИИЭ (В. С. Скитальцевым и др.). Они привели к выпуску промышленностью аппаратуры телеотключения вначале типа ВЧТО, а в дальнейшем — более совершенных систем (АНКА — АВПА), используемых на практике. На линиях сверхвысоких напряжений всегда предусматриваются устройства ОАПВ, обеспечивающие при $K^{(1)}$ отключение на участке только одной поврежденной фазы, ее автоматическое повторное включение и отключение всех трех фаз при неуспешности последнего. Поэтому к защите линий предъявляется требование обеспечения действия в случае возникновения КЗ в цикле ОАПВ на оставшихся в работе двух фазах. Существующие направленные защиты с ВЧ блокировкой для этой цели оказываются непригодными (см. гл. 7). Значительно более четко функционирует продольная дифференциально-фазная защита с ВЧ блокировкой (см. гл. 8). Поэтому предусматривается в цикле ОАПВ временный перевод направленной защиты в упрощенную дифференциально-фазную с постоянной циркуляцией блокирующего сигнала. Для тех же целей используются и избирательные органы устройств ОАПВ.

При КЗ и разного рода переключениях в рассматривае-

мых линиях возникают интенсивные переходные электромагнитные процессы, сопровождающиеся не только апериодическими слагающими, но и свободными знакопеременными затухающими слагающими с частотами, бо́льшими основной, но иногда и достаточно близкими к ней. За время действия быстродействующих защит все указанные слагающие не успевают достаточно сильно затухнуть и могут вызвать излишние срабатывания при внешних КЗ или замедление при внутренних КЗ. Предлагались разные мероприятия для устранения указанных неблагоприятных влияний. В настоящее время наиболее целесообразным считается применение фильтрации воздействующих на измерительную часть защиты величин. Часто для осуществления этого используются преобразования Фурье для заданного времени (обычно один период — 0,02 с) в виде текущих спектров (см. гл. 1). Однако, как показано в [34], они, как и преобразования Калмана, в ряде случаев не могут обеспечить необходимой полноты фильтрации. Принципиально более полное решение дают методы, применяющие принципы получения наименьших квадратичных погрешностей [35]. Однако в общем случае они реализуются достаточно сложно.

Приходится также учитывать емкостную проводимость линий, наличие которой может привести к неправильному функционированию защит. Для исключения этого, например для некоторых продольных защит, применяют искусственное выравнивание токов в комплектах противоположных сторон с помощью компенсации емкостного тока участка. Эта компенсация может выполняться с приближенным учетом переходных электромагнитных процессов. Общие условия выполнения защит линий сверхвысоких и ультравысоких напряжений рассмотрены в работе В. М. Ермоленко, В. И. Козлова и В. Н. Красевой [62], где приведены также материалы других авторов по конкретным защитам.

10.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕОТКЛЮЧЕНИЙ

В технике релейной защиты под телеотключением обычно понимается отключение выключателей на одном конце участка, которое осуществляется при получении отключающего сигнала от сработавшей защиты на другом его конце или других концах (например, на линии с ответвлениями). Отключающие сигналы могут передаваться по проводным, ВЧ и радиоканалам (см. гл. 1) и производить

контролируемые или неконтролируемые отключения. Первые отличаются от вторых тем, что требуемое отключение происходит только при срабатывании на электроустановке, принимающей сигнал какого-либо органа, фиксирующего возникновение в защищаемой системе повреждения. Обычно, если это возможно, используются схемы с контролируемым отключением как обеспечивающие лучшую отстроенность от разного рода помех.

Большие работы по созданию систем телеотключения были, как указано выше, проведены во ВНИИЭ.

Использование отключающих сигналов для защит линий. Ниже оно рассматривается применительно к направленным защитам со ступенчатыми характеристиками вы-

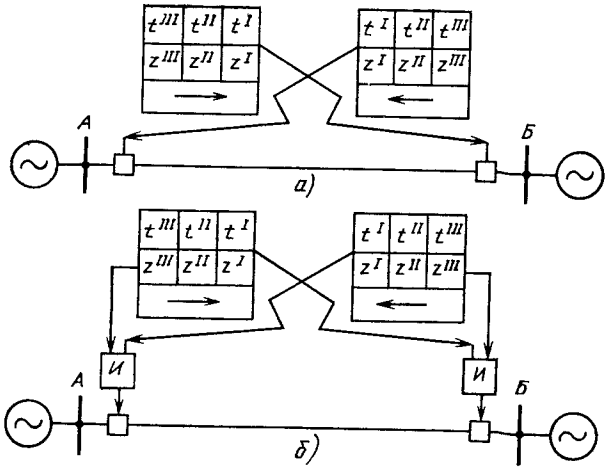


Рис. 10.1. Использование отключающих сигналов:
а — неконтролируемых; *б* — контролируемых

держки времени, например дистанционным (рис. 10.1). Первая ступень защиты данного конца *А* защищаемого участка при срабатывании действует на отключение своего выключателя и посылает сигнал на отключение выключателя другого конца участка *Б*. При неконтролируемом сигнале последний непосредственно используется для отключения (рис. 10.1, *а*); в случае контролируемого сигнала отключение производится только при срабатывании, например, измерительного органа третьей ступени защиты

стороны *Б* (рис. 10.1, *б*), бо́льшую длины участка. Такое выполнение защиты характеризуется следующими особенностями:

если первые ступени защит *А* и *Б* перекрывают друг друга и в сумме с запасом охватывают длину участка *АБ* (что всегда имеет место при дистанционных защитах), то повреждения в любой его точке могут отключаться без выдержки времени;

не обеспечивается отключение повреждения без выдержки времени, возникшего вне зоны I ступени данной защиты (например, *А*), если защита другой стороны *Б* не срабатывает (например, при одностороннем питании, включении линии под напряжение).

Для линий сверхвысоких напряжений использование для защит отключающих сигналов рассмотрено выше. Такое решение может оказаться целесообразным и для линий с ответвлениями в распределительных сетях 110—220 кВ.

10.7. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТ ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Общие данные. Под линиями с ответвлениями обычно понимаются такие, к которым производится присоединение элементов (как правило, понижающих трансформаторов) без установки на образующихся таким образом частях линии дополнительных выключателей. Широкое применение линии с ответвлениями получили в распределительных сетях 6—10 кВ с присоединением к ним трансформаторов малой мощности через их защитные предохранители. В этом случае релейная защита линии, если она быстродействующая, при КЗ в трансформаторе может срабатывать еще до перегорания предохранителей трансформатора. Но подача напряжения на отключившуюся линию (устройствами АПВ, АВР) может быть и успешной, если предохранители успевают перегореть.

Линии с ответвлениями встречаются также при осуществлении упрощенных подстанций на напряжения 110—220 кВ, когда понижающие трансформаторы присоединяются к линии с помощью отделителей и снабжаются короткозамыкателями (один по схеме фаза — земля), осуществляющими искусственное $K^{(1)}$ (рис. 10.2, *а*) при срабатывании защит от внутренних повреждений трансформатора. На это $K^{(1)}$ должна реагировать защита линии. В бестоковую паузу отделитель отключает трансформатор, а линия с помощью АПВ включается обратно в работу.

Ниже коротко рассматриваются защиты линий, питающих упрощенные подстанции 110—220 кВ на присоединениях. При этом учитывается необходимость отключения потребителей подстанции (например, крупных двигателей), которые могли бы, являясь кратковременно источником питания, препятствовать успешному действию АПВ.

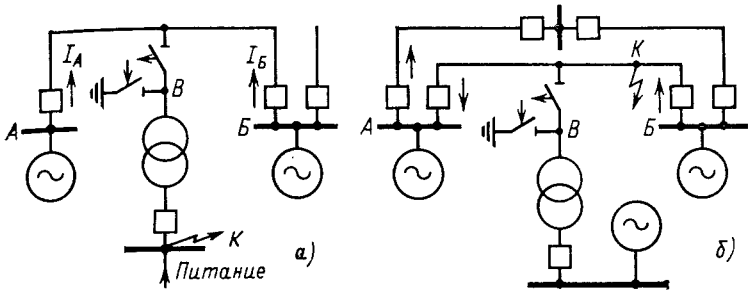


Рис. 10.2. Распределение токов и мощностей КЗ на линии с ответвлением

Защиты с относительной селективностью (дистанционные и токовые). При выборе параметров срабатывания ступеней защит в общем случае приходится учитывать дополнительные условия, которые могут загрублять защиту (уменьшать защищаемые зоны), — отстройку I, II ступеней от КЗ за трансформаторами (автотрансформаторами) ответвлений, отстройку от бросков намагничивающих токов трансформаторов последних. Подпитка со стороны ответвлений также может уменьшать защищаемые зоны.

Третьи (резервные) ступени защит в некоторых случаях целесообразно выполнять действующими при направлении мощности КЗ не от шин в участок с ответвлениями, а наоборот — от последнего к шинам, что может иногда обеспечивать сохранение в работе ответвлений.

Защиты с абсолютной селективностью. Имеющие наибольшее распространение продольные (токовые дифференциально-фазные и направленные) защиты с ВЧ блокировкой на линиях с ответвлениями принципиально могут выполняться в двух вариантах: двумя комплектами, включаемыми только на основных подстанциях, или комплектами, включаемыми как на основных подстанциях, так и на ответвлениях. При этом последние на подстанциях ответвления без генерирующих источников используются только

как блокирующие комплекты защит питающих сторон (при внешних КЗ на подстанциях ответвлений). В первом, простом выполнении ПО защит, контролирующие цепи отключения, должны дополнительно отстраиваться от КЗ за трансформаторами ответвлений и от бросков их намагничивающих токов, что может недопустимо загрублять защиту. При втором выполнении такой отстройки не требуется, однако могут возникать дополнительные затруднения, коротко рассматриваемые ниже применительно к отдельным защитам.

При использовании дифференциально-фазных токовых защит с ВЧ блокировкой в случае внешнего КЗ, например в точке K за трансформатором ответвления B с генерирующим источником (рис. 10.2, *а*), наибольший ток проходит через комплект B. Если при этом его токовый пусковой орган цепи отключения срабатывает, а ПО двух других комплектов на подстанциях A и $Б$ не срабатывают, защита в целом будет воспринимать внешнее КЗ как внутреннее и неправильно отключит выключатель стороны низшего напряжения B. Для исключения излишнего срабатывания защиты требуется дополнительный разнос токов срабатывания ПО, разрешающих отключение и пускающих передатчики. Предельным расчетным будет, очевидно, случай, когда токи двух других сторон равны между собой и составляют половину тока КЗ в ответвлении B; при этом необходимо дополнительное загрубление защиты в 2 раза. При наличии двух ответвлений с питанием может потребоваться еще большее загрубление.

При наличии одного ответвления можно избежать загрубления защиты, применяя для нее ПО не тока, а компенсированного напряжения обратной последовательности $\underline{U}'_2 = \underline{U}_2 - \underline{Z}_к \underline{I}_2$, где $\underline{U}_2$ и $\underline{I}_2$ — напряжение и ток в месте включения комплекта защиты, а $\underline{Z}_к$ — сопротивление компенсации. Эти сопротивления для трех комплектов защиты подбираются таким образом, чтобы при любых внешних КЗ $\underline{U}'_2$, подводимые к ПО, были одинаковыми и равными $\underline{U}_2$ в точке ответвления ($Z_к$ в каждом комплекте принимается равным сопротивлению линии между местом его установки и точкой ответвления). Необходимо, однако, отметить, что при наличии нескольких ответвлений с питанием не представляется возможным подводить одинаковые $\underline{U}'_2$ при любых внешних КЗ и требуется дополнительное загрубление ПО, действующих на отключение.

Возникают и некоторые другие вопросы выполнения рассматриваемой защиты линий с ответвлениями (см., например, [48, 63]).

При использовании направленных защит с ВЧ блокировкой в случае внешних КЗ (точка K на рис. 10.2, *а*) также может срабатывать (за счет большего тока) только ПО защиты со стороны B. Однако излишнего срабатывания защиты B не произойдет, так как мощность КЗ направлена к B и ОНМ, разрешающий отключение, не срабатывает. Необходимо, однако, отметить, что для линий с ответвлениями, имеющими питание, при наличии обходной связи (рис. 10.2, *б*) защита может отказывать в работе, если КЗ возникнет, например, в точке K, у одного из концов линии $Б$, когда направления мощностей соответствуют как бы случаю КЗ вне защищаемого участка. В этом случае рассматриваемая защита может сработать только после отключения выключателя участка, ближайшего к месту повреждения, например резервной защитой со стороны подстанции $Б$. Этот недостаток присущ и дифференциально-фазным токовым защитам.

В общем случае направленные защиты оказываются лучше приспособленными для работы на линиях с ответвлениями. Для быстрой ликвидации повреждений, когда эти защиты, как и дифференциально-фазные, могут отказывать вследствие знаков мощности, соответствующих внешним КЗ, целесообразно добавление устройств передачи отключающих сигналов.

Высокочастотный канал направленной защиты может использоваться, как предложено во ВНИИЭ (Я. С. Гельфандом, Л. С. Зисманом и В. С. Скитальцевым), и для передачи отключающих сигналов.

Выпускаемая в настоящее время новая направленная защита с ВЧ блокировкой (см. гл. 7) имеет дополнительные органы, обеспечивающие ее удовлетворительную работу при установке на линии с ответвлениями.

Дистанционные защиты, дополненные блокирующими и отключающими сигналами. В случаях, когда считается допустимым не иметь на линиях отдельных основных и резервных защит (например, в распределительных сетях 110 кВ), такие схемы могут обеспечивать более простое решение вопроса выполнения защит линий с ответвлениями, осуществляющих отключение поврежденных участков без выдержки времени.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды защит преимущественно используются в сетях 6—10 кВ?
2. Почему и в каких случаях на линиях 6—10 кВ часто используется единственная защита от КЗ?
3. Какие виды защит используются в сетях 20—35 кВ?
4. Почему защиты от КЗ в сетях 6—35 кВ выполняются двухфазными?
5. Какие виды защит применяются в сетях 110—220 кВ?
6. Почему в сетях 110—220 кВ часто используются дистанционные защиты?
7. Какие защиты преимущественно используются в сетях 110—220 кВ от $K^{(1)}$?
8. Как обычно осуществляется резервирование в сетях 110 кВ и выше?
9. Какие защиты всегда предусматриваются на линиях сверхвысоких напряжений в качестве основных?
10. Какое требование ко времени срабатывания часто предъявляется к резервным защитам линий сверхвысоких напряжений?
11. Какие специальные решения принимаются для отключения КЗ на оставшихся двух фазах в цикле ОАПВ?
12. Каковы особенности выполнения защит линий с ответвлениями?

Глава одиннадцатая

ЗАЩИТА ШИН СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

11.1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Виды повреждений на шинах электроустановок определяются напряжением сети, в которую они входят. В сетях с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ, имеющих глухозаземленные нейтрали, учитываются все виды многофазных КЗ в одной точке и $K^{(1)}$, в сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ, имеющих нейтрали, изолированные или заземленные через дугогасящие реакторы, — все виды многофазных КЗ, в том числе и $K_{дв}^{(1,1)}$. Специальных защит от $K_з^{(1)}$ в сетях с $U_{ном} \leqslant 35$ кВ не предусматривается, ограничиваются сигнализацией от устройств контроля изоляции и защит присоединенных линий от $K_з^{(1)}$. Вероятность повреждений на шинах относительно невелика. Однако недостаточно совершенная их ликвидация может обусловливать тяжелые последствия даже для системы в целом. Поэтому считается обязательным такое выполнение защит в системе, которое обеспечивало бы эффективную ликвидацию КЗ на шинах.

11.2. СПОСОБЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ И ВИДЫ ЗАЩИТ

Защита шин от КЗ может осуществляться двумя способами: защитами с относительной селективностью присоединенных к ним линий и других элементов, являющихся генерирующими источниками или связанных с ними, или специальными защитами. Защитами элементов ограничиваются в случаях, когда ими обеспечивается необходимая селективность при внешних КЗ и выдержки времени не худшие, чем при отключении повреждений на защищаемых ими элементах. Например (рис. 11.1, *а*) применение специальной защиты явилось бы необоснованным для шин понижающих подстанций в сети, линии которой имеют защиты с относительной селективностью (дистанционные, токовые и токовые направленные) и нормально работают присоединенными к одной (общей) системе шин. Такое же положение имеется при питании в нормальном режиме подстанции по одной линии (рис. 11.1, *б*).

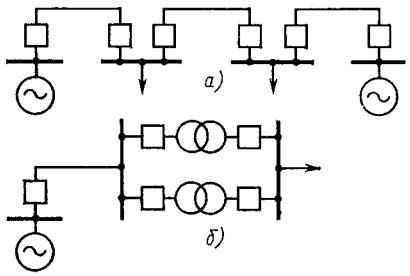


Рис. 11.1. Случаи, когда защита шин осуществляется защитами присоединенных к ним элементов

Специальные защиты шин применяются, например, при выполнении основных защит всех присоединенных линий быстродействующими (с абсолютной селективностью) по условию сохранения устойчивой работы системы, в случа-

ях одновременной работы элементов с одним выключателем на присоединение на двух системах шин с нормально включенным шиносоединительным выключателем (рис. 11.2, *а* и *б*) или при включении элементов через два выключателя по полуторной схеме (рис. 11.2, *в*) и ей подобных с рассматриваемой точки зрения. Такая защита может иногда потребоваться и для шин подстанций, соединенных линией с ответвлениями, для обеспечения более надежного питания потребителей последних (рис. 11.2, *г*).

К специальной защите шин могут предъявляться и дополнительные требования, например на мощных электростанциях (см. гл. 12).

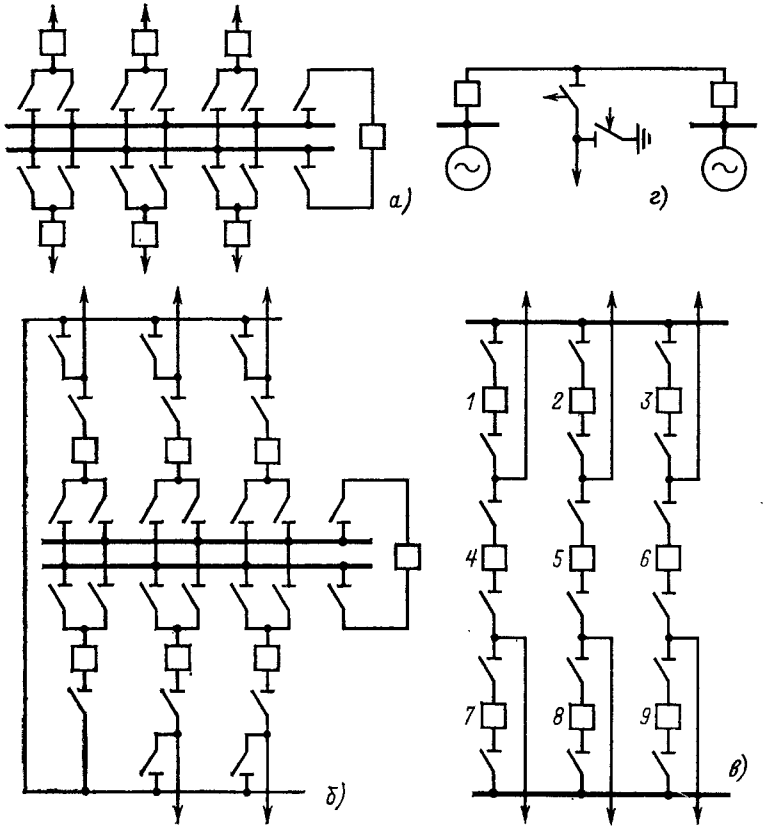


Рис. 11.2. Случаи, когда требуется осуществление специальной защиты шин

В качестве специальных защит шин наиболее часто применяются разновидности дифференциальных токовых защит (см. гл. 8) как могущие обеспечить быстрое и правильное отключение КЗ при различных схемах электрических соединений. При этом учитывается наличие на всех присоединениях защит с относительной селективностью, которые будут работать как резервные при КЗ на шинах. Используются также токовые, токовые направленные (см. гл. 5), в том числе с косвенным сравнением электрических величин (см. гл. 7), и иногда упрощенные дистанционные защиты (см. гл. 6).

11.3. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

Возможно два различных выполнения таких защит: в виде токовых (в общем случае со ступенчатыми характеристиками выдержки времени), рассмотренных в гл. 5, или в виде токовых с блокировкой, работающих без выдержки времени (см. гл. 7).

Первое выполнение рассматривается на примере защиты секционированных шин низшего напряжения подстанции по рис. 11.3. Предполагается, что отходящие от шин нереактированные линии с односторонним питанием име-

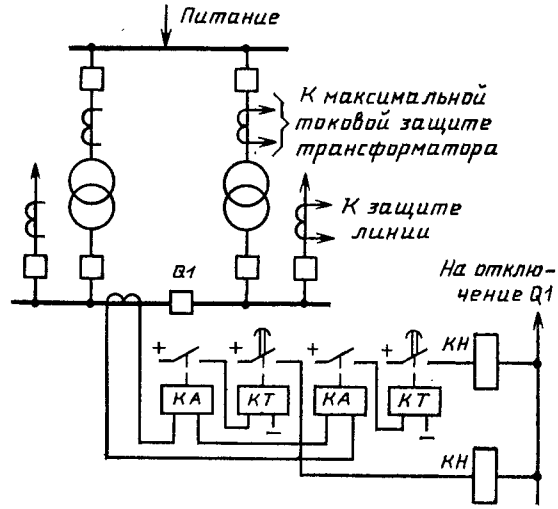


Рис. 11.3. Совмещенная структурная схема токовой ступенчатой защиты на секционном выключателе

ют двухступенчатые (с I и III ступенями) токовые защиты. Для защиты секций используются токовая двухступенчатая защита (ступени II и III), включаемая на *ТА* секционного выключателя, и максимальные токовые защиты понижающих трансформаторов (см. гл. 13). Выдержка времени $t_ш^{II} = t_л^{I} + \Delta t$ (принимая $t_л^{I}$ защит линий приблизительно равной t дифференциальной защиты трансформаторов, работающей без выдержки времени). Выдержка времени $t_ш^{III} = t_{л\,max}^{III} + \Delta t$, выдержка времени защиты трансформатора от внешних КЗ $t_т = t_ш^{III} + \Delta t$. Токи срабатывания II и III ступеней защит шин выбираются в соответствии с условиями, рассмотренными в гл. 5. Чувствительность защиты проверяется по КЗ на защищаемой секции шин и как резервной при КЗ в конце элементов, питаемых от шин.

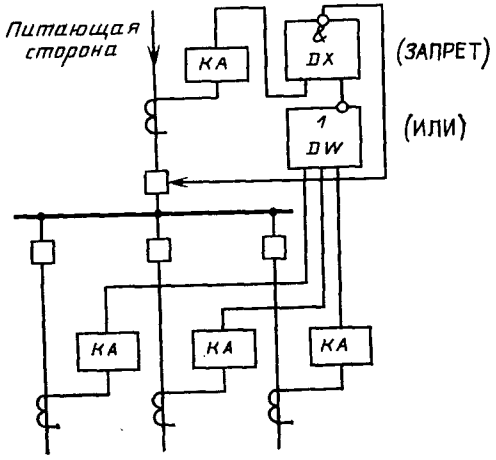


Рис. 11.4. Быстродействующая токовая защита секции шин

При одноступенчатой защите линий защита шин также превращается в одноступенчатую и может вообще не устанавливаться, если выполнять защиту от внешних КЗ трансформаторов с двумя выдержками времени, с меньшей из которых будет отключаться секционный выключатель. Однако такая защита обладает меньшей чувствительностью, так как отстраивается от суммарного рабочего тока потребителей подстанции, а не одной секции.

Рассмотренное выполнение защиты используется для защиты шин 6—10 кВ, разделенных на две секции, если получающиеся времена ликвидации КЗ считаются допустимыми.

Второе выполнение рассматривается, для простоты, на примере защиты секции шин с односторонним питанием потребителей (рис. 11.4). Токовая защита включена на понижающем трансформаторе. При внешних (по отношению к шинам) КЗ на присоединениях она получает блокирующие сигналы (по схеме *ЗАПРЕТ*) от измерительных органов тока (действующих без выдержки времени) защит питаемых присоединений. Поэтому защита шин при внешних КЗ не срабатывает, а при внутренних действует практически без выдержки времени. Защита была разработана еще в начале 30-х годов СРЗиУ ТЭП, но распространения не получила. В последние годы на нее снова обратили внимание частично в связи с тяжелыми последствиями при повреждениях в комплектных распределительных устройствах 6—10 кВ.

11.4. НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

Действие защиты (см., например, [1]) основывается на косвенном сравнении (см. гл. 7) направлений (знаков) мощности на элементах, присоединенных к защищаемым шинам. В случае КЗ на шинах мощности КЗ (имеются в виду полные мощности) направлены внутрь защищаемой зоны, что обеспечивает защите возможность действовать на отключение. При внешних КЗ мощность в поврежденном элементе направлена от шин и действие защиты блокируется. На четкость работы защиты при несимметричных КЗ и повреждениях через $R_п$ могут влиять мощности нагрузок, поэтому в общем случае требуется отстройка от них измерительной части защиты. Проще обстоит дело при использовании направлений (знаков) аварийных слагающих мощностей (нулевой, обратной, полной), так как они всегда направлены от места КЗ к нейтралям элементов любого вида. Пока такие защиты на практике распространения не имеют. Возможно, к их рассмотрению возвратятся при использовании новой микропроцессорной элементной базы.

11.5. ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

Принципы выполнения защиты были разработаны СРЗиУ ТЭП [1] применительно к шинам генераторного напряжения станции, секции и линии (с односторонним питанием) которой реактированы (рис. 11.5). Защита в первом варианте выполняется ненаправленной с одной II ступенью. Ее комплекты включаются на всех элементах, свя-

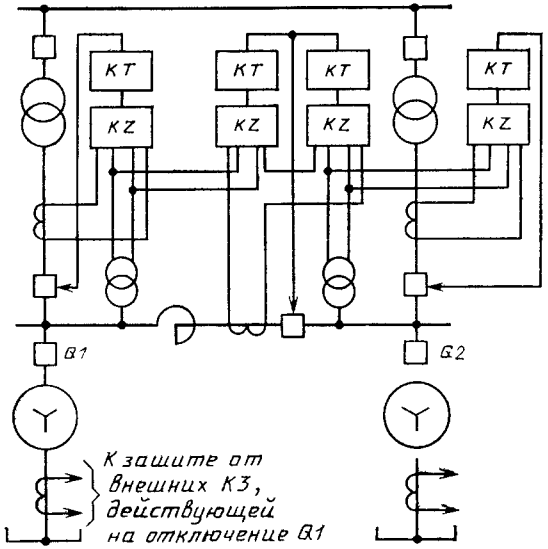


Рис. 11.5. Дистанционная защита секций шин генераторного напряжения

зывающих защищаемую секцию с другими частями системы, имеющими источники питания (например, на трансформаторе, секционном реакторе). На генераторе секции специальная дистанционная защита не предусматривается, если считается допустимым использовать для рассматриваемой цели его защиту от внешних КЗ (см. гл. 12). Защита на секционном выключателе предназначается для действия на обеих смежных секциях, поэтому она имеет два комплекта органов сопротивления, включаемых на общую группу *TA* и питаемых от *TV* смежных секций.

Выдержка времени $t^{II}_{ш}$ предотвращает срабатывание защиты при КЗ в статорной обмотке генератора и со стороны генераторного напряжения трансформаторов секции, имеющих дифференциальные токовые защиты. Сопротивление срабатывания отстраивается от минимального сопротивления $Z_{в\,min}$ на зажимах при КЗ за сосредоточенными

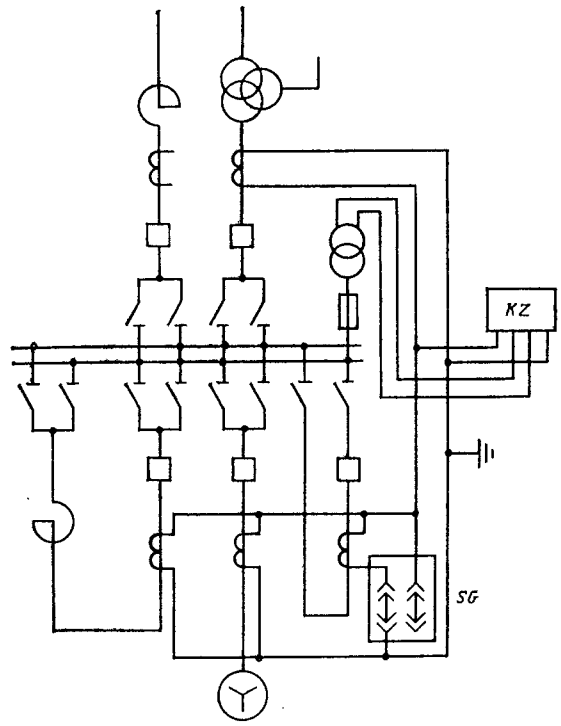


Рис. 11.6. Совмещенная структурная схема дистанционной защиты шин с включением органа сопротивления на сумму токов питающих элементов

сопротивлениями реакторов и трансформаторов. Для повышения чувствительности, сокращения аппаратуры, выполнения без выдержки времени защиту (второй вариант) целесообразно включать на сумму токов питающих элементов (рис. 11.6); чувствительность ее при этом повышается за счет исключения отстройки от КЗ за трансформаторами и секционным реактором, имеющими сопротивление, меньшее сопротивления реакторов питаемых линий. В настоя-

щее время защита используется редко, так как ее заменила для рассмотренной схемы так называемая *неполная дифференциальная токовая защита* (см. § 11.9).

11.6. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Принцип выполнения защит рассмотрен в гл. 8. Применительно к защите шин приходится учитывать ряд особенностей, перечисленных ниже.

Возможны большие кратности токов внешних КЗ, не ограничиваемые, как часто в защитах линий, сопротивлением последних. Соотношения при этом иногда получаются такими, что трудно обеспечить для *ТА*, имеющих сердечники без зазоров, полные погрешности $\varepsilon=0{,}1$ даже в установившихся режимах. При этом возникают большие токи небаланса $I_{нб}$, от которых необходима отстройка. С другой стороны, например при повторном включении поврежденных шин устройством АПВ одного из присоединений, токи КЗ, на которые защита должна реагировать, могут быть невелики. Необходимо учитывать, особенно при большом числе присоединений, нарушения цепей *ТА*, возможность переключения элементов разъединителями на разные системы шин и т. д. При выполнении схем защиты проводятся мероприятия, обеспечивающие получение удовлетворительной защиты с учетом приведенных затруднений.

Принципиально возможны два основных выполнения защит — с непосредственным сравнением токов или только их фаз. Фазы вторичных токов *ТА* при внешних КЗ часто искажаются относительно меньше, чем их амплитуды. По этой причине предпочтение могло бы отдаваться схемам со сравнением фаз. Однако при этом, как уже отмечалось для направленных защит (см. § 11.4), приходится учитывать влияние токов нагрузки присоединений, которые могут искажать фазные соотношения. С учетом этого варианты защит со сравнением фаз в отечественной практике широкого распространения не получили и ниже не рассматриваются. Достаточно всестороннее рассмотрение разных вариантов схем и расчет их параметров приведены в [64].

Действующее значение тока небаланса в измерительном органе защиты при принятых условных положительных направлениях (см. гл. 8) и одинаковых K_I трансформаторов тока *ТА* $\underline{I}'_{нб}=-(\underline{I}'_{нам1}+\underline{I}'_{нам2}+\ldots+\underline{I}'_{намn})=-\sum_{n=1}^{n}\underline{I}'_{намn}$. Аналогичное выражение может быть записано и для мгновенных значений токов. Полагая в первом приближении, что основная слагающая $I_{нб}$ определяется $I'_{нам}$ *ТА*, через который проходит полный ток $I_{к,вн}$ внешнего КЗ, получаем для первичного тока небаланса выражение $I_{нб}\approx k_{апер}k_{одн\varepsilon}I_{к,вн}$, где $k_{апер}>1$ учитывает возрастание погрешности в переходном режиме, $k_{одн}\leqslant 1$ — однотипность *ТА* и условий их работы (в данном случае принимается равным 1). С учетом того, что $I_{нб}$ возрастает с увеличением $I_{к,вн}$, для отстройки от него целесообразно использовать принцип торможения от токов в фазах *ТА*. С другой стороны, могут быть большие переходные $i_{нб}$ даже при относительно небольших кратностях $I_{к,вн}$ (выше учитывался $k_{апер}$), от которых хорошую отстройку дает, например, применение промежуточных насыщающихся *ТА* — *TALT*. Сочетание обоих способов отстройки было возможно при использовании реле с магнитным торможением, разработанного в НПИ. В последнем были также предложены *TALT* усиленного действия [56], а затем еще более совершенные их исполнения (см., например, [48]). Все перечисленные реле выполняются на электромеханической элементной базе, и в настоящее время обсуждается вопрос о возможности снятия их с производства. Поэтому ниже рассматриваются более современные выполнения отстройки от токов небаланса. Решение вопроса облегчается тем, что для защит шин токи срабатывания $I_{с,з}$ принято выбирать бо́льшими $I_{раб\,max}$ отдельных присоединений, чтобы иметь возможность осуществлять контроль исправности вспомогательных проводов, соединяющих *ТА* с устройством защиты, и автоматически выводить ее из работы при возникающих нарушениях.

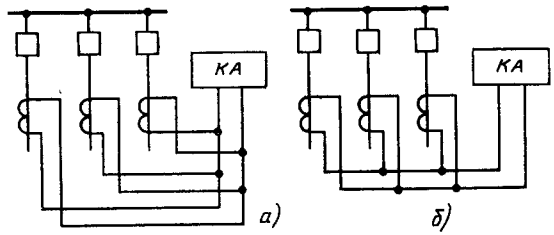


Рис. 11.7. Соединение вторичных обмоток трансформаторов тока дифференциальной токовой защиты шин:

а — на релейном щите; *б* — в распределительном устройстве

Соединительные провода отдельных *ТА* соединяются между собой у измерительного органа (рис. 11.7, *а*) или на сборке в распределительном устройстве (рис. 11.7, *б*). Преимуществом второго способа является экономия в контрольном кабеле, однако его применение оказывается невозможным, например, для защит с торможением, когда к измерительному органу должны подводиться токи фаз присоединений.

При использовании *ТА* с различными K_I часто непосредственно у последних устанавливаются промежуточные *ТА* с $K_{Iпр}>1$, выравнивающие результирующие значения коэффициентов трансформации и одновременно снижающие вторичные токи, что дает возможность применения проводов меньшего сечения.

Ниже рассматриваются принципы выполнения некоторых защит.

11.7. ЗАЩИТА ОДИНОЧНОЙ СИСТЕМЫ ШИН С ТОРМОЖЕНИЕМ НА ВЫПРЯМЛЕННЫХ ТОКАХ

Возможны разные схемы выполнения таких защит (см., например, [64]). Ниже в первую очередь приводится вариант, рассматриваемый в отечественной литературе и широко применяемый за рубежом. В нем осуществляется сравнение дифференциального тока $|\underline{I}_д|$, определяемого выпрямленной суммой токов $|\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}+...+\underline{I}_{2n}|$, с тормозным током $|\underline{I}_{торм}|$, определяемым суммой выпрямленных значений тех же токов $|\underline{I}_{2I}|+|\underline{I}_{2II}|+...+|\underline{I}_{2n}|$. Указанное сравнение производится в реагирующем направленном органе, включаемом на разность рабочей и тормозной величин (рис. 11.8). В такой схеме при внешних КЗ, считая

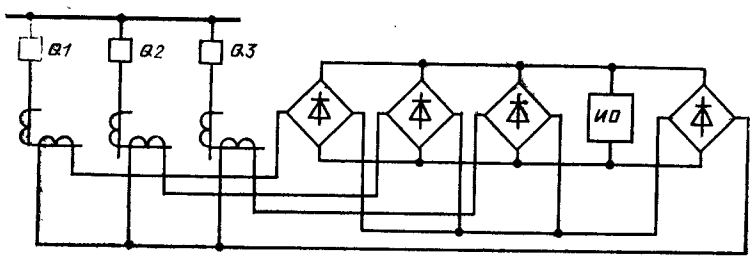


Рис. 11.8. Выполненне дифференциальиой токовой защиты шнн с торможением на выпрямленных токах

токи, подходящие к шинам и отходящие от них, совпадающими по фазе, ток $I_з=0$ при точной трансформации или $I_з=I_{нб}$ при наличии токов намагничивания *ТА*; в случае КЗ на шинах $I_з\approx I_к$ в точке КЗ и защита будет срабатывать, если ток $I_{торм}$ меньше указанной выше суммы.

Уравнение срабатывания схемы по этому варианту имеет вид $|\underline{I}_д|-k_{торм}|\underline{I}_{торм}|\geqslant I_{с.з min}$ или $|\underline{I}_{2I}+\underline{I}_{2II}+...+\underline{I}_{2n}|-k_{торм}(|\underline{I}_{2I}|+|\underline{I}_{2II}|+...+|\underline{I}_{2n}|)\geqslant I_{с.з min}$, где $k_{торм}<1$. В общем случае условие срабатывания защиты принято (см. гл. 8) характеризовать выражением $I_{с.з}=I_{с.з min}+k_{торм}I_{торм}$. Применительно к защите шин $I_{с.з min}$ определяется условием отстройки от $I_{раб max}$ элемента, появляющегося в рабочей цепи защиты при разрыве цепи вторичной обмотки *ТА* этого элемента. В этом случае тормозной ток будет определяться суммой токов всех присоединений, за исключением указанного $I_{раб max}$ одного присоединения, и $I_{с.з min}+k_{торм}(I_{\Sigma нагр}-I_{нагр max})=k'_{отс}I_{раб max}$. Для внешнего КЗ за расчетный случай для выбора торможения можно принять режим, когда суммарный ток $I_{к.вн max}$ проходит по одному элементу, суммируясь из токов всех других элементов. Тогда суммарное торможение будет определяться примерно удвоенным $I_{к.вн max}$, а с учетом погрешности в токе f_i (которая может быть много больше 0,1) *ТА* с током $I_{к.вн max}$ — выражением $(2-f_i)\times I_{к.вн max}$.

Уравнение для тормозной характеристики будет при этом иметь вид

$$I_{с.з min}+k_{торм}(2-f_i)I_{к.вн max}=k''_{отс}\varepsilon I_{к.вн max}.$$

Совместный учет двух приведенных отношений (с запасом) в первом приближении дает возможность окончательного определения членов выражения для тока $I_{с.з}$: $I_{с.з min}=k_{отс}I_{раб max}$ и $k_{торм}=k_{отс}\varepsilon/(2-f_i)$.

Разработка отечественной защиты и методов выбора ее параметров с учетом сформулированных выше особенностей для шин была осуществлена ОРЗАУМ ЭСП (Г. Т. Грек и С. Я. Петров). В общем случае условие срабатывания этой схемы $|\underline{I}_д|-k_{торм}(|\underline{I}_{торм}|-|\underline{I}_д|)\geqslant I_{с.з min}$. Таким образом, этот вариант отличается от рассмотренного выше тем, что в нем торможение определяется как разность ранее использованных $|\underline{I}_{торм}|$ и $|\underline{I}_д|$. При этом новое значение $k_{торм}$ обычно выбирается несколько бо́льшим. Отличительной особенностью варианта является близкое

к нулю торможение при внутренних КЗ. Однако результирующий эффект схемы, как и подобных ей схем на индукционных системах, как было показано в работах ОРЗАУМ ТЭП (см., например, [10]) оказывается тем же, что и для первого варианта защиты.

Необходимо отметить, что максимальные допустимые значения $k_{торм}$ (в рассмотренном его понимании) по условиям чувствительности защиты всегда меньше 1. Для некоторых схем электрических соединений значения $k_{торм}$ могут ограничиваться и токами нагрузки, создающими значительные тормозные токи. Такие случаи наиболее вероятны, когда защита защищает двойную систему шин. Тогда при КЗ на опробуемой или включаемой АПВ системе шин при большой нагрузке другой работающей системы или при КЗ на одной из систем шин, работающих с отключенным шиносоединительным выключателем, но связанных через систему, $k_{торм}$ выбирают меньше 0,35 [10]. Для общего повышения чувствительности в рассмотренном случае включения системы шин возможно предусматривать временное автоматическое снижение $k_{торм}$.

Чувствительность защиты определяется в соответствии с условиями гл. 8, с тем уточнением, что расчет можно проводить без учета $R_п$, которые при КЗ на шинах обычно малы.

Рассмотренный в защите принцип торможения не дает непосредственной отстройки от переходных слагающих $i_{нб}$. Поэтому для уменьшения влияния на работу измерительного органа указанных слагающих в схеме предусматриваются упрощенные фильтры. Возможно также предусматривать дополнительные элементы, исключающие торможение при небольших тормозных токах (например, в пределах $I_{раб}$ элементов — гл. 8).

Защита по разработке ОРЗАУМ ТЭП прошла длительную положительную эксплуатационную проверку и используется при $U_{ном} \geqslant 110$ кВ для разных главных схем электрических соединений электроустановок, если более простые защиты, например с промежуточными насыщающимися *ТА (TALT)*, не обеспечивают необходимой чувствительности. Принципы защиты могут быть также с успехом использованы для осуществления специальных защит ошиновок блоков генератор—трансформатор (см. гл. 13) и в других аналогичных случаях.

Пример структурной схемы защиты для одиночной системы шин приведен на рис. 11.9. Устройство контроля

исправности вспомогательных проводов УК действует на сигнал и автоматически выводит защиту из работы с выдержкой времени, большей максимальных выдержек времени защит элементов (для предотвращения излишних срабатываний при КЗ в системе). Устройство имеет самоудержание, снимаемое вручную. Устройство контроля в виде ИО тока (реле КА на схеме на рис. 11.9) может включаться в нулевой провод дифференциальной защиты или в три фазы дифференциальной цепи (возможно использование трехфазного ИО) для охвата случаев одновременного нарушения цепей *ТА* всех фаз. Его ток сраба-

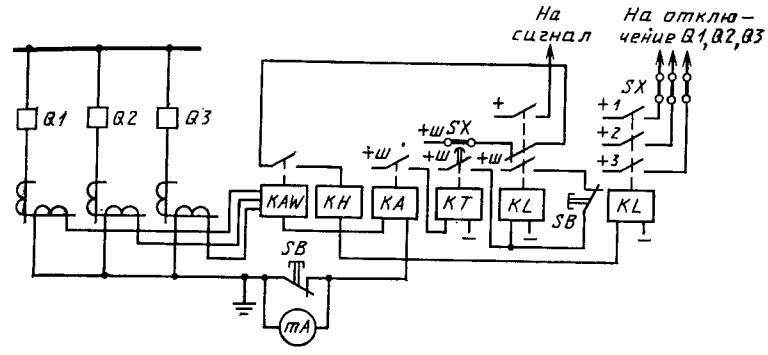


Рис. 11.9. Пример совмещенной структурной схемы защиты по рис. 11.8

тывания отстраивается только от $I_{нб}$ рабочих режимов. Последовательно с ним включается нормально зашунтированный миллиамперметр *mA*. Оперативный ток к защите подводится через отдельные предохранители (автоматические выключатели) от шинок управления. Отключающие сигналы на выключатели подаются отдельно от цепей управления последних.

Защитное заземление вторичных цепей *ТА* осуществляется не у каждой группы *ТА* элемента, а в одной общей точке у места установки устройства защиты (для исключения появления в дифференциальных цепях токов наводок и т. п.).

Выше рассмотрен один из наиболее работоспособных вариантов дифференциальной защиты шин. Возможны и другие ее исполнения. В связи с этим применительно к микроэлектронной элементой базе, дающей возможность осуществления весьма быстродействующих устройств, за-

служивает внимания вариант с использованием мгновенных значений токов (см. гл. 5), которые в первые миллисекунды трансформируются *ТА* со стальными сердечниками достаточно точно, если даже в следующие доли первого периода они начинают насыщаться, нарушая точность трансформации и резко увеличивая погрешности в токе $\dot{I}_i$.

Принципиально в этом случае могут быть использованы приведенные выше соотношения, в которых значения выпрямленных токов $|\underline{I}|$ заменяются их мгновенными значениями $|i|$. Имеются также разработки НЭТИ (Л. В. Багинский), предусматривающие торможение при небольших кратностях токов внешних КЗ и переход на сравнение фаз при больших.

11.8. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ШИН, РАБОТАЮЩИХ С ФИКСИРОВАННЫМ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ С ОДНИМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

Рассмотренная выше защита пригодна для одиночной системы шин или других систем шин, в которых могут быть выделены секции, к которым элементы присоединяются однозначно через выключатели с относящимися к ним ТА.

К середине 30-х годов встал вопрос о повышении надежности работы электроустановок с $U_{ном} > 110$ кВ. Они обычно имели две системы шин с одним выключателем на присоединение и шиносоединительным выключателем, причем только одна система использовалась для нормальной работы присоединения. Для повышения надежности было предложено работать на двух системах с соответствующим распределением элементов между ними. К релейной защите предъявлялось требование при КЗ на шинах отключать только одну поврежденную систему. Этому требованию не удовлетворяет обычная дифференциальная токовая защита. В СРЗиУ ТЭП (П. И. Устиновым и Л. Е. Соловьевым) и Мосэнерго (И. И. Соловьевым) был разработан ряд специальных выполнений дифференциальных защит для этого случая. Было признано необходимым для создания приемлемой защиты предусматривать закрепление (фиксирование) элементов за системами шин. Эффективность такой работы значительно повысилась при последующем широком использовании обходной системы шин, так как при этом отпала необходимость при ревизии выключателей переводить все элементы на одну систему шин. При закреплении элементов за системами шин в СРЗиУ ТЭП и ЭСП удалось создать устройства защиты, получившие широкое распространение на практике, которые имеют, однако, следующий недостаток: при нарушении фиксации и КЗ на одной из систем шин могут отключаться обе.

Для предотвращения этого необходимо производить переключения в цепях переменного и оперативного тока элемента с нарушенной фиксацией.

Шины при фиксированном присоединении элементов имеют общую дифференциальную защиту, охватывающую обе системы шин и не различающую, на какой из них произошло повреждение, и избирательную часть, выявляющую поврежденную систему шин. Эта часть может осуществляться по-разному. В выполнении, предложенном в 30-е годы (П. И. Устиновым), она содержит еще две дифференциальные токовые защиты, охватывающие отдельно

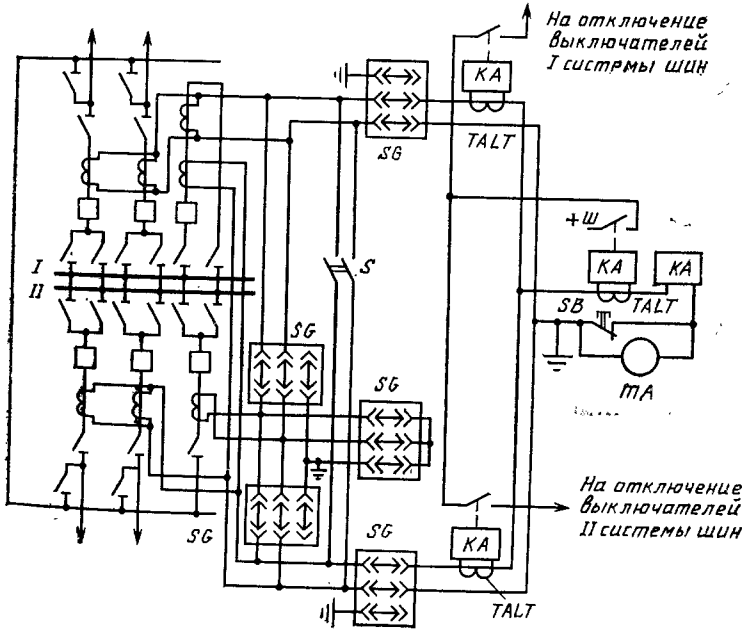


Рис. 11.10. Совмещенная структурная схема дифференциальной токовой защиты двойной системы шин с тремя комплектами ИО

каждую из систем шин. В 60-е годы Г. Т. Греком и С. Я. Петровым был разработан вариант защиты, в котором специальный избирательный орган производит сравнение абсолютных значений дифференциальных токов, относящихся к соответствующим системам шин. Для неповрежденной системы шин сравниваемый ток близок к нулю, для поврежденной — к току в месте повреждения.

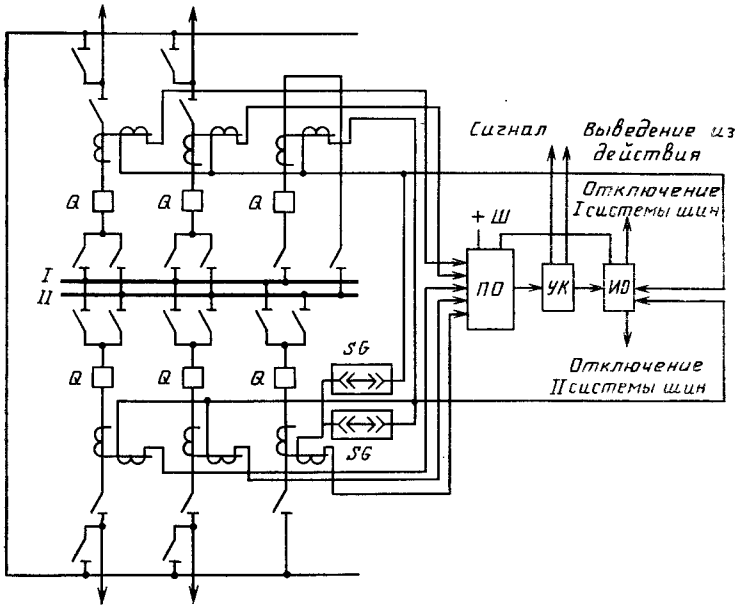


Рис. 11.11. Совмещенная структурная схема дифференциальной токовой защиты двойной системы шин с одним ИО и специальным избирателем поврежденной системы шин

Дифференциально включенные измерительные органы защит выполняются по-разному. Широко применялись органы тока с насыщающимися промежуточными *ТА*, детально разработанные в НПИ (см. гл. 8) для отстройки от однополярных переходных токов небаланса. Их применению способствовало и то обстоятельство, что $I_{с,з}$ обычно выбирается бо́льшим $I_{рабmax}$ присоединений для предотвращения ложных срабатываний при обрывах во вторичных цепях *ТА*. Во втором варианте защиты отстройка от токов небаланса осуществляется комбинированным применением торможения от арифметической суммы токов всех присоединений и частотных фильтров (см. § 11.7).

Структурные схемы защит по двум рассмотренным вариантам приведены соответственно на рис. 11.10 и 11.11, а подробное описание их принципиальных схем — например в [10].

11.9. НЕПОЛНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ

Стремление упростить выполнение дифференциальных токовых защит привело к созданию в 30-е годы в СРЗиУ ТЭП *неполных дифференциальных защит*. Они обычно по существу представляют токовые ступенчатые защиты, вклю-

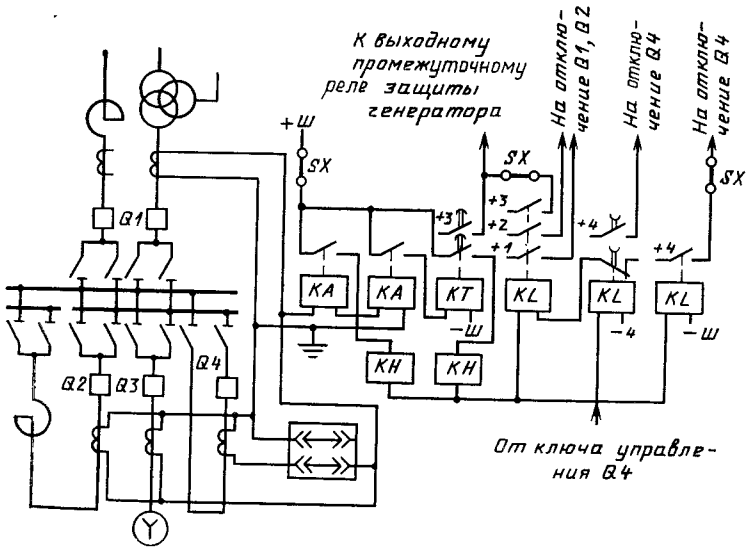


Рис. 11.12. Совмещенная структурная схема неполной дифференциальной токовой защиты секций шии генераторного напряжения

чаемые на сумму токов питающих элементов. Структурная схема двухступенчатой (с I и III ступенями) защиты применительно к секционированным шинам генераторного напряжения станции, питающим реактированные линии, приведена на рис. 11.12. Измерительные органы тока включены на сумму токов *ТА* питающих элементов (генератора, трансформатора связи с системой, секционного реактора) и дополнительно трансформатора собственных

нужд, если выключатель последнего, как обычно бывает, рассчитан на отключения КЗ на его втулках. Трансформатор тока шиносоединительного выключателя включается в схему защиты, только когда через этот выключатель питаются линии, выделенные на резервную систему шин.

Первая ступень (отсечка без выдержки времени) является основной. Ее ток срабатывания выбирается больше максимального тока в защите при КЗ за реакторами линий, не охваченными *ТА* защиты: $I^{I}_{с,з}=k_{отс}I_{к,вн max}$, где $k_{отс}>1$ должен учитывать наличие тока нагрузки, продолжающего проходить по неповрежденным реактированным линиям за счет остаточного напряжения на секции. Третья ступень представляет резервную максимальную токовую защиту. При выборе ее тока срабатывания в общем случае должен учитываться случай КЗ на смежной секции шин, когда ее заторможенная нагрузка с помощью АВР у потребителей частично или полностью подсоединяется к неповрежденной секции. С учетом этого в предположении, что ИО тока в действие не приходили, $I^{III}_{с,з}\geqslant k_{отс}\times$ $\times(k'_з I_{раб,норм}+k''_з I_{раб,доп})$, где $k'_з$ и $k''_з$—коэффициенты запуска (см. гл. 5). Иногда приведенное выражение оказывается расчетным. Другие условия для выбора $I^{III}_{с,з}$ рассмотрены в гл. 5. Выдержка времени ступени $t^{III}=t_{л max}+\Delta t$. Одним из существенных недостатков защиты может являться недостаточная чувствительность первой, основной ее ступени. Этот недостаток снижается при замене в ней органа тока на комбинированную отсечку по току и напряжению (см. гл. 5) или на ненаправленный орган полного сопротивления (см. § 11.5). Обеспечение достаточной чувствительности III резервной ступени при КЗ за реакторами линий является трудной задачей. При используемом на практике присоединении линий через групповые реакторы (присоединяемые к шинам без выключателей) III ступень должна была бы являться и основной защитой на участке за реактором до места, где начинают работать защиты линий. Для таких схем ТЭП предусматривает дополнительные максимальные токовые защиты, *ТА* которых включаются между шинами и реактором; эти защиты обычно через общий для них орган выдержки времени действуют на отключение тех же элементов, что и основная защита шин.

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют два основных способа защиты шин от КЗ и в каких случаях применяется каждый из них?
2. Какие виды специальных защит наиболее часто используются для защиты шин?
3. Какие особенности условий работы нужно учитывать при осуществлении дифференциальных токовых защит шин?
4. Какие принципы выполнения дифференциальных защит шин используются в отечественной практике?

Глава двенадцатая

ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

12.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Синхронные генераторы могут работать непосредственно на шины генераторного напряжения (рис. 12.1, *а*), в блоках с трансформаторами, в блоках с трансформаторами и с ответвлениями, питающими потребителей на генераторном напряжении, например, местную нагрузку (рис. 12.1, *б*, *в*), и по некоторым другим главным схемам электрических соединений станций. Во всех этих случаях при $U_{ном,г}>1$ кВ система генераторного напряжения в отечественной практике работает с нейтралями изолированными или (редко) заземленными через дугогасящий реактор.

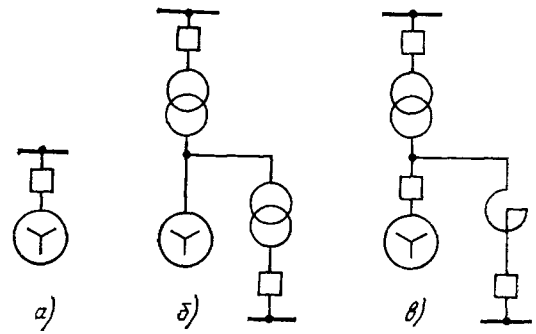


Рис. 12.1. Варианты схем включения генераторов в систему

Поэтому при выполнении защиты, как правило, соединяемых в звезду обмоток статоров генераторов учитываются все виды многофазных КЗ и однофазные замыкания. Последние для генераторов в отличие от линий возможны двух видов: $K_з^{(1)}$ на землю (на заземленный корпус статора) и $K_в^{(1)}$ — витковое — КЗ между витками одной фазы (см. табл. 1.1). Необходимо учитывать, что возникновение всех перечисленных повреждений возможно в любых частях обмоток, а также что один вид повреждения может переходить в другой, более сложный, например сочетание $K_з^{(1)}$ с $K_в^{(1)}$.

Опасность для генераторов определяется прежде всего дугой в месте повреждения. Дуга на корпус статора вызывает оплавление активной стали последнего, что может повлечь за собой серьезный ремонт, обусловленный необходимостью переборки нормально изолированных друг от друга листов стали. Возможно также сильное выгорание изоляции проводов обмоток и самих проводов.

Замыкание на землю в одном месте обмотки возбуждения (на заземленный вал ротора генератора) непосредственной опасности не представляет. Однако возникновение пробоя во втором месте (одновременное возникновение пробоев в двух местах обычно не учитывается) может приводить к тяжелым последствиям. Необходим также учет возможных повреждений в устройствах, питающих обмотку возбуждения.

Несвоевременное отключение поврежденного генератора может также нарушить работу остальной части электрической системы.

Защиты, реагирующие на те повреждения в генераторе, которые представляют непосредственную опасность для генератора и системы в целом, должны действовать без выдержки времени на отключение выключателей генератора, гашение его магнитного поля, остановку турбины, а на гидростанциях — также на тушение пожара. Гашение поля должно осуществляться по возможности быстро и полно, так как им определяется прекращение прохождения токов повреждения.

Основными ненормальными режимами работы генераторов являются сверхтоки внешних КЗ и перегрузок, потеря возбуждения (которую можно рассматривать и как нарушение в системе возбуждения) и недопустимые повышения напряжения.

Особенно опасными являются несимметричные сверхтоки. Защиты от внешних КЗ, своевременно не ликвидированных защитами поврежденных элементов, действуют на отключение выключателей генератора и гашение магнитного поля; последнее предотвращает недопустимое повышение напряжения на отключаемом генераторе. При возникновении симметричной или несимметричной перегрузки на генераторах с косвенным охлаждением обмоток защиты действуют на сигнал, а на генераторах с непосредственным охлаждением обмоток и гидрогенераторах автоматизированных гидростанций — дополнительно на отключение, если недопустимую перегрузку не удается своевременно устранить. Недопустимые для генераторов несимметричные сверхтоки могут также возникать при недоотключении или недовключении фаз выключателями (например, выключателями высшего напряжения блоков).

Потеря возбуждения определяется нарушениями в системе возбуждения. Генератор в этом случае переходит в асинхронный режим работы со скольжением, достигающим нескольких процентов рабочей частоты. Генератор может продолжать выдавать активную мощность, получая возбуждение за счет реактивной мощности из системы. Однако такой асинхронный режим даже со сниженной нагрузкой длительно недопустим, так как вызывает перегревы в частях генератора, а иногда и более тяжелые последствия. Поэтому на современных мощных генераторах предусматриваются защиты, реагирующие на потерю возбуждения и при необходимости отключающие генератор.

Возможен и другой асинхронный режим работы генератора с исправной системой возбуждения. Он возникает при выходе генератора или групп генераторов из синхронизма по отношению к остальной части системы. Такой режим часто называют асинхронным ходом. Он недопустим как для генераторов, так и для системы в целом. Обычно считается, что асинхронный ход должен ликвидироваться не защитами элементов, а специальными устройствами противоаварийной автоматики системы. Последствия асинхронного хода для генератора могут быть очень тяжелыми. Так, например, были случаи возникновения у современных мощных машин при резонансных явлениях крутящих моментов на валу, значительно превышающих моменты при трехфазных КЗ на их зажимах, что приводило к разрушениям машин. Поэтому устройства противоаварийной автоматики часто выполняются действующими

не после проворота роторов генераторов на 360° (относительно системы), а при расхождении векторов напряжений по концам линий электропередачи на определенный угол. В последние годы машиностроители выдвигали требование ограничивать для некоторых типов мощных машин угол отключения оси ротора с установкой для этого индивидуальных устройств на генераторах. При этом возникает вопрос согласования их действия с устройствами противоаварийной автоматики. Таким образом, вопрос о способах предотвращения и ликвидации асинхронного хода генераторов находится еще в стадии уточнения.

При выполнении защит генераторов учитываются также недопустимые перегрузки цепей ротора и повышения напряжения.

На гидрогенераторах значительные повышения напряжения могут возникать, например, при сбросах нагрузки вследствие относительно медленного действия их регуляторов скорости и инерционности направляющего аппарата турбин.

На турбо- и гидрогенераторах предусматривается чувствительная защита от повышения напряжения в режиме холостого хода. Она автоматически выводится из работы при наличии тока в фазах статора.

В настоящее время широко используются машины с непосредственным охлаждением проводников обмоток водородом и водой. Экономически они весьма эффективны. Однако допускаемые в них повышенные плотности токов в проводниках обмоток и увеличенные расчетные индукции в стали магнитных систем предъявляют повышенные требования к защитам, усложняют их выполнение.

Необходимо также отметить, что достаточно сложные технологические защиты агрегатов (ниже не рассматриваемые) требуют иногда использования датчиков, включаемых на ИП тока и напряжения генераторов. С другой стороны, эти защиты могут, как и другие защиты генераторов, действовать на отключение выключателей, гашение поля (см., например, [65, 66]).

12.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТАМ

Многофазные КЗ. Определение токов в обмотках статоров при внешних КЗ, в том числе и на выводах, когда относительное число замкнувшихся витков $\alpha_{max}=1$, производится известными способами (см., например, [29]). Значительно более сложным является определение токов при КЗ внутри этих обмоток (см., например, [67]). Поэтому ниже дается только ориентировочная качественная оценка получающихся соотношений для наиболее простого случая — $K^{(3)}$ в двухполюсном турбогенераторе (число оборотов $n=3000$ 1/с), отсоединенном от системы (рис. 12.2, *а*). Место повреждения характеризуется долей α замкнувшихся витков, отсчитываемых от нейтрали обмотки. Периодическая слагающая тока $\underline{I}^{(3)}_{к\alpha}=\underline{E}_{\phi\alpha}/(R_п+\underline{Z}_\alpha)$, где $E_{\phi\alpha}\approx\alpha E_\phi$, $R_п$ — переходное сопротивление в месте повреждения, $\underline{Z}_\alpha=R_\alpha+jX_\alpha$, $R_\alpha=\alpha R$, X_α можно приближенно считать для рассматриваемого случая пропорциональным α^2. Тогда $I^{(3)}_{к\alpha}=\alpha E_\phi/\sqrt{(R_п+\alpha R)^2+\alpha^4 x^2}$. Зависимости $I^{(3)}_{к\alpha}$ от α для $R_п=0$ и $R_п\neq 0$ приведены на рис. 12.2, *б*. Они справедливы, очевидно, до α_{min}, соответствующего одному витку. Рассмотрение этих зависимостей и некоторые другие данные, их подтверждающие, дают возможность сделать следующие выводы: ток КЗ при $R_п=0$ возрастает с уменьшением α, поскольку реактивное сопротивление уменьшается быстрее, чем ЭДС; минимальный ток соответствует $\alpha=1$ и равен для $t=0$ E_ϕ/X''_d; при повреждениях через $R_п$ ток при небольших α может снижаться до малых значений.

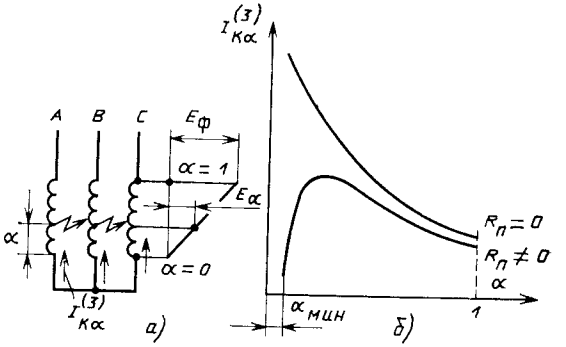


Рис. 12.2. Симметричное замыкание между тремя фазами обмотки статора:

а — схема поврежденной обмотки и зависимость ЭДС от доли α замкнувшихся витков; *б* — зависимость тока КЗ от доли α замкнувшихся витков двухполюсного генератора

В случаях других видов многофазных КЗ зависимости

$I_{к\alpha}$ от α качественно остаются такими же, как и для $K^{(3)}$ (см., например, [68]). При этом для $K^{(1,1)}_{дв}$ следует учитывать возможность малых $I_{к\alpha}$ даже при $R_п=0$ за счет добавочных сопротивлений в петле КЗ, например, реакторов на линиях генераторного напряжения. Для многополюсных машин (например, гидрогенераторов) зависимость $I_{к\alpha}=f(\alpha)$ является значительно более сложной, причем по данным лаборатории имени А. А. Смурова и дальнейшим более глубоким работам токи $I_к$ могут быть значительно меньшими, чем для двухполюсных машин.

С учетом возможных тяжелых последствий внутренних многофазных КЗ считается необходимым выполнять защиту от них быстродействующей, реагирующей на повреждение в любом месте обмотки.

Витковые КЗ. Они для генераторов с обмоткой, не имеющей параллельных ветвей (рис. 12.3, *а*), характери-

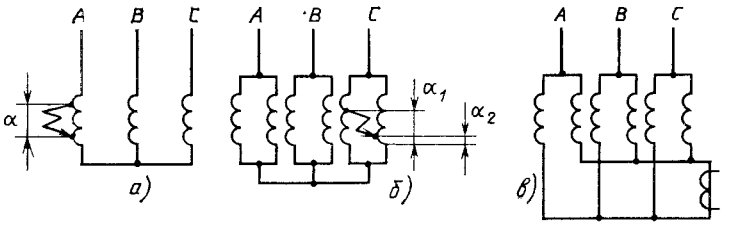


Рис. 12.3. Витковые замыкания в обмотке статора

зуются долей α замкнувшихся витков; у генераторов с обмотками, имеющими параллельные ветви (рис. 12.3, *б*), возможны также замыкания между витками этих ветвей. Для виткового КЗ по рис. 12.3, *а* легко рассчитывается случай с $\alpha_{max}=1$. Ему соответствует однофазное КЗ с периодической слагающей тока $I^{(1)}_к=3E_ф/(X''_d+X_2+X_0)$. Сопротивление нулевой последовательности X_0 для генераторов в отличие от линий значительно меньше $X_1=X''_d$, и поэтому ток виткового КЗ при $\alpha=1$ значительно больше $I^{(3)}_к$. Учитывая это, можно полагать, что токи витковых повреждений для обмотки по рис. 12.3, *а* двухполюсных турбогенераторов при $\alpha<1$, как и при междуфазных КЗ, могут быть весьма большими, требующими быстрой ликвидации повреждения. С другой стороны, для случая

по рис. 12.3, *б* при $\alpha_1\approx\alpha_2$ эти токи могут быть весьма малыми. Для многополюсных машин следует учитывать соображения, рассмотренные выше для междуфазных КЗ.

С учетом всего изложенного, было бы желательно иметь от витковых КЗ быстродействующую защиту, реагирующую по возможности на все разновидности этих повреждений. Создание такой универсальной защиты оказалось затруднительным. Поэтому специальные защиты обычно устанавливаются только на генераторах, имеющих выведенные параллельные ветви обмоток, когда удается выполнить достаточно приемлемые устройства, особенно при соединении ветвей обмоток в две звезды с соединением их нейтралей между собой (рис. 12.3, *в*). При отсутствии специальной защиты рассчитывают на действие при витковых КЗ защит от $K^{(1)}_з$, поскольку практически витковые повреждения почти всегда начинаются или сопровождаются $K^{(1)}_з$. Учитывая это, желательно иметь защиты от $K^{(1)}_з$, охватывающие все 100 % витков обмоток и действующие по возможности без выдержки времени.

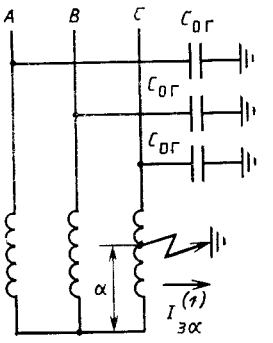


Рис. 12.4. Однофазное замыкание на землю доли α витков фазы обмотки статора

Однофазные замыкания на землю. Как указывалось выше, нейтрали в системе генераторного напряжения бывают изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы. При определении зависимости $I^{(1)}_з$ от доли замкнувшихся витков α, отсчитываемых от нейтрали генератора (рис. 12.4), пренебрегают всеми сопротивлениями, за исключением емкостных сопротивлений фаз на землю всей системы генераторного напряжения (включая емкости фаз обмотки генератора), индуктивных сопротивлений дугогасящих реакторов и переходных сопротивлений $R_п$. На рис. 12.4 емкости $C_{0г}$ показаны сосредоточенными на зажимах генератора, система предполагается работающей с изолированной нейтралью. Для определения установившегося тока основной гармоники $I^{(1)}_{зα}$ целесообразно использовать метод наложения (см. гл. 1 и 9). Ток $I^{(1)}_{зα}$, представляющий утроенную аварийную слагающую тока нулевой последовательности, будет определяться напря-

жением в месте пробоя $U_\alpha = \alpha E_\phi$, равным аварийному напряжению нулевой последовательности. Его значение $I^{(1)}_{з\alpha} = 3\alpha E_\phi / |Z_{0э} + R_п|$, или при $R_п = 0$ $I^{(1)}_{з\alpha} = 3\alpha E_\phi / (1/\omega C_{0г}) = 3\alpha\omega C_{0г} E_\phi$. Таким образом, $I^{(1)}_{з\alpha}$ в отличие от токов при междуфазных и витковых КЗ прямо пропорционален числу витков. При замыкании у нейтрали $I^{(1)}_{з\alpha} = 0$. Непосредственную опасность представляют $K^{(1)}_з$, при которых в месте повреждения поддерживается дуга, оплавляющая активную сталь статора. Возможность возникновения дуги одно время косвенно оценивалась минимальным напряжением αU_ϕ, способным ее поддерживать. Такой подход имел ряд недостатков, и в начале 50-х годов в отечественной практике стали оценивать опасность повреждения непосредственно током в месте $K^{(1)}_з$. За опасный, требующий автоматической ликвидации, был принят ток $I^{(1)}_з \geqslant 5$ А. При этом с учетом работ лаборатории имени А. А. Смурова допускалось действие защит на отключение с выдержкой времени, а при токах, меньших 5 А — только на сигнал.

При таком подходе допускалось иметь защиты, действующие на отключение, не охватывающие все 100 % витков обмотки. Защиты генераторов, работающих непосредственно на шины, при полной компенсации емкостных токов могли бы срабатывать только при $K^{(1)}_з$ с нарушенной компенсацией, когда ток $I^{(1)}_{з\alpha}$ достигал 5 А и более.

В последние годы рассмотренный подход к требованиям по выполнению защиты от $K^{(1)}_з$, особенно для мощных генераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток статора, подвергся существенным уточнениям. Это определяется рядом обстоятельств. Непосредственно опасными для современных мощных генераторов, например по данным чехословацких специалистов, могут быть токи $I^{(1)}_з$, существенно меньшие 5 А. В эксплуатации отмечались случаи пробоев вблизи нейтралей обмоток, обусловленные, например, постепенным снижением изоляции обмоток при их внутреннем охлаждении водой, а также механическими причинами. Своевременно не выявленные $K^{(1)}_з$ могут переходить в очень опасные витковые КЗ и даже $K^{(1,1)}_{дв}$. Защита от $K^{(1)}_з$, охватывающая всю обмотку и действующая на отключение, может (как указывалось выше) защищать генератор и от витковых КЗ, если они сопровождаются замыканиями на землю.

Поэтому в настоящее время считается необходимым на генераторах, работающих в блоках с трансформаторами (автотрансформаторами), иметь защиту от $K^{(1)}_з$, охватывающую все 100 % витков обмотки, поскольку имеются для этого необходимые устройства. Для генераторов, работающих на шины, где осуществление таких 100 %-ных защит более затруднительно, допускают применение вариантов с «мертвыми» зонами у нейтралей.

Несимметричные сверхтоки. Ниже под несимметричными сверхтоками будут пониматься токи в обмотках статора, характеризующиеся наличием в них составляющих обратной последовательности, значения которых превышают длительно допустимые для генераторов. Составляющие I_2 создают магнитное поле, вращающееся относительно ротора с удвоенной частотой и индуктирующее в нем токи двойной частоты. Эти токи создают опасные местные нагревы в контактных переходах торцевой зоны бочки ротора. Значительные I_2 вызывают также, например у некоторых типов гидрогенераторов, сильную механическую вибрацию агрегатов. Поэтому длительно допустимой считается работа с током I_2, не превосходящим примерно 7÷20 % $I_{ном,г}$ (в зависимости от типа генератора). В течение ограниченного времени по условию допустимого нагрева частей ротора могут допускаться значительно бо́льшие I_2.

Зависимость допустимой длительности (в секундах) наличия составляющей обратной последовательности тока в обмотке статора генератора принято характеризовать уравнением адиабатического процесса

$$t_{доп} = A / I_{2*}^2, \qquad (12.1)$$

где I_{2*} — относительное значение эквивалентного среднеквадратичного тока обратной последовательности в долях $I_{ном,г}$, определяемое по выражению

$$I_{2*} = \frac{1}{I_{ном,г}} \sqrt{\frac{1}{t_{доп}} \int_0^{t_{доп}} i_2^2(t)\, dt};$$

A — постоянная для данного типа генератора величина, значение которой численно равно допустимой длительности работы генератора в секундах при токе $I_2 = I_{ном,г}$, т. е. $I_{2*} = 1$.

Значения величины A измеряются в довольно широких пределах: для турбогенераторов — примерно от 30 с (с косвенным охлаждением) до 6 с (с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора и мощностью более 800 МВт); для гидрогенераторов с косвенным охлаждением $A \approx 40$ с и с непосредственным — 20 с. Возможный подход к уточнению A дан в [65].

Действительные условия нагрева частей ротора токами I_2 оказываются значительно более сложными. При небольших I_2 процесс оказывается неадиабатическим и действительные $t_{доп}$ могут быть и больше; наоборот, при значительных I_2 возможны местные более опасные перегревы [76]. Тем не менее выражение (12.1) получило широкое применение при выборе параметров срабатывания и оценке защит, действующих как при возникновении сверхтоков перегрузки токами I_2, вызванными разными причинами (разрывы фаз в системе, недоотключения и недовключения фаз выключателей и т. п.), так и при сверхтоках внешних несимметричных КЗ.

От внешних, в том числе особо тяжелых несимметричных КЗ, не отключенных защитами смежных поврежденных элементов вследствие отказа их защит или выключателей, на генераторах устанавливаются специальные защиты с относительной селективностью, поскольку основные защиты генераторов от внутренних КЗ выполняются с абсолютной селективностью. Для обеспечения большей чувствительности к несимметричным КЗ они обычно имеют отдельные части (ступени) в виде токовых защит с независимой характеристикой $t=f(I_2)$, включаемых на составляющие I_2, причем число ступеней бывает различным.

При выполнении таких защит учитывается следующее:

1) желательно обеспечить действие защиты на отключение во всем диапазоне возможных значений опасных токов обратной последовательности. Допускается действие на сигнал при малых значениях I_2, когда в соответствии с (12.1) $t_{доп}$ оказывается достаточным (несколько минут) для принятия мер дежурным персоналом по ликвидации несимметричного режима;

2) допускается не согласовывать по чувствительности части защиты, действующие при небольших I_2 (обусловленных, например, ненормальными режимами), с защитами смежных элементов;

3) время срабатывания $t_{с.з}=f(I_2)$ ступенчатой защиты должно быть меньше $t_{доп}$, определяемого (12.1);

4) трудности согласования по времени или чувствительности ступеней защиты, действующих при значительных токах, с резервными защитами смежных элементов.

На блочных генераторах применяется защита, имеющая орган с интегрально-зависимой характеристикой, соответствующей выражению (12.1). В этом случае более полно используется перегрузочная способность генераторов в несимметричных режимах. Части защиты с независимой (ступенчатой) и зависимой характеристиками действуют, как правило, на отключение и гашение поля.

Симметричные сверхтоки. Под симметричными сверхтоками понимаются токи, превышающие номинальные значения токов генераторов, работающих в симметричном режиме. Они определяются внешними $K^{(3)}$ и перегрузками. Их опасность для генераторов в отличие от несимметричных сверхтоков определяется прежде всего возможностью недопустимых перегревов изоляции обмоток статора и ротора, которые могут приводить не только к преждевременному износу изоляции, но и к ее разрушению, возникновению КЗ или замыканий на землю. $K^{(3)}$ у линейных выводов машин определяют также большие электромагнитные моменты на валу генераторов, возможность которых хотя и учитывается при выполнении машин, но иногда приводит у некоторых типов мощных машин к тяжелым последствиям.

Для ликвидации внешних $K^{(3)}$, не отключенных другими защитами системы, предусматриваются токовые защиты с дополнительным органом напряжения (см. гл. 5), имеющим независимую характеристику выдержки времени, или дистанционные защиты в упрощенном исполнении.

Симметричные перегрузки возникают, например, при отключении источников питания, форсировке возбуждения при понижении напряжения и т. п. Максимальная перегрузка активной мощностью ограничивается мощностью, которую могут развивать первичные двигатели, и часто для турбогенераторов бывает весьма небольшой. Перегрузка реактивной мощностью, определяемая потолочным возбуждением генератора и напряжением на шинах, при форсировке возбуждения может быть значительной. Перегрузки полной мощностью достигают по току статора $2 \div 2{,}5\ I_{ном.г}$. Соответственно перегружаются и обмотки возбуждения, хотя однозначной зависимости здесь нет. Перегрузочные способности характеризуются зависимостями $t_{доп}=f(k)$, где k — кратности тока статора или ро-

тора. Они даются заводами — поставщиками генераторов. Для статора обычно используется токовая защита в одной фазе, отстроенная от $I_{ном,г}$ и действующая на сигнал. Для ротора, ток в обмотке которого часто является определяющим допустимую перегрузку генератора в целом, применяют специальную, более сложную защиту. Она выполняется реагирующей на повышение напряжения (на обмотке возбуждения) или для более мощных машин — на ток ротора $I_{рот}$. В последнем случае принимают $t_{доп} = A/(I_{рот}-B)^2$, где A — постоянная, характеризующая выполнение машин [имеет другой смысл, чем A в выражении (12.1)], а B — коэффициент, определяющий форму перегрузочной характеристики. Защиты действуют с меньшей выдержкой времени на развозбуждение, с несколько большей — на гашение поля и отключение. Необходимо отметить, что у современных регуляторов возбуждения генераторов предусматриваются устройства, ограничивающие форсировку возбуждения, которые таким образом косвенно выполняют защиту генераторов от больших симметричных перегрузок.

12.3. ТИПЫ ПРИМЕНЯЕМЫХ ЗАЩИТ

От внутренних многофазных КЗ широко используются продольные дифференциальные токовые защиты. Для генераторов очень малой мощности допускается взамен дифференциальных применение максимальных токовых защит без выдержки времени, включаемых со стороны выключателя (при наличии в системе других источников питания); для защиты от внешних КЗ в последнем случае должна предусматриваться вторая защита с выдержкой времени. Для защиты от витковых КЗ, если это возможно, предусматриваются односистемные дифференциальные токовые защиты. Защиты от $K_з^{(1)}$ выполняются различно — в зависимости от схемы включения генератора в систему. Защиты генераторов, работающих на шины, до последнего времени выполнялись реагирующими на установившиеся токи нулевой последовательности с использованием специальных *ТА* нулевой последовательности. В настоящее время переходят на другое исполнение — без *ТА* нулевой последовательности и реагированием на высшие гармоники, содержавшиеся в токах фаз. Блочные генераторы снабжаются защитами напряжения нулевой последовательности основной частоты в сочетании с защитами

напряжения, реагирующими на третьи гармоники нулевой последовательности, содержащиеся в фазных напряжениях генераторов. Вторая защита в сочетании с первой обеспечивает 100 %-ный охват витков статорной обмотки. Защиты от внешних КЗ и перегрузок выполняются токовыми, имеющими весьма разные выполнения, или дистанционными. Специфическое исполнение имеют защиты от повреждений в цепях возбуждения.

12.4. ПРОДОЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

Выполнение. Совмещенные структурные трехфазные схемы защиты в обобщенном виде представлены на рис. 12.5. На рис. 12.5, *а* дан вариант с использованием в ИО торможения от токов плеч, на рис. 12.5, *б* — при включении ИО только на токи в дифференциальной цепи. В защищаемую зону для генераторов, работающих, например, на шины генераторного напряжения (рис. 12.5), включаются обычно и токопроводы, соединяющие его с выключателем; *ТА* защиты соединяются между собой у места установки ИО. Заземление вторичных цепей для уменьшения разного рода помех осуществляется в одной точке — у ИО. Защиты обычно выполняются трехфазными (с *ТА* в трех фазах), с тем чтобы обеспечить их срабатывание и при $K_{дв}^{(1,1)}$, когда одно из мест пробоя находится вне защищаемой зоны. Этим обеспечивается быстрое отключение поврежденного генератора при любых многофазных КЗ. Двухфазное выполнение допускается для генераторов небольшой мощности, если их защиты от $K_з^{(1)}$ имеют быстродействующую приставку, реагирующую на $K_{дв}^{(1,1)}$ (см., например, § 12.12).

В настоящее время в мировой и отечественной практике считается целесообразным иметь высокую чувствительность схемы защиты. Это может быть достигнуто, например, выполнением ИО с торможением от токов плеч (рис. 12.5, *а*) и специальной отстройкой от переходных затухающих значений токов небаланса. До последнего времени в Советском Союзе для такого варианта использовались электромеханические реле с магнитным торможением, разработанные в НПИ (см. гл. 8). В промышленном исполнении они имеют первичный ток срабатывания $0{,}1 \div 0{,}2\, I_{ном,г}$ и необходимые коэффициенты торможения [69]; при этом не учитывается возможность ложного срабатывания защиты при разрыве цепей вспомогательных

проводов, который в пределах здания станции весьма маловероятен. Цепь обмотки торможения целесообразно включать на *ТА* со стороны линейных выводов генератора для исключения торможения при внутренних КЗ в случае отсутствия подпитки со стороны системы.

Во втором исполнении (рис. 12.5, *б*) в дифференциальную цепь включается реле, имеющее промежуточный насыщающийся трансформатор тока усиленного действия

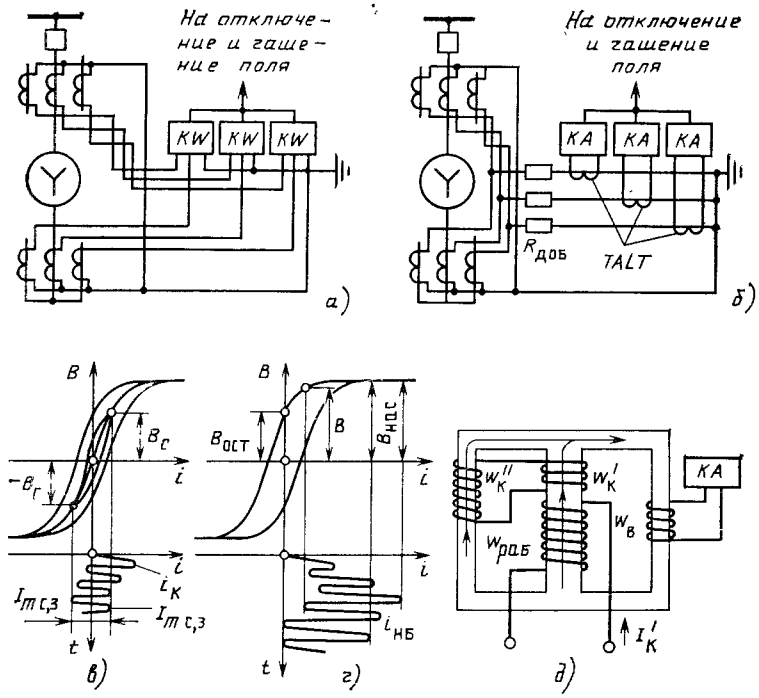


Рис. 12.5. Варианты совмещенных трехфазных схем продольных дифференциальных токовых защит

(также разработанное НПИ, см. гл. 8), иногда последовательно с резистором R, имеющим относительно небольшое сопротивление (5—10 Ом). Предложение об использовании такого сопротивления, сделанное в свое время лабораторией им. А. А. Смурова, обеспечивает выравнивание расчетных нагрузок *ТА* схемы (разгружает менее мощный *ТА* и догружает более мощный) и способствует некоторой (не очень эффективной) отстройке от переходных $i_{нб}$. Основная отстройка от последних возлагается на примененный в схеме ИО с *TALT* [69].

Условия работы *TALT* являются весьма сложными. Наглядные соотношения получаются при графическом рассмотрении явлений с использованием петли гистерезиса сердечника *TALT* и изменения мгновенных токов во времени. Рассматриваются два случая: КЗ в защищаемой зоне с током в дифференциальной цепи $I_к$, равным току срабатывания защиты (рис. 12.5, *в*); внешнее КЗ (рис. 12.5, *г*).

В первом случае после затухания апериодической слагающей ток $i_к$ оказывается почти не смещенным. Магнитная индукция колеблется в широких пределах — от $B_с$ до $-B_с$. Предполагая, что орган *КА* реагирует на среднее значение ЭДС в *TALT*, получаем, что его работа определяется указанными изменениями B (ЭДС $e \equiv dB/dt$), а $E_{средн} \equiv 4\,B_с$; *TALT* работает в этих условиях, как обычный *ТА*, посылая в реле ток $i_{с.р}$. При токах $I_к > I_{с.з}$ защита четко работает, так как изменение индукции за период оказывается еще бóльшим. Получающееся замедление действия защиты за счет наличия в начале процесса апериодической слагающей в $i_к$ и вызванного ею кратковременного насыщения *TALT* обычно 30—40 мс.

Во втором случае при полностью смещенном токе $i_{нб}$ и насыщении сердечника *TALT* индукция изменяется только в узких пределах — от $+B_{нас}$ до B, в частности до остаточной индукции $B_{ост}$, если мгновенные значения $i_{нб}$ снижаются до нуля. Так, например, при колебаниях индукции от $+B_{нас}$ до $+B_{ост}$ она за период только дважды изменяется на $B_{нас}—B_{ост}$ и, следовательно, определяет ЭДС, пропорциональную $2(B_{нас}—B_{ост})$. Для обеспечения правильного функционирования защиты при рассматриваемых внешних КЗ необходимо иметь $B_с > 0{,}5(B_{нас}—B_{ост})$.

Следует, однако, учитывать, что в начальный момент внешних КЗ в реле может кратковременно возникать большой бросок тока, обусловленный остаточной индукцией в сердечнике *TALT* (если апериодическая слагающая $i_{нб}$ вызывает поток, по знаку противоположный $B_{ост}$). Однако он существует кратковременно (примерно не более 0,02 с) и поэтому не отражается на работе большинства защит. При наличии отрицательной остаточной индукции за первый период однополярного тока $E_{средн} \equiv B_{ост} + B_{нас} + (B_{нас}—B_{ост}) = 2B_{нас}$. Следовательно, для предупреждения неправильных срабатываний особо быстродействующих реле необходимо выбирать $B_с > 0{,}5\,B_{нас}$.

Для обеспечения насыщения *TALT* под воздействием переходного $i_{нб}$ при внешних КЗ индукцию при срабатывании $B_с$ целесообразно выбирать достаточно большой, близкой к началу насыщения. Вместе с тем для надежной работы реле при внутренних КЗ необходимо иметь запас по току в его обмотке при $I_к > I_{с,з}$. Поэтому обычно считается, что отношение $B_с/B_{нас}$ должно обеспечивать $I_{рmax}/I_{с,р} \approx 1{,}4$.

Использование *TALT* усиленного действия. Защита с насыщающимися трансформаторами тока загрубляется при внешних КЗ тем меньше, чем симметричнее кривая $i_{нб}$ относительно оси времени; поэтому загрубление при переходных $i_{нб}$ иногда получается недостаточным. Для увеличения этого загрубления были предложены в НПИ (А. Д. Дроздовым) и используются *насыщающиеся трансформаторы тока усиленного действия.* Принципиальная схема их выполнения с присоединением реле тока показана на рис. 12.5, *д*. Насыщающийся трансформатор тока имеет трехстержневой магнитопровод. На среднем стержне расположена первичная обмотка с числом витков $w_{раб}$, включаемая в дифференциальную цепь. Вторичная обмотка с числом витков $w_в$, питающая реле, находится на правом стержне. Дополнительная короткозамкнутая обмотка, используемая для улучшенной отстройки от переходных $i_{нб}$, состоит из двух катушек, находящихся на среднем и левом стержнях и соединенных между собой так, чтобы направления потоков $\Phi_{w_к''}$ и $\Phi_{w\,раб}$ в правом стержне совпадали.

При КЗ в защищаемой зоне периодическая слагающая тока $I_к'$ в обмотке $w_{раб}$ трансформируется в витки $w_к'$ и замыкается через витки $w_к''$. Можно считать, что апериодическая слагающая не трансформируется. Поток в правом сердечнике приблизительно определяется током и витками $w_к''$, так как потоки $\Phi_{w_к'}$ и $\Phi_{w\,раб}$ направлены встречно. Поэтому влияние апериодической слагающей $I_к'$ на чувствительность реле существенно снижено и может проявиться в некотором замедлении срабатывания, обусловленном насыщением сердечника этой слагающей $I_к'$.

При внешних КЗ ток в обмотке $w_{раб}$ мал по сравнению с первым случаем, апериодическая слагающая $i_{нб}$ практически не трансформируется в обмотку $w_к'$ и только ухудшает за счет насыщения магнитопровода трансформацию

ее нее и вторичную обмотку $w_в$ периодической слагающей $i_{нб}$. Таким образом, сильно ослабляется трансформация части периодической слагающей $i_{нб}$, претерпевающей двойную трансформацию.

Выбор $I_{с,з}$ обычно производят с учетом следующего. Трансформаторы тока имеют одинаковые (отрицательные) погрешности в токе ε, характеризующие их токи намагничивания. Поэтому относительная погрешность в трансформации двух *ТА* одной фазы защиты, соответствующая геометрической сумме намагничивающих токов (практически арифметической разности), должна быть меньше погрешности одного *ТА*. Это снижение характеризуется *коэффициентом однотипности* $k_{одн} < 1$ (обычно $k_{одн} = 0{,}5 \div 1$), учитывающим однотипность *ТА*, условия их нагрузки и работы.

Коэффициентом апериодичности $k_{апер} > 1$ (за счет использования *TALT* значительно меньшим, чем в схемах без *TALT*) учитывается переходный режим еще не отключенного внешнего КЗ. С учетом этих соображений получаем $I_{с,з} = k_{отс} I_{нб\,max\,расч,п} = k_{отс} k_{апер} k_{одн} \varepsilon I_{вн\,max\,расч}$. При этом в значении $k_{отс}$ следует учитывать, что определенный приведенным выражением первичный ток небаланса несколько меньше действительного, как и в схемах нулевой последовательности (см. гл. 3). Ток $I_{вн\,max\,расч}$ определяется бóльшим из двух токов — $I^{(3)}_{к,вн\,max}$ или уравнительным током $I_{ур\,max}$ при сильных качаниях, когда $I_{ур\,max}$ может быть больше $I^{(3)}_{к,вн\,max}$ (см. гл. 1).

По току $I_{с,з}$ определяется ток срабатывания устройства *TALT* реле: $I_{с,з,в} = I_{с,з}/K_I$. Необходимо отметить, что введение коэффициентов $k_{одн}$ и в особенности $k_{апер}$ только подчеркивает необходимость учета сложных явлений. Поэтому часто рекомендуемые для них однозначные значения свидетельствуют об отсутствии необходимых уточненных данных.

Ток $I_{с,з,в}$ регулируется изменением числа витков первичной обмотки *TALT*. Использование для регулирования $I_{с,з,в}$ собственно реле недопустимо, так как оно приводило бы к изменению индукции срабатывания *TALT*, которая должна оставаться неизменной.

Коэффициент чувствительности определяется отношением $I_{к\,min}$ в защищаемой зоне к $I_{с,з}$.

Иногда применяется еще дополнительный $k_{ч,доп}$, определяемый отношением $I_{р\,min}$ при $I_{к\,min}$ к $I_{с,р}$. Для него с

учетом соображений, изложенных при выборе индукции B_c, получаются значения, не превосходящие 1,4.

Достоинствами способа являются простота исполнения и удовлетворительная для ряда случаев отстройка от переходных $i_{нб}$, сдвинутых по одну сторону оси времени. Его недостатки: отсутствие загрубления защиты при периодических $i_{нб}$ и малое загрубление при небольших смещениях $i_{нб}$ с сохранением полуволн обратного знака; некоторое замедление срабатывания, определяемое наличием в токе внутреннего КЗ апериодической слагающей.

В рассматриваемой схеме получающиеся токи срабатывания равны примерно $0{,}5 \div 0{,}6\, I_{ном,г}$, что не отвечает современным требованиям. Поэтому защита допускается к применению на генераторах небольшой мощности с косвенным охлаждением проводников обмоток.

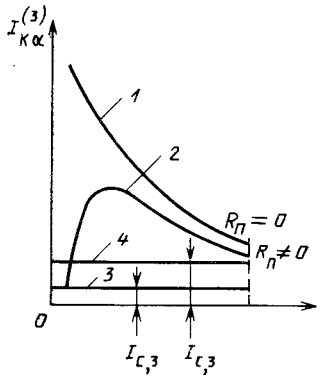


Рис. 12.6. Защитоспособность продольной дифференциальной токовой защиты

В связи с переходом промышленности на более современные элементные базы в настоящее время рассматриваются другие пути осуществления унифицированных чувствительных дифференциальных защит: использование защит с торможением на выпрямленных токах по схемам, подобным рассмотренной в гл. 11, схемы со сравнением мгновенных значений токов в первые доли полупериода, когда *ТА* еще не начинают насыщаться, и т. д. Заслуживают внимания схемы с очень большими сопротивлениями в дифференциальной цепи (см. гл. 8), которые нашли широкое применение в зарубежной практике.

Защитоспособность при многофазных КЗ и общая оценка. Защитоспособность для машин оценивается долей охваченных витков при $R_п = 0$ (см. гл. 1). Для этого на рис. 12.6 с использованием соотношений рис. 12.2, *б* построены зависимости токов в защите $I_{к\alpha}$ при внутренних многофазных КЗ (кривая *1* для $R_п = 0$ и кривая *2* для $R_п \neq 0$) одиночно работающего двухполюсного турбогенератора и токов срабатывания защит соответственно с торможением (прямая *3*) по рис. 12.5, *а* и без торможения (прямая *4*) по рис. 12.5, *б* от доли замкнувшихся витков

α. Защита с торможением работает с $I_{с.з\,min}$, так как тормозная система питается от *ТА* линейных выводов генератора, через которые $I_к$ не проходит. Для обеих разновидностей защиты $I_{к\alpha}$ при любых α значительно больше $I_{с.з}$. Таким образом, для рассматриваемых генераторов обеспечивается 100 %-ная защитоспособность. Для многополюсных машин соотношения, как указывалось выше, получаются более сложными, $I_{к\alpha}$ могут быть значительно меньшими. Однако можно полагать, что во всех случаях будет обеспечиваться 100 %-ная защитоспособность. При $R_п \neq 0$ теоретически возможно наличие мертвой зоны, однако практически она весьма маловероятна. Для оценки защиты необходимо учитывать, что по принципу действия она не реагирует на $K^{(1)}_в$, так как при них токи в начале и конце каждой фазы, изменяясь по значению, остаются одинаковыми. При $K^{(1)}_{з\alpha}$ защита не срабатывает, так как при принятом режиме заземления нейтралей токи $I^{(1)}_{з\alpha}$ совершенно для этого недостаточны. Таким образом, защита реагирует только на внутренние многофазные КЗ. В отечественной практике она рекомендуется для всех генераторов мощностью более 1 МВт. От других видов повреждений и ненормальных режимов должны устанавливаться отдельные защиты.

12.5. СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВИТКОВЫХ КЗ

Существует несколько способов выполнения защиты. Так, например, в немецкой практике с 30-х годов применялась защита со специальным дросселем, включаемым на

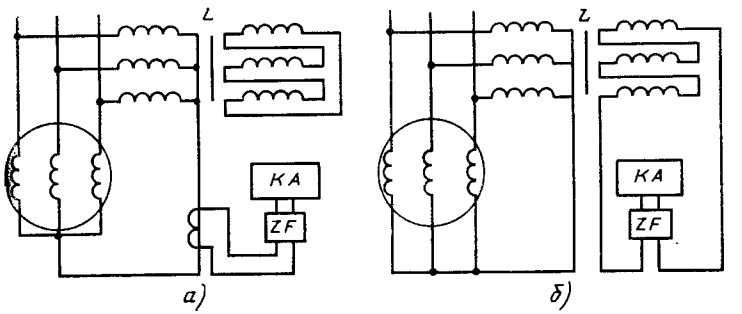


Рис. 12.7. Варианты защиты от витковых замыканий обмотки статора без параллельных ветвей с использованием трехфазного дросселя

зажимы статорной обмотки (рис. 12.7). Искусственная нулевая точка, создаваемая дросселем, соединяется с нейтралью генератора. Измерительный орган реагирует на ток, определяемый разностью потенциалов в указанных точках (рис. 12.7, *а*), или соответствующий ему ток во вторичной обмотке дросселя (рис. 12.7, *б*); для отстройки от гармоник нулевой последовательности, кратных трем, он включается через соответствующий фильтр. При нормальной работе напряжения на нейтрали генератора и искусственно созданной нулевой точке равны между собой и потенциалу земли и защита не может срабатывать. В случае $K_{в}^{(1)}$ равновесие нарушается и защита срабатывает.

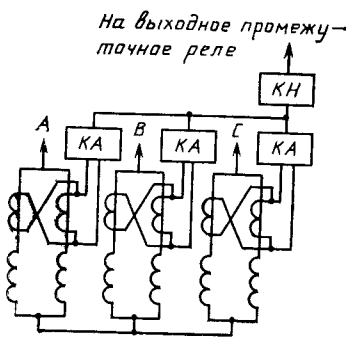


Рис. 12.8. Трехсистемная поперечная дифференциальная токовая защита

В 30-е годы лабораторией им. А. А. Смурова была предложена направленная защита обратной последовательности, ИО которой включаются на составляющие I_2 и U_2 на выводах статорной обмотки. При этом используется тот факт, что знак мощности обратной последовательности зависит от того, где возникла несимметрия — в генераторе (при $K_{в}^{(1)}$) или в сети (например, при несимметричном КЗ).

Указанные защиты в Советском Союзе применения не получили в связи с наличием у них мертвых зон, некоторых других недостатков, а также в связи с тем, что мощные машины начали выпускать с обмотками, имеющими параллельные ветви, дающие возможность установки на них поперечных дифференциальных токовых защит. Необходимо, однако, отметить, что в последние годы по новым разработкам ЛПИ были выполнены образцы направленной защиты обратной последовательности, включенные в эксплуатацию.

Поперечная дифференциальная защита первоначально выполнялась трехсистемной (рис. 12.8). Во второй половине 30-х годов в ТЭП (А. А. Фильштинским) был предложен ее односистемный, более эффективный вариант, быстро получивший общее признание. Он более подробно рассматривается в § 12.6. Его прототипом можно считать витковую защиту сдвоенных генераторов со своеобразной турбиной Ungstrem (Швеция).

Предлагалось также использование для защиты от $K_{в}^{(1)}$ переменных токов, наводимых в обмотке возбуждения, с частотами, характерными для этого вида повреждения. Однако, как выяснилось, получавшиеся схемы были неработоспособны.

12.6. ОДНОСИСТЕМНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Выполнение. Совмещенная структурная схема защиты представлена на рис. 12.9. Измерительный орган тока через фильтр тока основной частоты присоединяется к *ТА*, включенному в цепь между нейтралями, образованными соединением в две звезды отдельно взятых параллельных ветвей статорной обмотки. Фильтр используется для отстройки защиты от высших гармоник нулевой последовательности, кратных трем. Они определяются несинусоидальностью индукции в воздушном зазоре машины. Третьи гармоники в ЭДС кратковременно появляются также при внешних не-

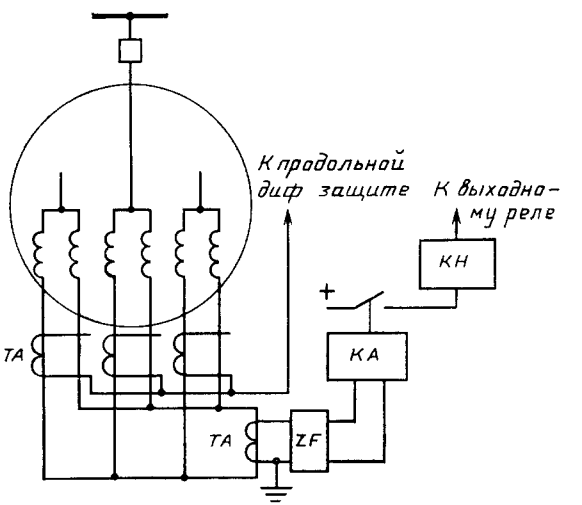


Рис. 12.9. Односистемная поперечная дифференциальная токовая защита

симметричных КЗ, например $K^{(2)}$, и обусловливаются составляющими токов обратной последовательности. Однако они не имеют составляющих нулевой последовательности и поэтому на рассматриваемую защиту влияния не оказывают.

Работа схемы и ее оценка. Работа схемы при разных видах $K_{\text{в}}^{(1)}$ поясняется прохождением токов повреждения на рис. 12.10. При замыкании между витками одной ветви (рис. 12.10, *а*) через защиту проходит ток I_{II} незакороченной части фазы. С уменьшением доли замкнувшихся витков α ветви ток I_{II} также уменьшается; поэтому защита имеет мерт-

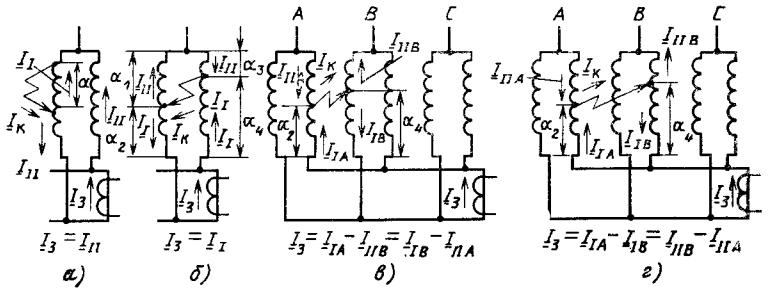


Рис. 12.10. Действие поперечной дифференциальной токовой защиты при различных видах витковых (*а* и *б*) и междуфазных (*в*, *г*) КЗ

вую зону. При замыкании между ветвями одной фазы (рис. 12.10, *б*) через защиту проходит ток $I_{\text{з}}=I_{\text{I}}$ со стороны нейтрали в поврежденной фазе. В случае пробоев, равноотстоящих от нейтрали ($\alpha_2=\alpha_4$) и поэтому имеющих одинаковые потенциалы, ток $I_{\text{з}}=0$ и защита не работает, имеет мертвую зону; однако при малых α_2 и α_4 уже небольшая их разница может обусловить значительные $I_{\text{з}}$.

Как показывают соотношения, приведенные на рис. 12.10, *в* и *г*, защита реагирует также на междуфазные КЗ, но, как и при $K_{\text{в}}^{(1)}$, имеет мертвые зоны.

При нормальной работе и внешних КЗ в ИО защиты, как и в ИО других дифференциальных токовых защит, проходит только ток $I_{\text{нб}}$. Однако в ее односистемном исполнении он определяется в основном гармониками нулевой последовательности, которые частично, за счет несовершенства фильтра, проходят в ИО. Ток $I_{\text{с,з}}=k_{\text{отс}}I_{\text{нб}\,max\,\text{п}}$. Аналитическое, хотя бы приблизительное, определение тока $I_{\text{нб}}$

пока отсутствует. Известно, что он возрастает с увеличением $I_{\text{раб,г}}$. Однако его зависимость от $I_{\text{к,вн}}$ изучена недостаточно. По опытным данным для турбогенераторов принимают $I_{\text{с,з}}\approx 0{,}2\div 0{,}3I_{\text{ном,г}}$. Для гидрогенераторов могут требоваться бóльшие $I_{\text{с,з}}$. В связи с этим следует обратить внимание на то, что для повышения чувствительности защиты не применяются те или другие виды торможения при внешних КЗ.

Схема широко используется в качестве основной защиты от $K_{\text{в}}^{(1)}$ и резервной от многофазных КЗ.

12.7. ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Защиты от $K_{\text{з}}^{(1)}$ выполняются по-разному для генераторов, работающих в блоке с трансформаторами (автотрансформаторами) (рис. 12.1, *б*), и для генераторов, работающих непосредственно на сборные шины (рис. 12.1, *а*) или в блоках, но связанных с потребителями на генераторном напряжении (рис. 12.1, *в*). Защиты от $K_{\text{з}}^{(1)}$ блочных генераторов можно осуществлять более простыми и технически совершенными. Это определяется тем, что генераторы блоков гальванически отделены от остальной системы трансформаторными связями. Поэтому возможно использовать для осуществления селективной (при внешних повреждениях) защиты, например, напряжения нулевой последовательности или наложенные токи с более простой реализацией.

Значительно более сложно осуществлять защиты генераторов, связанных с остальной системой на генераторном напряжении. Для действия защиты в этом случае нельзя использовать напряжения U_0, возникающие при $K_{\text{з}}^{(1)}$, так как они имеют практически одинаковые значения в любой точке системы генераторного напряжения. Поэтому часто приходится ориентироваться на весьма небольшие токи I_0, появляющиеся на выводах поврежденного генератора. Для осуществления таких защит применяются многие из принципов, рассмотренных в гл. 10 применительно к защитам линий в сетях с $U_{\text{ном}}\leqslant 35$ кВ. Однако выполнение защит на этих принципах для генераторов оказывается задачей значительно более сложной в связи с тем, что генераторы обычно имеют большие мощности и соединяются с выключателем пучками кабелей или чаще шинопроводами (трудности в осуществлении полноценных фильтров тока нулевой

последовательности), а также с тем, что к защитам предъявляются более высокие требования (например, охват по возможности 100 % витков статорной обмотки).

Релейщиками Советского Союза на всех этапах развития у нас техники защиты уделялось большое внимание защитам от $K_з^{(1)}$ генераторов, и были достигнуты впечатляющие результаты. Первым, еще в 1929 г., было опубликовано критическое исследование А. Б. Чернина, показавшего несовершенство защиты, поставлявшейся одной из известных европейских фирм. Далее появились полезные исследования Н. Ф. Марголина и Н. И. Шиферсона, работы СРЗиУ ТЭП и ряда других организаций. Особо следует отметить работы послевоенных лет ИЭД АН УССР (И. М. Сирота), создавшего токовую защиту мощных генераторов, работающих на шины, с использованием *ТА* нулевой последовательности с подмагничиванием, и работы ВНИИЭ (В. М. Кискачи) по осуществлению защит блочных генераторов со 100 %-ным охватом витков обмотки без создания искусственного смещения напряжения нейтрали, как это осуществлялось одной из европейских фирм. Заслуживает также внимания новая разработка ВНИИЭ (того же автора) по созданию защиты генераторов, связанных с системой на генераторном напряжении, основанной не на использовании токов нулевой последовательности, а на сравнении гармоник установившегося режима в поврежденной и неповрежденной фазах машины [57]. Есть основания полагать, что она сможет полноценно заменить указанную выше защиту ИЭД АН УССР.

Для генераторов, работающих на шины, принципиально может также применяться направленная защита нулевой последовательности, реагирующая на переходные слагающие высших гармоник, существующих в начальные моменты пробоев на землю (см. гл. 10). Впервые такая защита была осуществлена по разработке кафедры РЗиА МЭИ (В. М. Маранчаком и др.) в начале 50-х годов для двух гидрогенераторов, работающих параллельно на генераторном напряжении на общий повышающий трансформатор (для действия защиты был достаточен емкостный ток неповрежденного генератора). Такие же по принципу защиты были детально разработаны в ЭНИН (И. Н. Поповым и др.) [59] и используются на практике на гидрогенераторах. Представляется, что новая защита ВНИИЭ [57] может оказаться пригодной практически для любых схем включения генераторов.

Защиты с наложенным током могут осуществляться с использованием для этого как постоянного, так и переменного тока непромышленной частоты. Такие защиты разрабатывались в Советском Союзе в ТПИ, ИЭД АН УССР и в некоторых энергосистемах, а также за рубежом (см., например, [10, 65]) и используются иногда на практике (например, в Кемеровэнерго). Они могут применяться также как технологические устройства контроля изоляции статорных обмоток. Однако как защиты от пробоев изоляции они широкого распространения не получили.

12.8. МАКСИМАЛЬНАЯ ЗАЩИТА НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Выполнение. Совмещенная структурная схема защиты от $K_з^{(1)}$ приведена на рис. 12.11. Она выполняется с использованием ИО напряжения, включенного на напряжение нулевой последовательности. Фильтром напряжения являются однофазный *TV*, через который заземляется нейтраль обмотки (рис. 12.11, *а*), или соединенные в разомкнутый треугольник обмотки, например, пятистержневого *TV*, включенного на выводы генератора (рис. 12.11, *б*). Для периодического контроля напряжения на ИО и ориентировочного определения места возникшего $K_з^{(1)}$ применяется чувствительный вольтметр, включаемый персоналом кнопкой. Для отстройки от воздействия высших гармоник нулевой последовательности необходимо иметь фильтр рабочей частоты. По принципу действия защита не нуждается в выдержке времени, если надлежащим образом отстроена от воздействия $U_{0г}$, появляющегося при $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$ или $K_з^{(1)}$ в сети высшего напряжения за счет наличия емкостной связи $C_{т.мо}$ между обмотками трансформатора или автотрансформатора (рис. 12.11, *в*).

Работа схемы и ее оценка. Значение напряжения $U_{0г}$ определяется из схемы замещения (рис. 12.11, *г*), если пренебречь активной проводимостью на землю *TV*; $U_{0г}=k_р \times C_{т,мо}U_{0в}/(C_{т,мо}+C_{0г})$, где $U_{0в}$ — напряжение нулевой последовательности со стороны высшего напряжения при повреждении на землю с его стороны; $k_р \leqslant 1$ — коэффициент, учитывающий распределение $U_{0в}$ вдоль обмотки высшего напряжения; $C_{0г}$ — емкость фазы системы генераторного напряжения (в основном обмотки генератора) по отношению к земле. Обычно $C_{т,мо} \ll C_{0г}$ и $U_{0г}$ не превосходит

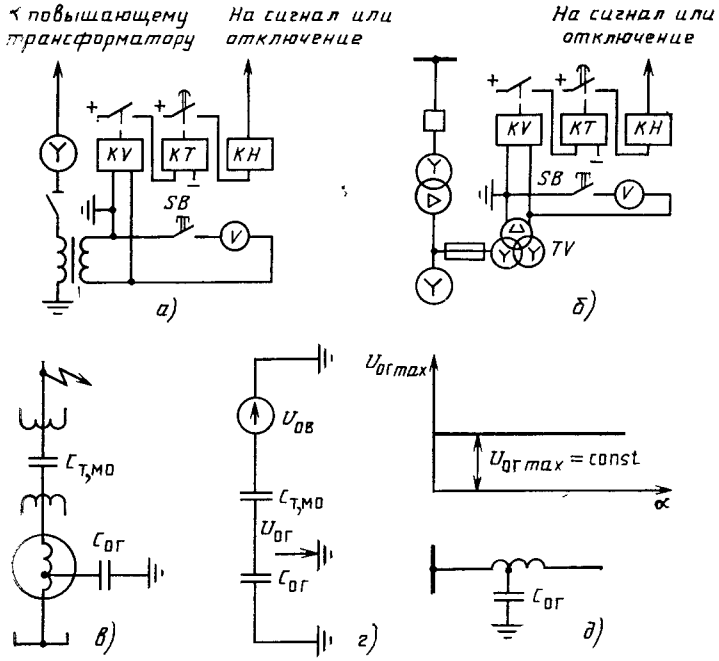


Рис. 12.11. Защита напряжения нулевой последовательности обмотки статора генератора:

а — присоединяется к однофазному трансформатору напряжения; *б* — присоединяется к трансформатору напряжения, установленному на выводах машины; *в* — схема замещения блока в однофазном изображении; *г* — схема замещения нулевой последовательности; *д* — распределение напряжения нулевой последовательности вдоль обмотки статора генератора при замыкании на землю за трансформатором

нескольких процентов фазного рабочего напряжения. Напряжение срабатывания схемы фильтр — ИО для выполнения защиты без выдержки времени должно быть отстроено от совокупного воздействия напряжения $U_{0г}$ и доли гармоник нулевой последовательности (в основном третьей), неполностью подавленных специальным фильтром: $U_{с,з}=k_{отс}\sqrt{U_{0г}^2+(k_ф U_{03})^2}$, где $k_{отс}>1$ учитывает вредные переходные процессы, возникающие при появлении внешних повреждений на землю, а коэффициент $k_ф \ll 1$. При $K_{зα}^{(1)}$ напряжение, подводимое к схеме фильтр — ИО, $U_{зα}^{(1)} = \alpha E_ф$. Поэтому при повреждении вблизи нейтрали генератора защита не срабатывает, имеет мертвую зону, ее защитоспособность $(1-\alpha_x)<100$ % витков, где α_x — доля незащищенных витков. Часто $\alpha_x \approx 15$ %. Для увеличения защитоспособности, уменьшения α_x, а также улучшения отстройки от внешних повреждений на землю возможны два способа. По первому из них, возможному для систем высшего напряжения с глухозаземленными нейтралями, защита выполняется с выдержкой времени, большей максимальных времен ликвидации КЗ $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ в этих системах. Тогда $U_{0г}$ в выражении для $U_{с,з}$ не учитывается. Способ в настоящее время, как правило, не используется, так как резко снижает эффективность защиты при возникновении $K_з^{(1)}$, сочетающегося с $K_в^{(1)}$. По второму способу защита при указанных $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ автоматически выводится из действия дополнительным ИО, включаемым на ток $I_{ко}$, получаемый через *ТА* в цепи заземления нейтрали трансформатора, или на напряжение U_2 на зажимах генератора; последний вариант хуже, так как может нарушить действие защиты при $K_з^{(1)}$, сочетающемся с $K_в^{(1)}$. С учетом изложенного, применения обоих указанных способов следует избегать. Это тем более целесообразно, если генератор имеет еще вторую защиту от $K_з^{(1)}$, предназначенную для действия при повреждениях у нейтрали.

Защита проста по выполнению. Она устанавливается на всех генераторах, работающих в блоках. Для мощных генераторов, особенно с непосредственным охлаждением проводников обмоток, для получения 100 %-ной защитоспособности ее сочетают с дополнительными защитами, обычно использующими высшие гармоники нулевой последовательности.

12.9. ЗАЩИТЫ ОТ $K_з^{(1)}$, ОСНОВАННЫЕ НА СРАВНЕНИИ ГАРМОНИК НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬЮ ЭДС ГЕНЕРАТОРОВ

Использование гармоник, обусловленных несинусоидальностью ЭДС. Как уже указывалось выше, магнитная индукция в воздушном зазоре бывает не вполне синусоидальна. Соответственно несинусоидальны и ЭДС генераторов. В них содержатся гармоники тройной частоты, представляющие составляющие нулевой последовательности, от воздействия которых, например, односистемные поперечные дифференциальные защиты, реагирующие на $K_в^{(1)}$ (см.

§ 12.6), или защиты максимального напряжения нулевой последовательности от $K_з^{(1)}$ (см. § 12.8) должны отстраиваться.

На возможность использования указанных гармоник для осуществления специальных защит от $K_з^{(1)}$ впервые в свое время указал Нейгебауер, не предлагая выполнения защит.

Возможности использования $U_{0З}$. Такие возможности выявляются, если учитывать равномерное распределение емкостей $C_{0г}$ фаз обмотки по отношению к земле и принять ЭДС третьей гармоники нарастающей пропорционально

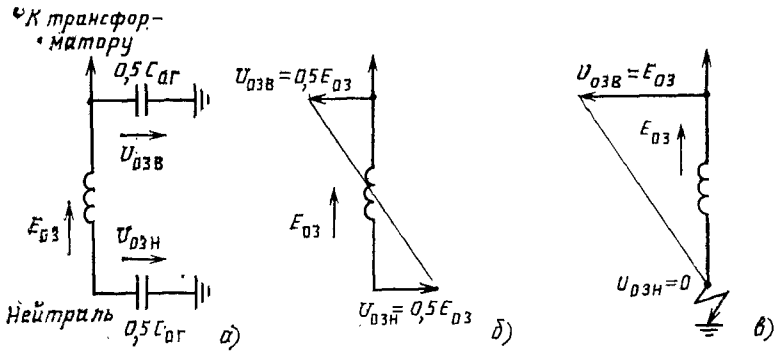


Рис. 12.12. Расчетная схема (*а*) и соотношения третьих гармоник напряжений нулевой последовательности (*б* и *в*)

числу витков обмотки. Предполагая в первом приближении, что проводимости по отношению к земле определяются только емкостями фаз обмотки (в основном не учитываются проводимости на землю *TV*), получаем расчетную схему замещения, приведенную на рис. 12.12, *а*. Из нее следует, что при нормальной работе $E_{0З}$ определяет напряжения на нейтрали генератора $U_{0З\,н}$ и на выводах генератора $U_{0З\,в}$, равные по абсолютному значению $0{,}5E_{0З}$ и противоположные по знаку (рис. 12.12, *б*). При возникновении $K_з^{(1)}$ в нейтрали $U_{0З\,н}=0$, а $U_{0З\,в}$ возрастает до $E_{0З}$ (рис. 12.12, *в*). В общем случае при учете всех проводимостей следует говорить лишь об изменении $U_{0З}$ по сравнению с его значением при отсутствии замыкания у нейтрали. Непосредственно использовать указанное изменение для построения защиты затруднительно главным образом в связи с тем, что оно может существенно изменяться в зависимости от значений нагрузки генератора и ее cos φ. Имеются разработки, преодолевающие это затруднение. Так, например (Л. Пазманди, Венгрия), предлагалось осуществлять защиты, основанные на сравнении $U_{0З\,н}$ и $U_{0З\,в}$, при этом нагрузки на работу схемы не влияют. Защиты, использующие $U_{0З}$, имеют мертвые зоны. Это следует из рассмотрения рис. 12.12, *б*: в средней части обмотки $U_{0З}$ может быть близко к нулю и при возникновении здесь $K_з^{(1)}$ напряжения $U_{0З\,н}$ и $U_{0З\,в}$ остаются неизменными. Поэтому рассматриваемые защиты в качестве единственных от $K_з^{(1)}$ использоваться не могут. Их назначением является обычно действие при $K_з^{(1)}$, расположенных у нейтрали генератора в зоне, где максимальные защиты напряжения (см. § 12.8), реагирующие на основную гармонику U_0, имеют мертвые зоны.

Эффективный вариант защиты, использующий $U_{0З}$, был предложен во ВНИИЭ (В. М. Кискачи).

12.10. ЗАЩИТА ОТ $K_з^{(1)}$ БЛОЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ ЭДС ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫПОЛНЕННАЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ВНИИЭ

Выполнение. Совмещенная структурная схема защиты приведена на рис. 12.13. Защита реагирует на отношение $k_{торм}|\underline{U}_{0З\,н}|/(k_{раб}|\underline{U}_{0З\,н}+\underline{U}_{0З\,в}|)$. Напряжение на нейтрали представляет тормозную величину, а сумма $\underline{U}_{0З\,н}+\underline{U}_{0З\,в}$ — рабочую. Реагирующий ИО направленного действия включается через фильтры третьей гармоники на *TV*, установленные в нейтрали и на выводах генератора. Коэффициенты трансформации *TV* выбираются так, чтобы иметь одинаковые вторичные напряжения при равных первичных ($K_{UН}=K_{UВ}/3$). При нормальной работе $\underline{U}_{0Зн}+\underline{U}_{0Зв}=0$ (рис. 12.12, *б*), $k_{торм}U_{0Зн}>0$ и защита не срабатывает. Коэффициенты $k_{торм}$ и $k_{раб}$ выбираются обычно так, чтобы защита полноценно работала при повреждении в части обмотки со стороны нейтрали, в мертвой зоне максимальной

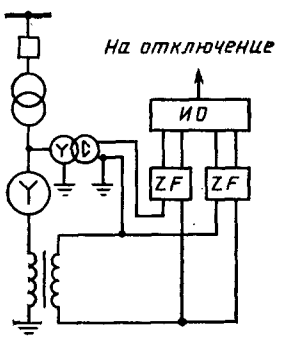


Рис. 12.13. Совмещенная структурная схема защиты от $K_з^{(1)}$ генератора блока по разработке ВНИИЭ

защиты напряжения нулевой последовательности и обязательно сочеталась с последней. Выбор ее параметров рассмотрен, например, в [65].

12.11. СПОСОБ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ ОТ $K_з^{(1)}$ ГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ШИНЫ

Использование для защиты от $K_з^{(1)}$ напряжений U_0 (как для блочных генераторов), как отмечалось выше, невозможно, так как оно одинаково во всей системе генераторного напряжения. Поэтому до последнего времени для действия защиты использовались токи нулевой последовательности. Имевшиеся в 30-е годы фильтры токов I_0 могли выдавать небольшие мощности, а электромеханические реле тока требовали для своего срабатывания относительно больших мощностей. В связи, в основном, с этим для защит использовались реле мощности, которые по цепи тока имели потребление значительно меньшее, чем реле тока (мощность для их срабатывания получалась и от *TV*); принципиально, однако, обеспечить повышения чувствительности реле мощности не могли. Они могли облегчить только отстройку защит от собственных емкостных токов $C_{0г}$ при внешних $K_з^{(1)}$.

В 50-е годы появились разработки улучшенных выполнений фильтров I_0, позже — реле тока на новых элементных базах с ничтожными потреблениями мощности по цепям тока I_0 и в защитах начали применять только органы тока. Лучший вариант таких защит, как указывалось выше, был разработан ИЭД АН УССР (И. М. Сиротой).

12.12. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С *ТА* НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ИМЕЮЩИМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕ

Выполнение. Совмещенная структурная схема защиты приведена на рис. 12.14. В своей основе она подобна токовой защите нулевой последовательности линий (см. гл. 10) и состоит из *ТА* нулевой последовательности, устанавливаемого у выводов генератора, и измерительного реле *КА1*. Дополнительными элементами являются: логическое (промежуточное) реле *KL2* с размыкающим контактом, контролирующим цепь отключения, реле времени *КТ3* и реле тока *КА4 — КА6*, условно представляющие измерительные реле тока защиты от внешних КЗ. Выдержка времени, создаваемая *КТ3*, принципиально не требуется и предназначена только для лучшей отстройки защиты от переходных токов $3i_{0г}$ при внешних повреждениях. Реле *КА4 — КА6* совместо с *KL2* осуществляют автоматическое выведение защиты из работы при внешних КЗ (предложено совместно СРЗиУ ТЭП и Мосэнерго — В. С. Каштелевым), которые могут сопровождаться значительными токами небаланса $I_{нб}$ *ТА*. Дополнительное более грубое реле тока *КА7* (по предложению Иркутскэнерго — Б. А. Хомутова) используется для защиты нулевой последовательности без выдерж-

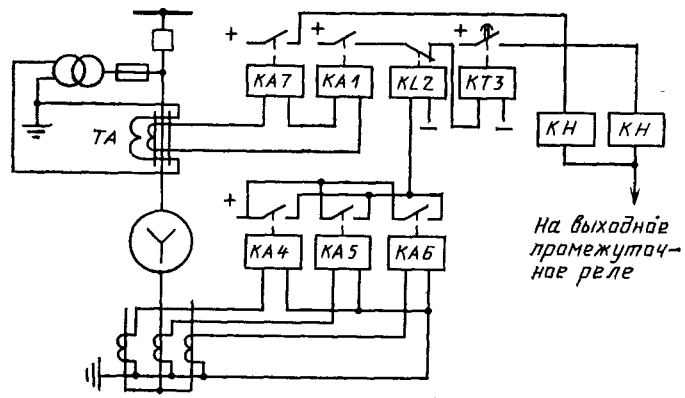


Рис. 12.14. Совмещенная схема токовой защиты обмотки статора генератора с *ТА* нулевой последовательности с подмагничиванием

ки времени при $K_{дв}^{(1,1)}$ с одним местом пробоя в обмотке статора. Оно дает принципиальную возможность двухфазного выполнения продольной дифференциальной токовой защиты (см. § 12.4). Дополнительная вторичная обмотка *ТА* осуществляет подмагничивание магнитопровода *ТА*, улучшающее его параметры (увеличивает сопротивление ветви намагничивания, а следовательно, и возможность повышения отдаваемой мощности, а также уменьшает $I_{нб}$).

Особенности выполнения *ТА*. Оригинальные и удачные *ТА* нулевой последовательности (рис. 12.15) созданы в ИЭД АН УССР в 50-е годы (см., например, [60]) для случаев соединения генератора с выключателем пучком трехфазных кабелей или токопроводами (шинный тип). Они отличаются следующим: наличием подмагничивания магнитопровода посторонним переменным током, ранее применявшимся для повышения точности *ТА*, питающих измерительные при-

боры (см., например, [41]), а для защиты — предложенным СРЗиУ ТЭП в 30-е годы применительно только к трехтрансформаторным фильтрам I_0; вторичной обмоткой, разделенной на секции, сосредоточенные в определенных оптимальных местах магнитопровода, состоящего из двух шихтованных сердечников прямоугольной формы. Вторичные обмотки сердечников, образующие общую вторичную обмотку, соединяются последовательно согласно. Это сводится к возможности выполнения (например, для шинных TA) об-

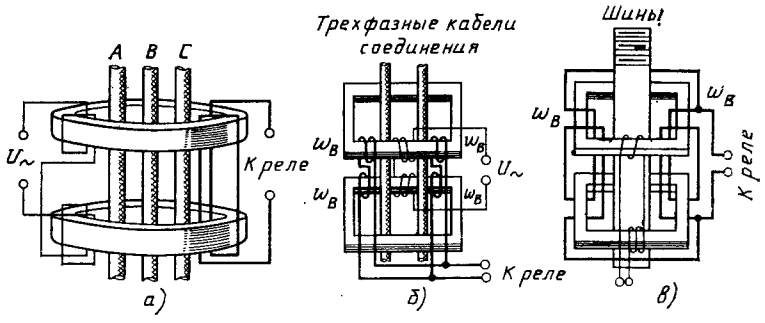


Рис. 12.15. Трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием:

а — принципиальная схема выполнения; *б* — кабельный тип; *в* — шинный тип

щей обмотки для обоих сердечников. Разделение магнитопровода на два сердечника определяется условиями подмагничивания. Последнее выполняется с использованием отдельных катушек на каждом сердечнике, соединяемых последовательно — встречно. При этом ЭДС от подмагничивания во вторичной обмотке оказываются направленными встречно и принципиально полностью компенсируются. Практически же приходится учитывать в $I_{нб}$ слагающую $I_{нб,подм}$, определяемую неидентичностью сердечников. Обеспечение подмагничивания при внутренних $K_з^{(1)}$, когда $U_ф$ и U_0 могут сильно снижаться, достигается использованием одного из $U_{мф}$, которые остаются при этом неизменными.

Для получения наибольшего эффекта от подмагничивания необходим правильный выбор создаваемой им индукции в сердечниках. На рис. 12.16, *а* приведена эквивалентная схема замещения TA с присоединенной нагрузкой $Z_н$. Эффективное значение сопротивления ветви намагничивания $Z_{нам,эф}$ определяется по кривой $B_m = f(I'_{нам})$ (рис. 12.16, *б*). Учитывая, что $E_B = B_m$, получаем $Z_{нам,эф} \approx kB_m/I'_{нам} = k \operatorname{tg} \alpha$, где α угол наклона прямой, соединяющей начало координат с точкой на кривой, имеющей ординату B_m. При отсутствии подмагничивания и малых $I'_1 = 3I_{з0}^{(1)}$ TA работает с небольшими B_m, имеет небольшие $Z'_{нам,эф}$ и может отдавать небольшие мощности. Подмагничивание переменным током дает возможность при том же I'_1 иметь большее $Z'_{нам,эф}$ и, следовательно, получать бóльшую мощность. Режиму с наибольшим $Z'_{нам,эф}$ соответствует угол $\alpha_{опт}$, определяемый касательной к кривой B_m. Необходимо отметить, что эффект от подмагничивания зависит от угла сдвига θ между токами подмагничивания и $3I_{з0}^{(1)}$. Приведенные соображения относились к случаю, когда $\theta = 90°$ (270°). Анализ показывает (см., например, [1]), что при $\theta = 0°$ (180°) сопротивление ветви намагничивания остается равным $Z'_{нам,эф\,max}$ только при $\alpha = \alpha_{опт}$. При $\alpha > \alpha_{опт}$ оно резко уменьшается, а при $\alpha < \alpha_{опт}$ сначала возрастает, а потом также резко уменьшается (подобно дифференциальной магнитной проницаемости). Учитывая изложенное, подмагничивание выбирают так, чтобы $B_{m\,расч}$ была несколько меньшей, чем определяемая углом $\alpha_{опт}$. При электромеханических реле для получения возможно большей мощности создавали режим ее максимальной отдачи, соответствующий $Z_н \approx Z_{нам,\,эф}$, хотя при этом погрешности f_i в токе достигали примерно 50 %. При микроэлектронной элементной базе, когда $Z_н$ малы, этот режим не требуется.

Выбор параметров защиты и ее оценка. Первичный ток срабатывания защиты $I_{с,з}$ определяется несколькими условиями. Он должен быть согласно общим требованиям меньше или равен 5 А, но не меньше минимального

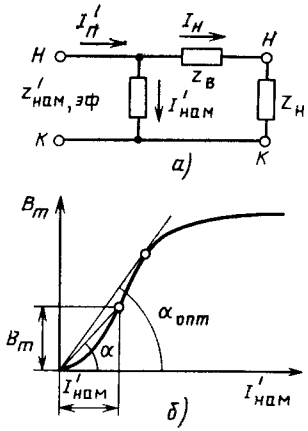


Рис. 12.16. Схема замещения (*а*) и графоаналитическое определение $Z_{нам,эф}$ (*б*) трансформатора тока нулевой последовательности

первичного тока $3I_{з0}^{(1)}$, обеспечивающего срабатывание реле *KA1*. Следует также учитывать необходимость возврата *KA1* в начальное положение после отключения внешнего повреждения.

Расчетным, наиболее тяжелым для последнего условия является, как показал анализ [1], внешнее $K_{з}^{(1)}$, например $K_{зA}^{(1)}$ (рис. 12.17, *а*), на которое накладывается внешнее $K^{(2)}$ между другими фазами (соответственно *B* и *C*), отключаемое с выдержкой времени большей, чем у *KT3*. При этом необходимо иметь $I_{в,з} \geqslant k_{отс}(3k_{пер}I_{0г}+I_{нб,\,расч,\,п})$, где $I_{0г}$ — установившийся ток, определяемый емкостью $C_{0г}$; $k_{пер} > 1$ — коэффициент, учитывающий его переходное значение; $I_{нб,\,расч,\,п}$ — ток небаланса фильтра $3I_0$, определяемый несимметричным расположением фаз первичной обмотки относительно вторичной, неидентичностью сердечников *TA* и другими факторами. При выполнении защиты с блокировкой (*KL2*) $I_{нб,расч,п}$ определяется током срабатывания *KA4* — *KA6*, равным примерно $1{,}4I_{ном,г}$. Ток $I_{нб,\,расч,\,п}$ может иметь любую фазу. Принимая наихудшее его направление и вводя $k_в = I_{в,з}/I_{с,з}$, получаем для рассматриваемого условия $I_{с,з} \geqslant k_{отс}/k_в\,(3k_{пер}I_{0г}+I_{нб,\,расч,\,п})$.

В проведенном рассмотрении не учитывалась отстройка защиты от переходных значений $3i_{0г}$ при внешних $K_{з}^{(1)}$. Если это условие окажется расчетным, что может быть, например, при мощных генераторах с большими $C_{0г}$, то часто осуществляется специальная отстройка от них. Элементарное ее выполнение, известное с 30-х годов, применительно к рассматриваемой защите было реализовано по предложению Киевэнерго. Она осуществляется путем питания дополнительной вторичной обмотки, имеющейся на *TA*, через конденсатор *C* от напряжения нулевой последовательности (рис. 12.17, *г*). Магнитодвижущая сила от этой обмотки выбирается равной и противоположной МДС первичной обмотки *TA* с током $3I_{0г}$ при внешних $K_{з}^{(1)}$.

Следует отметить, что рассмотренный способ компенсации $3I_{0г}$ оказывается недостаточно эффективным при длительных (превышающих выдержку времени, создаваемую *KT3*) внешних перемежающихся дуговых $K_{з}^{(1)}$. Представляется, что наиболее правильным было бы создание компенсирующего тока, определяемого производной $du_{з0}^{(1)}/dt$, поскольку броски тока при внешнем $K_{з}^{(1)}$ $i_{з0}^{(1)} = 3C_{0г}du_{з0}^{(1)}/dt$; такой способ применен в некоторых токовых защитах нуле-

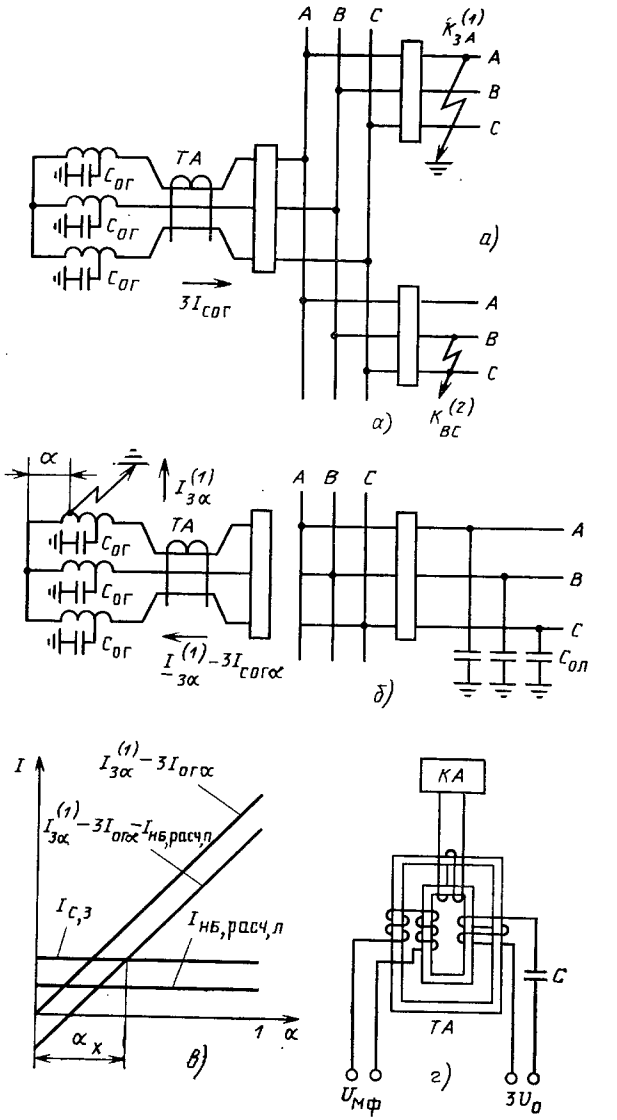


Рис. 12.17. Расчетные соотношения для защиты от $K_{з}^{(1)}$ (*а*, *б*, *в*) и вариант компенсации $I_{с0г}$ защиты по рис. 12.14 (*г*)

вой последовательности, разработанных ВНИИЭ (см. гл. 10).

Защитоспособность защиты оценивается долей защищенных витков $1-\alpha_x$, где α_x — доля витков, отсчитываемых от нейтрали (рис. 12.17, *б*), в пределах которой защита не срабатывает, а чувствительность оценивается минимальным током при $K^{(1)}_{зα}$, достаточным для ее срабатывания. Если принять $I^{(1)}_{зα}$ и $3I_{0гα}$ пропорциональными α, $I_{нб,раб}$, направленным в сторону, обратную $I^{(1)}_{з}$, то с учетом того, что через *ТА* проходит ток $I^{(1)}_{зα}-3I_{0гα}$ (последний, как подчеркивалось в гл. 1 и 10, тока в защите не создает), при $\alpha=\alpha_x$ получаем $I_{с,з}=\alpha_x(I^{(1)}_{з}-3I_{0г})-I_{нб,раб}$, откуда $\alpha_x=(I_{с,з}+I_{нб,раб})/(I^{(1)}_{з}-3I_{0г})$. Графическое определение α_x приведено на рис. 12.17, *в*.

Приведенные соотношения показывают, что защита всегда имеет не 100 %-ную защитоспособность, мертвая зона α_x может в пределе охватывать даже всю обмотку. Первичный ток срабатывания *КА7* (см. рис. 12.14), используемый для действия защиты при $K^{(1,1)}_{дв}$, выбирается с учетом рекомендаций разработчиков примерно 100—150 А, выдержка времени *КТ3* — примерно 1—2 с.

Кроме указанного основного принципиального недостатка (наличие мертвой зоны), особенно существенного для мощных генераторов, защита имеет и ряд других — наличие выдержки времени, невозможность осуществления сплошных шинопроводов и т. п. Поэтому в настоящее время необходимые для нее ТА нулевой последовательности промышленность более не изготовляет и остро встал вопрос о создании новой защиты от $K^{(1)}_{з}$. Наиболее интересным ее вариантом является вновь разработанная защита ВНИИЭ, основанная на сравнении токов непромышленной частоты в фазах генератора.

12.13. ЗАЩИТА ОТ $K^{(1)}_{з}$, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ СООТНОШЕНИЕ ТОКОВ НЕОСНОВНЫХ ЧАСТОТ В ФАЗАХ ГЕНЕРАТОРА

Принципы, положенные в основу осуществления. Некоторые соображения по осуществлению защиты кратко изложены в гл. 10 по защитам от $K^{(1)}_{з}$ линий. Она осуществляется реагирующей не на токи $3I_0$ в месте включения, а на соотношения значений слагающих высших частот в трех фазах защищаемых элементов и поэтому не требует использования фильтров $3I_0$. Защита линий реагирует на установившиеся значения высших гармоник и выполняется обычно работающей только на сигнал с выдержкой времени. Применительно к защите генератора ее целесообразно выполнить работающей на отключение без выдержки времени. Поэтому приходится учитывать переходные значения этих гармоник. Кроме того, при выполнении защиты без выдержки времени представилось возможным использовать также слагающие переходного процесса, кратковременно появляющиеся при $K^{(1)}_{з}$ (см. гл. 10) во второй его части, которая характеризуется дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз системы и обусловливает прохождение токов через обмотки источников питания — генераторов, распределяясь по фазам так же, как токи высших частот [57].

С учетом последнего автором разработки В. М. Кискачи и предложено считать защиту реагирующей на соотношение токов неосновных частот, включая в них и вторую указанную слагающую. Определение является, конечно, недостаточно точным, так как в переходном процессе существуют уже не гармоники, а знакопеременные затухающие слагающие (см. гл. 1).

Использование рассматриваемого принципа применительно к защитам генераторов является значительно более эффективным, чем для защиты линий, так как представляется возможным сравнивать не фазные токи, а разности токов в начале и конце каждой фазы. При этом условию срабатывания принципиально однозначно соответствует превышение одного уровня токов (в поврежденной фазе) над двумя другими их уровнями (в неповрежденных фазах), в том числе и при перемещении точки $K^{(1)}_{зα}$ внутри обмотки статора. Использование качественного (а не количественного) сравнения величин, независимость от токов нагрузки в фазах (за исключением влияния токов небаланса $i_{нб}$ в дифференциальных цепях) могут определять хорошие показатели защиты, выполненной по рассматриваемому принципу.

Соотношения сравниваемых токов неосновных частот, качественно иллюстрирующие рассматриваемый принцип защиты, приведены на рис. 12.18, *а* (внутреннее $K^{(1)}_{зα}$) и рис. 12.18, *б* (внешнее $K^{(1)}_{з}$), при условии, если пренебречь для простоты емкостью фаз обмоток $C_{0г}$ и считать, что ЭДС генераторов синусоидальны (не имеют слагающих тройной

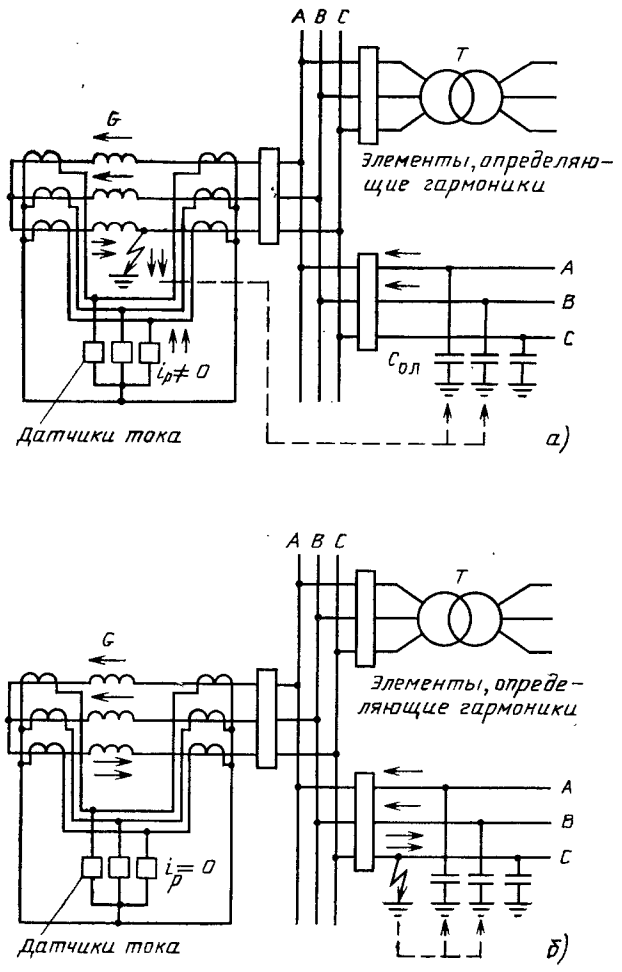


Рис. 12.18. Токораспределение при внутреннем (*а*) и внешнем (*б*) $K_з^{(1)}$ для защиты по рис. 12.19

частоты). При отсутствии $K_з^{(1)}$ и нормальной работе в идеальном случае разность токов, проходящая через ИО каждой фазы защиты, равна нулю. Практически она представляет $I_{нб}$. Однако эти $I_{нб}$ содержат весьма малые слагающие неосновной частоты. Порог срабатывания защиты выбирается так, чтобы была обеспечена отстройка от этих слагающих при максимальных токах нагрузки. При $K_з^{(1)}$ вблизи вывода одной фазы обмотки вдоль двух неповрежденных фаз проходят токи неосновной частоты, определяемые емкостями неповрежденных фаз сети, и их разность, обусловливающая ток в ИО, равна нулю. Токи неповрежденных фаз, складываясь у нейтрали генератора, проходят по поврежденной фазе к месту $K_з^{(1)}$. Со стороны сборных шин к месту $K_з^{(1)}$ может в общем случае проходить остальная часть тока в месте повреждения. В этих условиях токи неосновных частот, проходящие через ИО, образуются слагающими с обеих сторон и пропорциональны току в месте внутреннего $K_з^{(1)}$. Защита, сравнивающая разности токов в трех фазах, срабатывает. При $K_{зα}^{(1)}$ внутри обмотки токи в ИО уменьшаются, однако их соотношение в фазах оказывается достаточным для охвата защитой большей части обмотки.

Выполнение. Структурная схема защиты приведена на рис. 12.19. Описание выполнения дано в соответствии со

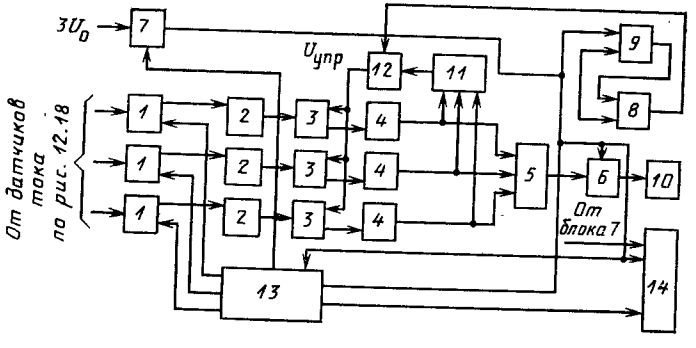


Рис. 12.19. Структурная схема защиты генератора от $K_з^{(1)}$, реагирующей на неосновные частоты (ВНИИЭ)

статьей автора-разработчика [57] и др. Питающие защиту трансреакторы *1* включаются в уже имеющиеся дифференциальные цепи продольной дифференциальной токовой защиты генератора. Они выполняют ряд функций: преобразуют дифференциальные токи в напряжения, пропорциональные их производным, увеличивая тем самым значения

слагающих высших частот и подавляя апериодические слагающие; гальванически отделяют цепи защиты от цепей *ТА*; повышают ее помехоустойчивость. Фильтры *2* высших частот подавляют основные слагающие напряжений. Элементы *3* предназначены для автоматического изменения значения подаваемого на них сигнала в соответствии с требуемой чувствительностью защиты (защита имеет автоматическую регулировку чувствительности в процессе возникшего $K_з^{(1)}$). Они перемножают переменные напряжения входных сигналов и постоянное напряжение управления $u_{упр}$, подаваемое с выхода интегратора блока *12*. Напряжение $u_{упр}$ нарастает с переменной скоростью с момента срабатывания пускового органа *7* напряжения нулевой последовательности и определяется интегралом по времени разностей напряжений — заданного эталонного и максимального из трех выходных напряжений блоков *4*, выделяемого селектором *11*. Таким образом обеспечивается указанная выше автоматическая регулировка чувствительности защиты. При этом выходные напряжения блоков *4* находятся на заданном уровне в широком диапазоне входных токов защиты, повторяя с необходимой точностью соотношения этих токов. Этим определяется четкая работа защиты как в широком диапазоне емкостей на землю системы генераторного напряжения (через которые замыкаются все используемые токи неосновной частоты), так и при любом виде замыкания на землю (металлическом, через $R_п$, при перемежающемся замыкании и т. д.). Блок *5* предназначен для определения соотношений этих напряжений и выдачи полученной информации на логический реагирующий орган *6*. Последний определяет, соответствуют ли соотношения сравниваемых токов повреждению в защищаемой зоне, ограниченной *ТА* дифференциальной защиты генератора, или вне ее, в зависимости от чего выдает или не выдает сигнал на срабатывание выходного органа *10* при условии отсутствия запрета от блока *7*. Последний нормально блокирует срабатывание органа *6*. Одновременно после срабатывания блока *7* блок *9* формирует подаваемый на блок *8* сигнал для запуска последним автоматической регулировки чувствительности (блок *12*) на заданное время. Если в течение этого времени не происходит срабатывания органа *10*, устройство переводится в исходное по чувствительности «грубое» состояние; если в указанном интервале времени орган *10* срабатывает, то чувствительность устройства остается на достигнутом уровне. Возврат защиты

происходит при возврате органа *7* или исчезновении сравниваемых токов. Кроме того, описанное действие блоков *8* и *9* позволяет практически исключить возможность неправильных срабатываний защиты в условиях длительного $K_з^{(1)}$, т. е. когда орган *7* находится в сработавшем состоянии.

В то же время при переходе внешнего $K_з^{(1)}$ в $K_{дв}^{(1,1)}$ со второй точкой пробоя в генераторе грубая для условий $K_з^{(1)}$ защита оказывается чувствительной к $K_{дв}^{(1,1)}$ и действует на отключение. В схеме защиты имеются также блок проверки *13*, блок сигнализации *14*, блок питания и ряд дополнительных приспособлений, на схеме не показанных.

В результате, как следует из рассмотрения схемы, защита оказывается достаточно сложной, ее выполнение на электромеханической элементной базе практически невозможно. Однако, будучи выполненной на современной микроэлектронной базе, она оказывается достаточно компактной и вполне приемлемой для эксплуатации.

Оценка и область применения. По данным разработчика для удовлетворительной работы защиты достаточно намагничивающего тока одного повышающего трансформатора, на который генератор работает. Теоретически предельным, наиболее тяжелым случаем работы является случай, при котором внешних присоединений нет и токи $K_з^{(1)}$ могут замыкаться только через собственные емкости фаз генератора $C_{0г}$. С учетом этого уставки защиты выбраны так, что она может срабатывать при двух равных сигналах, не превышающих 0,75 большего третьего сигнала поврежденной фазы, с коэффициентом чувствительности 1,3 при $K_з^{(1)}$ на выводах. Поэтому в рассматриваемом режиме (практически это генератор с отключенным выключателем) может быть использована максимальная защита напряжения нулевой последовательности. Помочь могут также токи третьей гармоники, определяемые несинусоидальностью ЭДС.

Таким образом, получается защита с абсолютной селективностью, не требующая выдержки времени и охватывающая в основных режимах значительную часть обмотки статора. Промышленностью выполнена ее опытная партия. Целесообразно проведение всесторонних испытаний защиты в энергосистемах, в частности проверка достаточной эффективности принятой блокировки защиты при всех видах внешних КЗ, осуществляемой органом *7*, реагирующим на U_0

(напряжение срабатывания $0{,}1U_{ном}$) и ограничивающим долю защищенных витков (защита имеет мертвую зону у нейтрали генератора).

12.14. ЗАЩИТЫ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЦЕПЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Учитываются замыкания на землю (вал ротора) в одной точке и во второй точке обмотки возбуждения, повреждения в системе тиристорного возбуждения.

В практике эксплуатации машин небольшой мощности старых конструкций специальных защит от замыканий в одной точке вообще не предусматривалось. Для проверки изоляции обычно использовался известный метод с ручным поочередным подключением полюсов обмотки ротора к корпусу через вольтметр или другой индикатор напряжения. В дальнейшем начали применять защиты с включением ИО между одним из полюсов обмотки и землей через вспомогательный источник низкого напряжения постоянного или переменного тока. Предпочтение отдавалось схемам, работающим на переменном токе, с отделением их цепей от системы возбуждения через конденсатор (рис. 12.20). Принципиальным недостатком этих схем является ограничение их чувствительности емкостью цепей возбуждения по отношению к земле, которая для современных мощных машин может достигать 2 мкФ и даже более. Поэтому желательно применение наложенного тока по возможности низкой частоты. Однако в обмотках возбуждения могут появляться напряжения низких частот, например при работе регуляторов возбуждения сильного действия. Это, в частности, ограничивает выбор низкой частоты для наложенного тока и обусловливает необходимость считаться с емкостной проводимостью цепей возбуждения.

Защиты от рассматриваемого повреждения выполняются в настоящее время действующими на отключение прежде всего на гидрогенераторах, так как от возможного тяжелого повреждения, возникающего при замыкании на землю и во второй точке, пока достаточно совершенных защит нет. На турбогенераторах она часто работает только на сигнал (на отключение — при бесщеточной системе возбуждения). От повреждений в системах с тиристорным самовозбуждением устанавливаются максимальные токовые защиты в фазах питающего их силового трансформатора, жестко включаемого на выводах генератора.

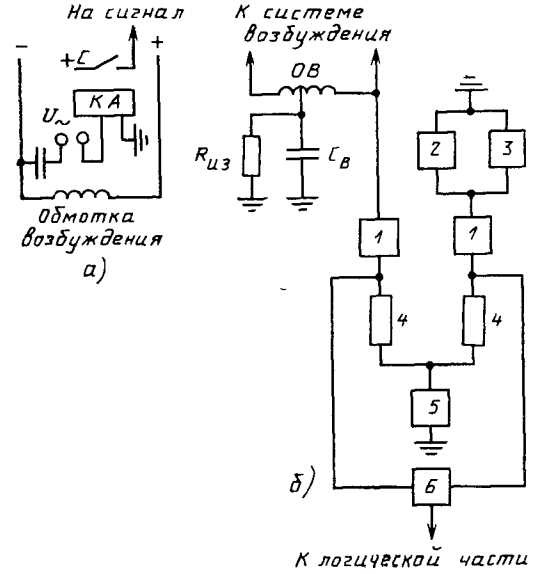


Рис. 12.20. Принцип выполнения защиты от замыканий на землю в одной точке цепи возбуждения, выпускаемой промышленностью (*а*), и структурная схема защиты ВНИИЭ—ВЗПИ (*б*)

Выполнение защит от замыканий в одной точке. Промышленностью выпускается защита, в основу которой положена структурная схема по рис. 12.20, *а*. Она разработана по предложению А. Л. Гринблата и предусматривает использование в качестве ИО органа активной мощности (первоначально) или органа активного сопротивления (позже), реагирующего на активную часть тока, пропорционального переходному сопротивлению в месте повреждения. Для уменьшения влияния емкости разделительного конденсатора на работу схемы он включается последовательно с дросселем, образуя резонансный контур на принятой частоте 25 Гц (см., например, [10]). К недостатку схемы следует отнести низкую чувствительность, уменьшающуюся с увеличением емкости цепи возбуждения.

Учитывая это, разные организации продолжали работы по созданию более совершенных устройств. Так, например, во ВНИИЭ (Ю. Г. Назаров, М. А. Федосеев и др.) была разработана защита (исследования были продолжены

М. А. Федосеевым в ВЗПИ), основанная на наложении на цепь возбуждения переменного напряжения от постороннего источника, осуществлении компенсации емкости и сопротивления изоляции цепи возбуждения и использовании мостовой схемы измерения (рис. 12.20, *б*). Как показали исследования, целесообразный диапазон частоты наложенного напряжения для турбогенераторов 12—18 Гц [82]. Одним плечом мостовой схемы является обмотка возбуждения ОВ и индуктивно-емкостный фильтр присоединения *1*, другим — такой же фильтр *1*, блок компенсации емкости *2* и сопротивления изоляции *3* цепи возбуждения, два других плеча — одинаковые резисторы *4*. В одну из диагоналей включается источник наложенного напряжения *5*, в другую — измерительный блок *6*. При возникновении нарушения изоляции мост оказывается разбалансированным и ИО срабатывает. Предусмотрена возможность автоматического изменения емкости компенсации при переводе машины, например, на резервную систему возбуждения, а также возможность замера сопротивления изоляции цепи возбуждения. Испытания показали, что влияние реально возможного в эксплуатации изменения емкости цепи возбуждения на изменение уставки защиты несущественно. Чувствительность устройства, имеющего две ступени, значительно выше рассмотренного ранее.

На базе этой работы ВНИИР создана защита для промышленного освоения.

В ЛПИ (В. К. Ванин и др.) разработано устройство со своеобразным наложением на обмотку возбуждения переменного напряжения с прямоугольной формой импульсов. Достоинством схемы является независимость от емкости цепи на землю [57].

Во ВНИИЭ (С. А. Евдокимов) предложен способ [57], в котором используется наложение на защищаемую цепь периодически возрастающего по какому-либо закону напряжения низкой частоты. На работу защиты также не влияет емкость цепи возбуждения.

Защита от замыканий во второй точке обмотки возбуждения. Защита была разработана и исследована еще в 30-е годы. Она выполняется в виде комплекта, в который входят делитель напряжения (потенциометр), орган тока, один из концов обмотки которого соединен с движком потенциометра, и некоторые элементы (рис. 12.21, *а*). Предусматривается один комплект, общий для всех или группы генераторов станции. Он вручную присоединяется к генератору, в цепи возбуждения которого возникло замыкание на землю в одной точке (например, K_1 на рис. 12.21, *а*), если поврежденный генератор оставляется на некоторое время в работе. Потенциометр включается параллельно обмотке возбуждения, а второй конец обмотки ИО соединяется через накладку (не показана) и специальную щетку с заземленным валом ротора. При этом получается схема четырехплечевого моста, образуемого частями $R'_в$ и $R''_в$ обмотки возбуждения (до точки K_1) и R' и R'' потенциометра (до движка), с ИО в его диагонали. При установке движка, контролируемой вольтметром, в положение равновесия моста $R_в\ R''=R''_в R'$ и постоянный ток в ИО равен нулю. После этого защита вводится в работу указанной выше накладкой. Необходимость непосредственного соединения защиты с валом, а не с заземляющим контуром станции предотвращает циркуляцию через ИО паразитных токов, наличие которых было в 30-е годы выявлено в Мосэнерго (П. Г. Грудинским). При возникновении второго замыкания

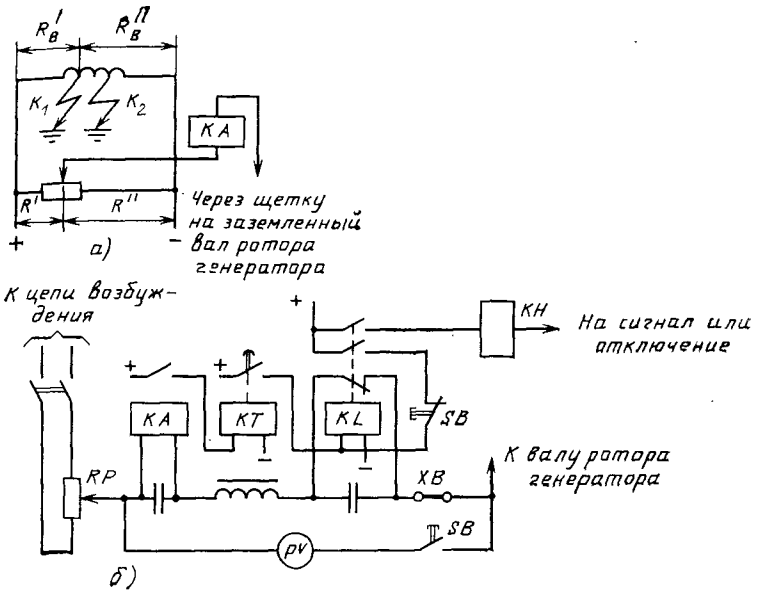


Рис. 12.21. Защита от замыканий на землю во второй точке цепи возбуждения:

а — принцип работы; *б* — схема выполнения

(в точке K_2) часть обмотки возбуждения закорачивается, равновесие моста нарушается и защита срабатывает, если $i_р > i_{с.р}$.

За счет неравномерности воздушного зазора в машине магнитный поток, с которым сцепляются части обмотки возбуждения, разделенные точкой K_1, пульсирует. При этом через ИО может проходить переменный ток. Для предотвращения ложного срабатывания ИО под воздействием этого тока принимается ряд мер: последовательно с его обмоткой включается дроссель, а параллельно — конденсатор (рис. 12.21, *б*). Предусматриваются и другие мероприятия для повышения эффективности действия устройства. Так, например, защита снабжается небольшой выдержкой времени для предотвращения случайных срабатываний.

Защита обладает рядом недостатков: имеет мертвую зону, стремящуюся к 100 % витков обмотки возбуждения, если K_1 расположено у полюса и движок располагается вблизи него; ее невозможно использовать при машинном возбуждении, так как при возникновении K_1 в цепи возбуждения возбудителя она могла бы ложно срабатывать при изменении сопротивления регулировочного реостата; ее трудно (например, на гидрогенераторах) отстроить от переменного тока в цепи ИО. Лучших исполнений нет. Поэтому защита используется только на некоторых типах генераторов, которые оставляются на некоторое время в работе с наличием замыкания в одной точке цепи возбуждения.

12.15. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ОТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ СВЕРХТОКОВ

Структурная совмещенная схема комплексной защиты для генераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток приведена на рис. 12.22. Как было обосновано выше, воздействующими величинами для нее должны являться токи обратной последовательности I_2. Они получаются от фильтра токов I_2, включаемого на *ТА*, устанавливаемые на выводах фаз статорной обмотки к нейтрали. Это обеспечивает использование защиты для резервирования защит от внутренних КЗ в генераторе.

Первый орган тока *КА1*, представляющий как бы I ступень защиты, предназначен для действия на сигнал при небольших I_2, соответствующих длительным I_2, составляющим примерно $0{,}07I_{ном.г}$ для старых исполнений турбогенераторов и 0,08 для новых, а для гидрогенераторов в зависимости от их мощности — 0,1; 0,15 или $0{,}2I_{ном.г}$. Выдержка времени выбирается большей максимальных выдержек времени защит от КЗ в системе. Первичный ток срабатывания органа должен отстраиваться от совокупного воздействия $I_{нб}$ и I_2 в максимальных рабочих режимах с учетом своего $k_в$. Ток I_2 в указанных режимах обычно близок к нулю, поэтому первичный ток срабатывания I ступени $I_{с.з}$ принимается соответствующим длительно допустимому I_2. Второй орган тока *КА2* предназначен для запуска II ступени защиты, работающей с зависимой характеристикой выдержки времени $t^{II} = f(I_2)$, отстраиваемой по времени от перегрузочной характеристики по току I_2, определяемой (12.1). Таким образом, $t^{II} = k_{отс} A / I_2^2$, где $k_{отс} < 1$. Первичный ток срабатывания *КА2* $I^{II}_{с.з}$ выбирается несколько большим $I^{I}_{с.з}$. Третья ступень защиты осуществляется органом тока *КА3* и органом выдержки времени *КТ3*. Ее основным назначением является реагирование на внешние несимметричные КЗ, не отключенные защитами предыдущих поврежденных элементов (например, повышающих трансформаторов, линий и т. п.). Выбор тока срабатывания *КА3* с учетом всех условий является достаточно сложным (см., например, [10]). При выборе учитывается необходи-

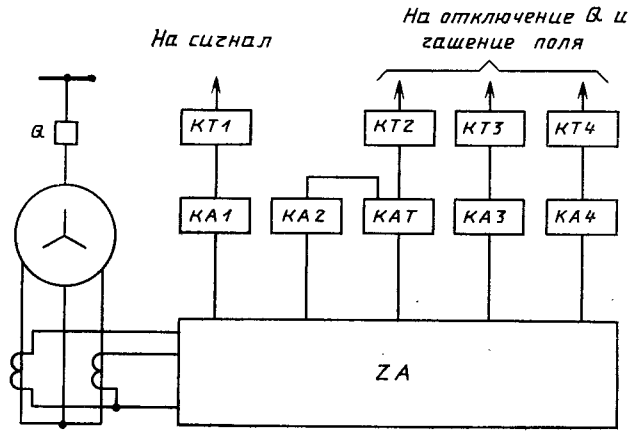


Рис. 12.22. Совмещенная структурная схема защиты генератора от сверхтоков обратной последовательности

мость согласования по чувствительности с защитами предыдущих элементов, иногда реагирующих на другие воздействующие величины; частично поэтому на повышающих трансформаторах также предусматриваются токовые защиты обратной последовательности, подобные III ступени защиты генератора (см. гл. 13). С учетом многих расчетов, проведенных в СРЗиУ ТЭП и в эксплуатации, представляется обычно возможным без специальных расчетов принимать $I^{III}_{с,з} \geqslant 0{,}5 \div 0{,}6 I_{ном,г}$. Выдержка времени III ступени, осуществляемая органом выдержки времени *КТ3*, выбирается по известному ступенчатому принципу (см. гл. 5). Часто у этого органа имеются две выдержки времени. С первой защита действует на отключение, например, секционных выключателей шин, со второй, на ступень Δt большей, — на отключение генератора. Часто для блочных генераторов в защиту входит еще одна, IV ступень, предназначенная в качестве резервной реагировать на особо опасные $K^{(2)}$ в статорной обмотке генератора. Параметр срабатывания ее органа тока *КА4* выбирается так, чтобы эта ступень работала с коэффициентом чувствительности $k_ч \approx \approx 1{,}2$ при $K^{(2)}$ на выводах генератора. Ее первичный ток срабатывания вычисляется по выражению $I^{IV}_{с,з} = I_{2*} \times \times I_{ном,г}/k_ч$, где $I_{2*} \approx 1/(X''_d + X_{2г})$. Выдержка времени принимается на ступень большей выдержек времени быстродействующих защит от КЗ как самого генератора, так и питаемых им элементов, т. е. примерно 0,3—0,4 с.

В случаях, когда согласование по времени или чувствительности III и IV ступеней с резервными защитами смежных элементов, особенно мощных блочных станций, затруднительно, возможно применение специальных решений, например установка дополнительных быстродействующих резервных защит на шинах и отходящих от них смежных присоединениях.

Органы тока II ступени с зависимой характеристикой выдержки времени разрабатывались как в Советском Союзе, так и за рубежом. Наилучшие их варианты были выполнены во ВНИИЭ (М. А. Федосеев и др.) с использованием полупроводников и магнитных элементов с прямоугольной характеристикой намагничивания [84] и во ВНИИР (Л. А. Надель и др.) — на полупроводниках. В последнем варианте на основе способа получения зависимости (12.1), разработанного ВНИИЭ [76], вместо функциональных преобразователей и интеграторов импульсов, выполненных на

ферромагнитных элементах, применены емкостные. Последняя разработка была положена в основу защиты, выпускавшейся промышленностью. При выполнении органа приближенно учитывалось, что сверхтоки могут появляться при не успевшем еще достаточно остыть роторе машины от предыдущего несимметричного режима; по некоторым данным (см., например, [65]) время полного охлаждения может достигать 200 с. Предусмотрено действие органа с зависимой характеристикой на отключение с двумя выдер-

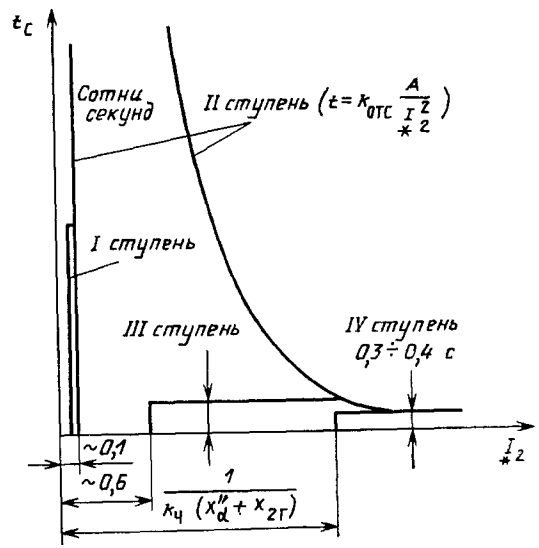


Рис. 12.23. Результирующая время-токовая характеристика защиты от сверхтоков обратной последовательности

жками времени (как у III ступени). В настоящее время для защиты ВНИИР используется новая элементная микроэлектронная база.

В результате рассмотренный комплект защиты имеет результирующую время-токовую характеристику, показанную на рис. 12.23. При получении сигналов о срабатывании только I ступени обслуживающий персонал обычно имеет достаточное время для разгрузки или в крайнем случае отключения машины. Так, например, даже при $A=6$ и $I^{II}_{с,з} = 0{,}1 I_{ном,г}$ получаем время для проведения операций $t \approx A/I^2_{2*} = 6/(0{,}1)^2 = 600$ с (10 мин). Рассмотренное выполнение защиты оказывается достаточно сложным. Поэтому

на практике для генераторов средней мощности применялись многоступенчатые токовые защиты с токами срабатывания и выдержками времени ступеней, заменяющих зависимую характеристику, выбираемыми так, чтобы на любом участке получающиеся выдержки времени не превосходили допустимые значения, т. е. ступенчатая характеристика вписывалась в рассмотренную выше зависимую характеристику выдержки времени. Выбор параметров срабатывания для варианта защиты дан в [65].

Более простой вариант ступенчатой защиты, часто применяемый для генераторов с косвенным охлаждением, осуществляется с использованием I ступени, работающей на сигнал с выдержкой времени, и III ступени с выдержкой времени, предназначенной для ликвидации внешних несимметричных КЗ. Если приняты $I^{III}_{с,з} = 0{,}5I_{ном,г}$, то получаем время после срабатывания I ступени, которое можно использовать для разгрузки машины, например в случае $A = 30$ и $I^{I}_{с,з} = 0{,}07I_{ном,г}$ $t = 30/(0{,}5)^2 - t^{I}_{с,з} = 120 - t^{I}_{с,з}$.

12.16. ЗАЩИТЫ ОТ СИММЕТРИЧНЫХ СВЕРХТОКОВ

Для защиты от симметричных перегрузок статорной обмотки генераторов ограничиваются однофазной токовой защитой, действующей на сигнал. Ее первичный ток срабатывания определяется по выражению $I_{с,з} = k_{отс}I_{ном,г}/k_в$. Современные токовые реле могут выполняться с очень высоким $k_в \approx 0{,}99$. В этом случае удается иметь $I_{с,з} \approx I_{ном,г}$. Выдержка времени, так же как и у сигнального органа защит обратной последовательности, принимается большей максимальных выдержек времени защит от КЗ в системе.

Защиты от внешних $K^{(3)}$ выполняются однофазными токовыми с дополнительным пуском от минимального органа напряжения, включаемого через TV на одно из междуфазных напряжений со стороны выводов генератора (рис. 12.24). Наличие органа напряжения дает возможность отстраивать орган тока только от $I_{ном,г}$, а не от $I_{рабmax}$, которые кратковременно могут достигать $2 \div 2{,}5I_{ном,г}$; при отсутствии органа напряжения защита получалась бы неприемлемо мало чувствительной. Ток срабатывания защиты $I_{с,з} = k_{отс}I_{ном,г}/k_в$. Напряжение срабатывания $U_{с,з}$ выбирается с учетом двух условий:

1) обеспечения возврата после отключения внешнего КЗ, когда необходимо иметь $U_{в,з} \leqslant U_{рабmin}/(k_{отс}k_в k_{зU})$, где

$k_{отс}$, $k_в$ и $k_{зU}$ больше единицы, причем $k_{зU}$ учитывает понижение напряжения за счет самозапуска двигателей потребителя;

2) отстройки от понижения напряжения, например при потере возбуждения. Второе условие является расчетным для турбогенераторов, которые при потере возбуждения могут быстро не отключаться. При этом $U_{с,з} \approx 0{,}5 \div 0{,}6\,U_{ном,г}$.

Для блочных генераторов, а в зарубежной практике и для генераторов, работающих на шины, от внешних $K^{(3)}$

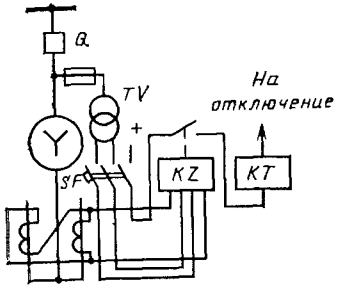


Рис. 12.24. Совмещенная схема токовой защиты с минимальным пуском напряжения от симметричных сверхтоков КЗ

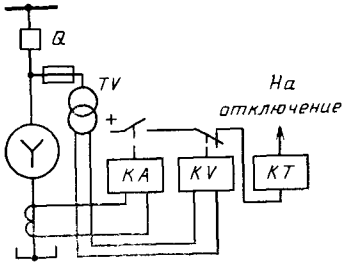


Рис. 12.25. Совмещенная схема защиты с органом сопротивления от симметричных сверхтоков КЗ

используется одноступенчатая дистанционная защита, включаемая на разность токов двух фаз со стороны выводов к нейтрали и соответствующее им междуфазное напряжение на выводах (рис. 12.25). Современная элементная база дает возможность выполнять такую защиту достаточно компактной, а по чувствительности лучшей, чем рассмотренная выше токовая защита с дополнительным пуском по напряжению. Характеристики срабатывания выбираются с учетом тех же соображений, что и характеристики последних (III) ступеней дистанционных защит (см. гл. 6). В частности, сопротивление срабатывания защиты с реле, имеющим круговую характеристику, определяется по выражению $Z_{с,з} = Z_н[k_{отс}k_в \cos(\varphi_{тахч} - \varphi_н)]$ (см., например, [65 и 66]). Защита, как и рассмотренная выше токовая, часто выполняется с двумя выдержками времени подобно защитам от несимметричных сверхтоков. Для нее не требуется блокиров-

ка от качаний. Предотвращение ложных срабатываний при нарушении цепей напряжения осуществляется по упрощенной схеме — заведением цепи оперативного тока через вспомогательные контакты автоматических выключателей, защищающих TV от КЗ.

12.17. ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗОК, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ В ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

На турбогенераторах с непосредственным охлаждением проводников обмоток и мощных гидрогенераторах устанавливаются достаточно совершенные защиты от перегрузок, реагирующие на ток в обмотке возбуждения. Они имеют орган, действующий на сигнал с выдержкой времени при малых перегрузках, и несколько более грубый пусковой орган, предназначенный для запуска органа с зависимой характеристикой выдержки времени, определяемой соотношением $t=k_{отс}A/[k(I_{рот}-B)^n]$, где $k_{отс}\leqslant 1$. В результате по принципу действия получается защита, подобная рассмотренной выше защите от сверхтоков I_2. Она разработана ВНИИР (Л. А. Наделем и др.). Уставка сигнального органа соответствует $1{,}05I_{рот,ном}$, а органа, запускающего орган с зависимой характеристикой, — приблизительно $1{,}1I_{рот,ном}$. Ток обмотки возбуждения подается в защиту от датчика, в качестве которого при тиристорном и высокочастотном возбуждении используется трансформатор постоянного тока, а при бесщеточном возбуждении — индукционное устройство, представляющее «беличью клетку», охватывающую вал ротора, внутри которого проходят провода от возбудителя к обмотке ротора. В защите предусматривается также учет возникновения перегрузки при не успевшем остыть роторе. Защита достаточно сложна. Поэтому на практике для менее мощных турбо- и гидрогенераторов применяется упрощенная защита. Она выполняется при помощи органа напряжения KV, включаемого параллельно обмотке ротора, воздействующая величина которого пропорциональна $I_{рот}$. Обычно принимают $U_{с.з}\approx 1{,}5I_{рот,ном}R_{рот}$, где $R_{рот}$ — сопротивление обмотки ротора в горячем состоянии при максимально длительно допустимой температуре. С учетом того, что при форсировке возбуждения $I_{ротmax}$ может достигать $2I_{рот,ном}$ и что время срабатывания защиты не должно превосходить $t_{доп}$, получаются времена срабатывания защиты примерно 20—30 с. Обе защиты с меньшим временем действуют на развозбуждение, с бо́льшим — на отключение.

12.18. ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Исследования, проведенные в Союзтехэнерго и на электродинамической модели ВНИИЭ (А. Г. Шейкман, Э. Л. Бронштейн, Ю. Я. Травина и др.), в Сибирском НИИ энергетики (Б. З. Гамм, В. Ф. Тонышев), в Коми филиале АН СССР (В. А. Полуботко), в ЛПИ (Г. М. Павлов, В. К. Ванин и др.) и ряде других организаций, дают основание полагать, что одним из наиболее приемлемых способов для выявления потери возбуждения является использование минимальных органов сопротивления (см. гл. 6). Генератор, потерявший возбуждение, представляет как бы индуктивность, зависящую от скольжения ротора s; последнее может изменяться в пределах нескольких процентов рабочей частоты, но всегда меньше 10 %, при которых срабатывает автомат безопасности турбины. По данным Союзтехэнерго и зарубежным источникам для турбогенераторов при реальных скольжениях и активной нагрузке сопротивление на выводах генераторов располагается в различных точках дуги окружности, опирающейся на точки X_d и X'_d и расположенной в четвертом квадранте комплексной плоскости сопротивлений (рис. 12.26). При нормальной работе генератора с активно-индуктивной нагрузкой и внешних КЗ сопротивление на выводах генератора обычно располагается в первом квадранте той же плоскости. Таким образом, рассматриваемый принцип может базироваться на различии областей расположения $Z_з$ на зажимах генератора при нормальной работе и внешних КЗ и в случае потери возбуждения. При практической реализации такого принципа возникает, однако, ряд затруднений. К ним в первую очередь относятся следующие. Защита от потери возбуждения не должна, как уже отмечалось выше, срабатывать при глубоких качаниях и асинхронном ходе, когда концы векторов $\underline{Z}_з$, как это подробно рассматривалось в гл. 6, скользя по прямой (кривой) линии нулевых потенциалов, могут попадать в область срабатывания защиты, ограниченную характеристикой органа сопротивления.

Необходимо учитывать, что современные системы возбуждения могут характеризоваться весьма разными нару-

шениями в работе, определяющими возникновение потери возбуждения. При этом концы $\underline{Z}_з$ могут существенно отклоняться от значений, определяемых точками кривой на рис. 12.26, попадая даже в третий квадрант комплексной плоскости сопротивлений. Наличие отклонений $\underline{Z}_з$ обусловливается также для случаев многополюсных машин неодинаковостью их частотных характеристик по продольной

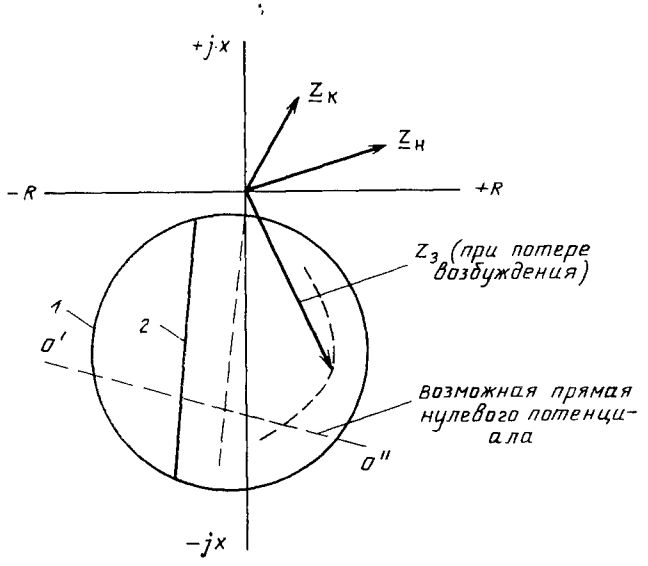


Рис. 12.26. Сопротивления, измеряемые защитой при нормальной работе генератора, внешних КЗ, потере возбуждения и асинхронном ходе

и поперечной осям. В некоторых случаях следует также учитывать, что $Z_з$ по данным Союзтехэнерго может снижаться до $0{,}5\,X'_d$.

Все это приводит к усложнению выбора необходимых параметров защиты, тем более что отдельные из приведенных факторов предъявляют к ней противоположные требования. Так, например, для лучшей отстройки от асинхронного хода, как давно было известно, целесообразно сужать область, охватываемую характеристикой, и выполнять защиту с выдержкой времени, которая при рассматриваемом повреждении считается допустимой. В тех же целях осуществлялось смещение характеристик в третий

квадрант. С другой стороны, для охвата всех возможных $Z_з$ при потере возбуждения эту область следует расширять, смещение в третий квадрант сокращать до значений, меньших $0{,}5\,X'_d$, а выдержку времени защиты по возможности уменьшать. На рис. 12.26 приведены примерные возможные характеристики $Z_{с.з} = f(\varphi_р)$: соответствующая направленному реле сопротивления (*1*) и улучшенная (*2*). В ЧГУ (Э. М. Шнеерсоном) сделано предложение о включении на выходе ИО сопротивления параллельно органу

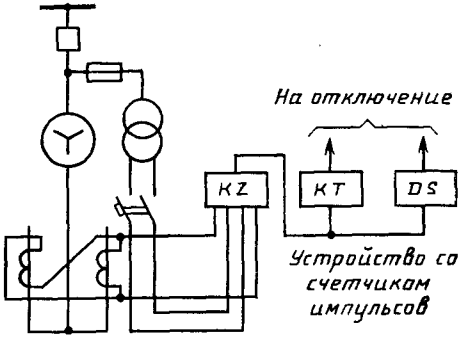


Рис. 12.27. Вариант схемы защиты от потери возбуждения, использующий орган сопротивления с выдержкой времени

выдержки времени специального счетчика, который регистрирует (рис. 12.27) повторяющиеся вхождения $Z_з$ в область срабатывания, отличающиеся от таких же вхождений при асинхронном ходе меньшими временами [83]. Необходимо, однако, иметь в виду, что период асинхронного хода (проворот на 360°) может составлять всего около 0,1 с и поэтому целесообразность рассматриваемого мероприятия требует уточнения.

12.19. СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ

В предыдущих параграфах данной главы неоднократно упоминалось о действии защит, прежде всего реагирующих на внутренние повреждения, на гашение поля. Иногда для краткости при ясности ситуации говорилось просто о действии таких защит на отключение. В зависимости от используемой системы возбуждения это гашение осуществляется различным образом. Так, например, гашение поля турбогенераторов при электромашинном или высокочастотном возбуждении производят с помощью автоматов

гашения поля (АГП), при тиристорном возбуждении — переводом тиристоров в инверторный режим, при бесщеточном возбуждении — переводом в инверторный режим тиристоров в цепи возбуждения возбудителя. Тип системы возбуждения оказывает также прямое или косвенное влияние на выполнение защит генераторов. При тиристорной системе с самовозбуждением при отсутствии специальных последовательных трехфазных трансформаторов, включаемых в фазы со стороны выводов к нейтрали генератора, требуется принятие мер к обеспечению работы защит с выдержками времени при КЗ на выводах генератора или даже за повышающим трансформатором блока, когда питание цепей возбуждения нарушается. Различие повреждений в разных системах возбуждения влияет также на области расположения $Z_з$ при потерях возбуждения (см. § 12.18).

12.20. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Защита синхронных компенсаторов от внутренних повреждений выполняется так же, как и генераторов соответствующих мощностей. Защита от ненормальных режимов имеет ряд отличий. Они в основном сводятся к следующему: обычно не предусматривается защита от внешних КЗ, защита от перегрузки работает на сигнал и разгрузку, предусматривается минимальная защита напряжения, работающая при длительном исчезновении напряжения и предназначенная, главным образом, для пуска не подготовленного к этому компенсатора. Указанный пуск осуществляется для мощных компенсаторов через реактор, который после разворота шунтируется выключателем. В последние годы для пуска и торможения таких компенсаторов используются мощные преобразовательные тиристорные установки. При этом защитам приходится работать в условиях широкого диапазона частот, на которые они обычно не рассчитываются. Вопросы выполнения и поведения защит в рассматриваемых условиях исследовались в НПИ, была проведена совместная работа ВНИИЭ (Я. С. Гельфанд) и Гидропроекта (Г. Р. Носова), непосредственно относящаяся к защитам генераторов-двигателей гидроаккумулирующих электростанций [57].

Вопросы для самопроверки

1. От каких видов повреждений и ненормальных режимов работы предусматриваются защиты современных синхронных генераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток?
2. Объясните влияние магнитного торможения в ИО на чувствительность продольной дифференциальной токовой защиты генератора.
3. Объясните назначение короткозамкнутой обмотки *TALT* дифференциальной защиты.
4. Какие принципы выполнения защиты от $K_з^{(1)}$ в обмотке статора используются в отечественной практике для генераторов, работающих непосредственно на сборке шины, и для генераторов, работающих в блоке с трансформаторами (автотрансформаторами)?
5. Какие резервные защиты предусматриваются для генераторов?
6. Объясните способы выполнения защиты от замыкания на землю в одной точке цепи возбуждения.
7. Объясните преимущества использования защиты от несимметричных сверхтоков, реагирующей на токи обратной последовательности; целесообразность применения органа с интегрально-зависимой характеристикой для генераторов с непосредственным охлаждением обмоток.
8. Поясните назначение защиты от потери возбуждения и способ ее выполнения.
9. Какими преимуществами обладает дистанционный принцип выполнения защиты генераторов от внешних симметричных КЗ по сравнению с токовым?
10. Сформируйте особенности выполнения защит синхронных компенсаторов.

Глава тринадцатая

ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ, АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ И БЛОКОВ

13.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Повреждения, возникающие в зонах, защищаемых защитами трансформаторов (автотрансформаторов),— внутренние повреждения — можно разделить на две группы:

происходящие в баках и вне бака в соединениях между выключателями и баками, включая внешнюю часть втулок трансформаторов (автотрансформаторов). Основными видами внутрибаковых повреждений являются многофазные КЗ (для трехфазных аппаратов), однофазные замыкания, которые делятся на витковые КЗ — $K_{в}^{(1)}$, однофазные КЗ — $K^{(1)}$ в обмотках, относящихся к системам с глухозаземленными нейтралями ($U_{ном} \geqslant 110$ кВ), и $K_{з}^{(1)}$ в обмотках, относящихся к системам с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралями, и «пожар» стали сердечника, вызываемый вихревыми токами при нарушении изоляции между пластинами сердечника. Повреждения $K_{з}^{(1)}$ могут быть также связаны с пробоями на землю во внешней сети, когда возникают $K_{дв}^{(1,1)}$. Вне бака могут иметь место все перечисленные выше многофазные КЗ, однофазные $K^{(1)}$ и $K_{з}^{(1)}$ и рассматриваемые ниже специфические повреждения втулок со стороны сверхвысоких напряжений.

Основными ненормальными режимами работы являются внешние КЗ, перегрузки, недопустимые понижения уровня масла в баке и недопустимые повышения напряжения в некоторых режимах при незаземленных нейтралях обмоток, входящих в систему в целом с глухозаземленными нейтралями (может быть при $U_{ном} = 110 \div 220$ кВ). Перегрузки, как симметричные, так и несимметричные, воспринимаются трансформаторами (автотрансформаторами) более легко, чем генераторами. С учетом этого защиты при перегрузках могут обычно действовать на сигнал, а на необслуживаемых подстанциях — на разгрузку и только после неэффективности разгрузки — на отключение. При других ненормальных режимах в зависимости от их характера и прочих условий защиты работают на сигнал, разгрузку, отключение. При возникновении наиболее опасных повреждений (многофазных, однофазных и витковых

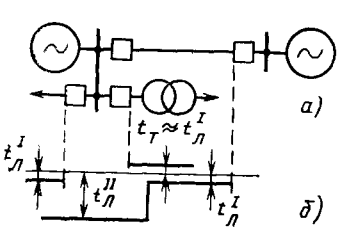


Рис. 13.1. Согласование выдержек времени защит трансформаторов с защитами линий, имеющих ступенчатые характеристики выдержек времени:

а — схемы сети; *б* — характеристики защит

КЗ) защиты должны без выдержки времени действовать на отключение выключателей. Наличие замедления не только ухудшает защиту трансформатора (автотрансформатора), вызывая большие его разрушения, но также может нарушать бесперебойную работу системы и ухудшать характеристики защит с относительной селективностью примыкающей сети. Последнее иллюстрируется рис. 13.1, на котором изображены ступенчатая характеристика выдержки времени $t_л$ защиты линии и время срабатывания защиты $t_т$ от КЗ трансформатора. Время II ступени $t_л^{II}$ должно быть больше $t_т$. Специальные защиты от $K_{з}^{(1)}$ в целях упрощения, как уже указывалось выше, обычно не устанавливаются.

13.2. ВНУТРЕННИЕ КЗ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТАМ

Расчеты токов КЗ при повреждениях на выводах производятся известными способами (см., например, [29]). Распределение при этом токов в обмотках рассмотрено в гл. 1. Значительно более сложным является определение токов при повреждении внутри обмоток. Ниже приводится только грубо приближенное качественное рассмотрение этого вопроса. Работы, выполненные в последние годы в НПИ (А. С. Засыпкиным), дают полное количественное и качественное рассмотрение получающихся соотношений [71].

При известном токе $I_{к\alpha}$ в месте повреждения и доле замкнувшихся витков $\alpha = w_\alpha / w$ токи $I_к$ в фазах со стороны питания приближенно определяются в предположении равенства нулю суммы МДС обмоток. Так, например, при междуфазном КЗ во вторичной обмотке и соединении обмоток У/У (рис. 13.2, *а*) $wI_к = w_\alpha I_{к\alpha}$, откуда $I_к = \alpha I_{к\alpha}$; при витковом КЗ во вторичной обмотке при соединении Д/У (рис. 13.2, *б*) $w_д I_к = w_\alpha I_{к\alpha}$, откуда $I_к = w_\alpha I_{к\alpha} / w_д$, или, принимая $n_т = 1$, т. е. $w_д = \sqrt{3} w_у$, $I_к = \alpha I_{к\alpha} / \sqrt{3}$; при витковом КЗ в первичной обмотке, соединенной в треугольник (рис. 13,2, *в*), $(w_д - w_\alpha) I_к = w_\alpha (I_{к\alpha} - I_к)$, откуда $I_к = \alpha I_{к\alpha}$.

Таким образом, для рассмотренных случаев КЗ внутри обмоток $I_к = k \alpha I_{к_\alpha}$, где k — коэффициент, определяемый видом повреждения. Полученное выражение показывает, что при малой доле замкнувшихся витков, даже при значительных $I_{к\alpha}$, токи $I_к$ в фазах со сторон питания могут быть значительно меньшими токов КЗ при повреждениях на вы-

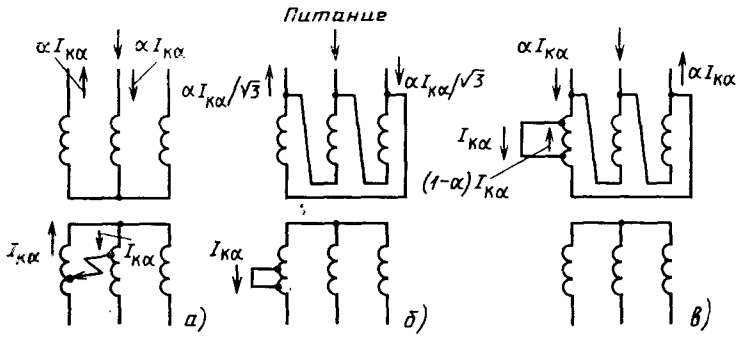


Рис. 13.2. Распределение токов в первичной и вторичной обмотках трансформаторов с односторонним питанием при внутренних КЗ

водах и даже меньшими номинальных токов трансформаторов. Поэтому к защитам от внутренних КЗ предъявляется требование не только быстроты срабатывания, но и высокой чувствительности. Так, на основании [71] бывает необходимо иметь $I_{с,з\,min} \approx 0{,}1\,I_{ном}$.

13.3. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Перегрузки. Различают перегрузки, определяемые графиком нагрузки, и аварийные, вызванные, например, внезапным отключением параллельно работавшего трансформатора. Во всех этих случаях перегрузка допустима в течение некоторого времени. Так, например, как известно, допускаются аварийные перегрузки, не ограничиваемые коэффициентом заполнения предшествующего графика, следующих значений: 30 % — в течение 3 ч, 60 % — 45 мин, 100 % — 10 мин. Для трехобмоточных трансформаторов перегрузки определяются номинальными мощностями обмоток. Для повышающего автотрансформатора не может без перегрузки общей части обмотки (рассчитанной на типовую мощность, меньшую проходной, по которой рассчитывается остальная часть обмотки высшего напряжения) передаваться мощность со стороны высшего напряжения на сторону среднего, если на последнюю передается со стороны низшего напряжения типовая мощность. Поэтому в общем случае учитывается возможность перегрузок обмотки высшего напряжения, ее общей части и обмотки низшего напряжения.

При невозможности рассмотренного и подобных ему режимов, например на понижающем автотрансформаторе с односторонним питанием, общая часть обмотки перегружаться не может.

Однофазные токовые защиты (учет малой вероятности несимметричных перегрузок) действуют на сигнал, а иногда, как указывалось выше, на разгрузку и последующее отключение.

Внешние КЗ. При внешних (сквозных) КЗ токи в обмотках могут намного превышать их номинальные значения. Максимальный ток может возникать при питании трансформатора (автотрансформатора) от системы большой мощности, сопротивлением которой можно пренебречь по сравнению с сопротивлением $X_к$ трансформатора. В этом случае установившийся $I^{(3)}_{к\,max} \approx I_{ном,т}/X_к$. При конструировании трансформаторов учитываются динамические усилия от таких токов. Принимая это во внимание, внешние КЗ могут для таких трансформаторов представлять опасность, главным образом, по их тепловому воздействию на обмотки.

Устанавливаемая защита от внешних КЗ имеет назначение: действовать при длительном прохождении токов в случае отказа защит или выключателей смежных элементов, работать в качестве основной при КЗ на шинах (при отсутствии специальной защиты) или в самих трансформаторах малой мощности и резервировать в некоторых случаях основные защиты.

Недопустимые понижения уровня масла в баке. Они могут возникать, например, при сильных понижениях температуры, а также при образовании течи в баке. Защита должна действовать на сигнал или отключение в зависимости от степени понижения уровня масла с учетом вида обслуживания электроустановки.

Недопустимые повышения напряжения. Нейтрали автотрансформаторов всегда глухо заземляются. Это предотвращает недопустимые повышения напряжения в системе среднего напряжения при КЗ на землю в системе высшего напряжения из-за гальванической связи этих систем автотрансформатором. Трансформаторы, предназначенные для работы в сетях с глухозаземленными нейтралями, по технико-экономическим соображениям обычно имеют пониженную изоляцию. Однако в сетях преимущественно напряжением 110 кВ с глухозаземленными нейтралями часто используется такое частичное их заземление,

которое допускает изоляция трансформаторов у нейтрали, рассчитанная на уровень 35 кВ. У таких трансформаторов в случае их питания со стороны других напряжений возможно возникновение опасных перенапряжений. Так, при $K^{(1)}$ на шинах станции (рис. 13.3) и ликвидации КЗ защитами присоединенных к ним элементов первыми могут отключиться части системы с заземленными нейтралями и может остаться в работе блок с изолированной нейтралью. В этом случае могут возникнуть недопустимые перенапряжения, определяемые перемежающейся дугой емкостного тока. Поэтому необходимо предусматривать устройства, исключающие возможность появления таких режимов или в крайнем случае обеспечивающие их немедленную ликвидацию.

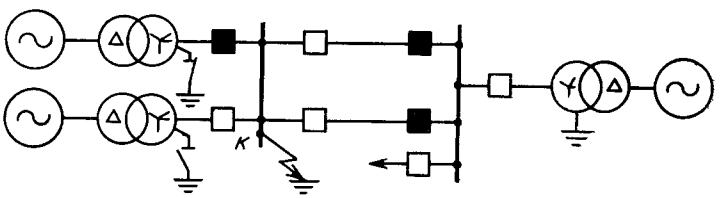


Рис. 13.3. Возможный случай ликвидации повреждения в сети с частично заземленными нейтралями (зачерненными показаны выключатели, отключенные при КЗ на землю в точке K)

Ненормальные режимы (повышения напряжения) возникают также при одностороннем отключении линии с большой емкостной проводимостью, например при $U_{ном} \geqslant 500$ кВ. Они также должны ликвидироваться соответствующими устройствами защиты или противоаварийной автоматики.

13.4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРИМЕНЯЕМЫХ ЗАЩИТ

Защита мощных трансформаторов и автотрансформаторов от внутренних КЗ осуществляется продольными дифференциальными токовыми, а от повреждений внутри бака — также и газовыми защитами. Предлагавшиеся, например Горьковским отделением ТЭП, специальные защиты от витковых КЗ, а также защиты, реагирующие на потоки рассеяния магнитопроводов (ЧПИ), по разным причинам распространения не получили.

Трансформаторы небольшой мощности иногда защищаются более простыми ступенчатыми токовыми защитами в сочетании с газовыми, а трансформаторы малой мощности—только токовыми защитами. Иногда применяются также (в основном в зарубежной практике) токовые защиты, включаемые в заземляющий провод кожуха, действующие при перекрытии фаз на последний. Защиты от внешних КЗ выполняются токовыми, токовыми направленными разных исполнений, в том числе обратной и нулевой последовательностей, а иногда и дистанционными от многофазных КЗ.

13.5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

Общие вопросы осуществления. По принципу действия защита подобна дифференциальным защитам других элементов, например генераторов. Однако ее осуществление связано с целым рядом дополнительных факторов, требующих учета.

Защита в отличие от случая ее применения для генераторов принципиально может реагировать на витковые КЗ в одной фазе ($K_в^{(1)}$), так как они характеризуются неравенством комплексов токов $I_к$ с двух сторон от места повреждения. Однако эти комплексы бывают одинаково направлены (имеют сдвиг по фазе, равный нулю), и поэтому считалось нецелесообразным осуществлять их сравнение в схеме по фазе. Возможно выполнять защиты самостоятельно для каждой из обмоток или иметь одну защиту, охватывающую все обмотки. На практике, как правило, применяется последний вариант, так как некоторые исполнения первого не обеспечивают реагирования защиты на $K_в^{(1)}$ и требуют значительно большего числа ИО и TA. С другой стороны, общие защиты требуют отстройки от бросков намагничивающих токов, которые воспринимаются ими как внутренние КЗ. Существует еще ряд особенностей, требующих учета:

1) сдвиг по фазе сравниваемых токов фаз при отсутствии повреждения в защищаемой зоне, определяемый использованием групп соединений обмоток, отличных от 0 или 12 (в отечественной практике обычно применяется одиннадцатая группа, обусловливающая сдвиг в 30°);

2) неравенство в том же режиме токов плеч, определяемое TA, установленными со сторон с разными $U_{ном}$;

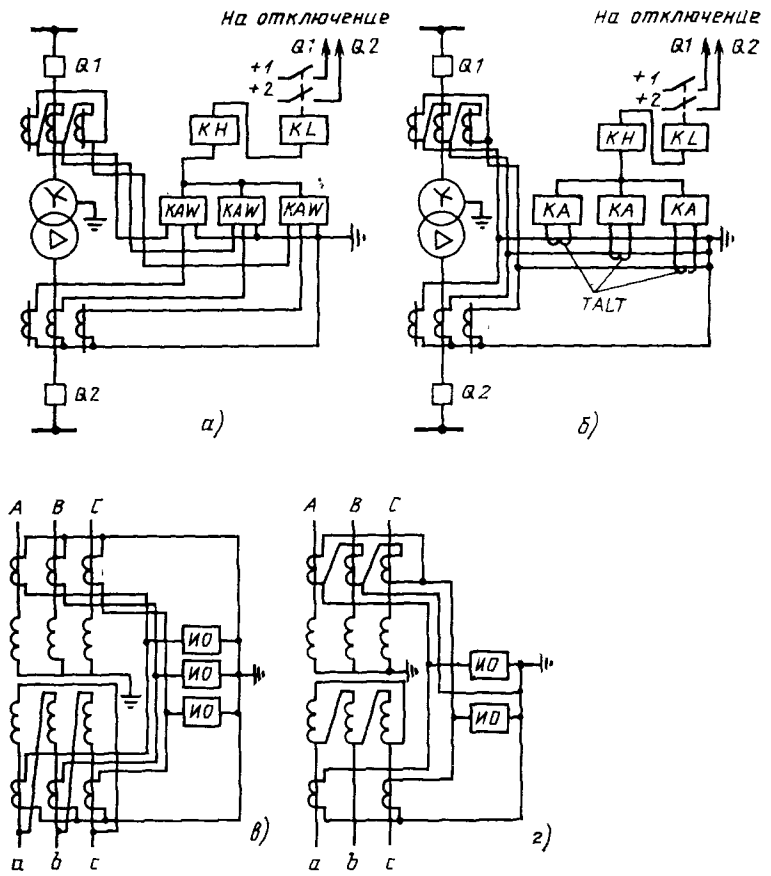


Рис. 13.4. Совмещенные структурные схемы дифференциальных защит трансформаторов (*а* и *б*) и варианты схемы (*в* и *г*)

3) возможное наличие регулирования $n_т$ под нагрузкой.

Схемы выполнения. Общие особенности выполнения защит рассматриваются на примерах их осуществления для двухобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток У/Д-11. На рис. 13.4, *а* приведена совмещенная структурная схема, предполагающая использование защиты с торможением от токов плеч, на рис. 13.4, *б* — схема, в которой отстройка от любых токов небаланса $I_{нб}$ осуществляется только в дифференциальной цепи защиты. Для выравнивания токов плеч по фазе вторичные обмотки *ТА* с одной из сторон (принципиально безразлично, с какой) соединяются в треугольник, а с другой — в звезду. Практически в треугольник соединяются *ТА* со стороны звезды для исключения неправильных срабатываний защиты трансформатора, имеющего заземление нейтрали, при внешних КЗ на землю. При таком соединении обмоток трансформатора с учетом соотношений гл. 1 имеем $\dot{I}_{АД} = (\dot{I}_{АУ} - \dot{I}_{ВУ}) n_т/\sqrt{3}$, $\dot{I}_{ВД}$ $(\dot{I}_{ВУ} - \dot{I}_{СУ}) n_т/\sqrt{3}$ и $\dot{I}_{СД} = (\dot{I}_{СУ} - \dot{I}_{АУ}) n_т/\sqrt{3}$.

Эти соотношения показывают, что должно осуществляться сравнение токов $\dot{I}_{АД}$ с $\dot{I}_{АУ}$, $\dot{I}_{ВД}$ с $\dot{I}_{ВУ}$ и $\dot{I}_{СД}$ с $\dot{I}_{СУ}$ сдвинутых в симметричном режиме на угол 30°. При соответствии группы соединения *ТА* группе соединений обмоток защищаемого трансформатора токи в плечах защиты по фазе выравниваются. Для понижающих трансформаторов небольшой мощности иногда, например при втором варианте защиты (рис. 13.4, *б*), используют схему с уменьшенным числом *ТА* и *ИО* — двумя *ТА* со стороны низшего напряжения, соединенными в неполную звезду, и двумя *ИО* (рис. 13.4, *г*). При этом нерекомендуемой является схема с тремя *ИО* и двумя *ТА*, в которой, как показали опыт и исследования, в *ИО*, находящемся в условиях, отличных от двух других, могут проходить повышенные $I_{нб}$ [10, 48]. При соединении обмоток трансформатора У/У, связывающего части системы, где отсутствуют $K^{(1)}$, используются также двухфазные двухрелейные схемы защиты.

Для исключения необходимости выравнивания токов плеч по фазе может быть применена также схема, в которой *ТА* со стороны треугольника включаются не на его выводах, а на токи в обмотках (рис. 13.4, *в*). Такая схема в нашей стране используется для мощных однофазных автотрансформаторов, имеющих встроенные в баки *ТА*. При этом не требуется соединять *ТА* в треугольник со стороны обмотки, соединенной в звезду. Преимуществом схемы является независимость сравниваемых токов каждой фазы со стороны звезды от токов двух других фаз, что имеет место при соединении *ТА* в треугольник и может ухудшать работу некоторых типов дифференциальных защит.

Для выравнивания абсолютных значений токов плеч в них включаются автотрансформаторы тока или иногда

осуществляется выравнивание в самих ИО значений величин (например, МДС), пропорциональных этим токам. Защищаемые трансформаторы обычно имеют регулирование $n_т$ (за исключением блочных повышающих трансформаторов, в которых регулирование напряжения осуществляется на генераторе). При регулировании на отключенном трансформаторе обычно $\Delta U_{рег} \leqslant 0{,}05\, U_{ном}$ и может не учитываться, если, например, одновременно перестраивается защита. При встроенном регулировании под нагрузкой возможно $\Delta U_{рег} \leqslant 0{,}15 \div 0{,}2\, U_{ном}$ и его наличие, изменяя соотношение токов плеч, влияет на выбор схемы.

Каждая из групп *ТА* отдельно подводится к ИО. Их заземление осуществляется в одной точке — у места включения ИО. Раздельное заземление в данном случае совершенно недопустимо, так как приводило бы к закорачиванию вторичных обмоток *ТА*.

Первичные токи небаланса. Изложенное показывает, что в дифференциальных защитах трансформаторов (автотрансформаторов) токи небаланса определяются бо́льшим числом факторов, чем в аналогичных защитах генераторов, и имеют соответственно повышенные значения. Для упрощения предполагаем, что все слагающие складываются арифметически, имеем $I_{нб,п} = I_{нбε} + I_{нб,рег} + I_{нб,выр} + I_{нб,нам}$, где составляющие $I_{нб,п}$ определяются: $I_{нбε} = k_{апер} k_{одн} ε I_{вн max}$ — погрешностями ε *ТА* с наибольшим $k_{одн} = 1$ и максимальным внешним током $I_{вн\,max}$ (сквозного КЗ или качаний); $I_{нб,рег} = \Delta U_{рег} I_{вн\,max}$ — регулированием $n_т$; $I_{нб,выр} = \Delta f_{выр} I_{вн\,max}$ — неточностью $\Delta f_{выр}$ токов плеч или величин, им пропорциональных; $I_{нб,нам}$ — наличием намагничивающего тока у трансформатора, воспринимаемого защитой как ток внутреннего повреждения. В результате $I_{нб,п} = (k_{апер} k_{одн} ε + \Delta U_{рег} + \Delta f_{выр}) I_{вн\,max} + I_{нам}$. Приведенное выражение подчеркивает полезность схемы по рис. 13.4, *а*, имеющей торможение, определяемое наличием при сквозном КЗ тока $I_{торм}$, пропорционального $I_{вн}$. С другой стороны, желательно, чтобы торможение отсутствовало или было мало при внутренних КЗ, особенно при $K_в^{(1)}$, когда по поврежденной фазе могут проходить значительные сквозные токи.

Броски намагничивающих токов. При нормальной работе значения намагничивающих токов $I_{нам}$ при современных марках трансформаторной стали обычно не превосходят $0{,}01 \div 0{,}02\, I_{ном}$, и с ними можно не считаться. Исключением являются только режимы с повышенными против номинального напряжениями. В этом случае при выборе параметров чувствительных защит приходится иногда учитывать значительно возрастающие $I_{нам}$.

Ток $I_{нам}$ может резко возрастать при включениях трансформаторов (автотрансформаторов) под напряжение или после отключения внешних КЗ, сопровождавшихся значительным снижением остаточных напряжений. В таких случаях возникают броски $i_{нам,бр}$, которые могут достигать значений $6 \div 8\, I_{ном,т}$. При этом следует учитывать, что для автотрансформаторов под $I_{нам}$ понимается ток, соответствующий типовой (а не большей ее проходной) мощности, определяющей размеры магнитопровода.

Рассмотрим (условно) включение однофазного трансформатора при переходе мгновенного значения напряжения питания u через нуль. Практически включение происходит при $u \neq 0$, и процесс имеет более сложный характер. Поскольку установившийся поток $Φ_{уст}$ проходил бы при этом через максимальное значение $Φ_{m\,уст}$, а результирующий поток $Φ_{рез}$ не может изменяться скачком, возникает свободная апериодическая слагающая, максимальное значение которой $Φ_{m\,апер} = -Φ_{m\,уст}$; в результате этого кривая $Φ_{рез} = Φ_{уст} + Φ_{апер}$ оказывается смещенной относительно оси времени и ее максимальная амплитуда достигает значений, близких к $2Φ_{m\,уст}$ (рис. 13.5). Если же учесть возможное наличие остаточной индукции с неблагоприятным знаком, то при включении возникают дополнительные затухающие слагающие потоков и $Φ_{рез}$ будет еще больше. Поток $Φ_{рез\,max}$ может значительно превышать рабочий, а при учете того, что магнитопроводы рассчитываются для работы с большими индукциями, близкими к перегибу кривой намагничивания, магнитопровод насыщается и $i_{нам}$, возрастая сильнее потока, кратковременно достигает

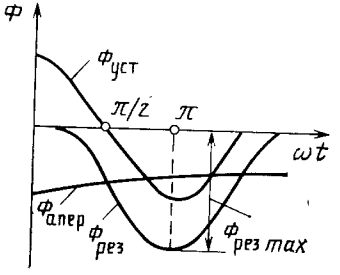


Рис. 13.5. Изменение потока при включении

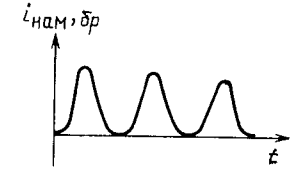


Рис. 13.6. Изменение $i_{нам,бр}$ во времени для однофазного трансформатора

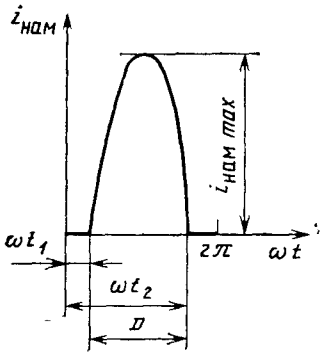


Рис. 13.7. Кривая броска $i_{нам}$ за один период (2π)

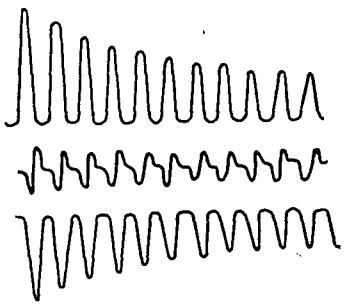


Рис. 13.8. Изменение $i_{нам,бр}$ во времени для трехфазного трансформатора

очень больших значений, практически полностью смещенных относительно оси ординат (рис. 13.6). Однако они обычно оказываются меньшими максимальных переходных токов сквозных КЗ. Токи $i_{нам,бр}$ во времени убывают, снижаясь до весьма малых значений в установившемся режиме; однако снижение $i_{нам,бр}$ проходит значительно медленнее, чем снижение тока КЗ $i_к$, так как постоянные времени $T=L/R$ цепи с $i_{нам}$ обычно значительно больше постоянных времени цепи КЗ.

Выявление слагающих тока $i_{нам,бр}$ может осуществляться разными методами. Трудности точных расчетов определяются тем, что кроме апериодической слагающей в токах $i_{нам,бр}$ содержатся знакопеременные затухающие слагающие, очень часто неточно называемые гармониками. Применительно к такому случаю, как отмечалось выше, непосредственно не вполне пригодны математические методы разложения в ряд Фурье, использование преобразования Фурье в виде текущего спектра (см. гл. 1) и подобные им приемы гармонического анализа. Однако для упрощения такими приемами часто пользуются. При таком допущении, как показано в [7], анализ удобно проводить, заменяя кривую намагничивания стали ломаной линией. Ток $i_{нам}$ в относительных единицах определяется по выражениям $i_{нам,бр}=0$ или $i_{нам,бр}=-\cos\omega t-\cos D/2$, где D — ширина импульса тока (рис. 13.7). Рассмотрение этих выражений и их представление на рис. 13.7 за один период 2π дает возможность сделать следующие выводы:

1) однополярный $i_{нам,бр}$ в пределах периода имеет один максимум, в то время как определяющее его рабочее напряжение (а следовательно, и ток) — два максимума;

2) $i_{нам,бр}=0$ при $0\leqslant\omega t\leqslant\omega t_1$ и $\omega t_2\leqslant\omega t\leqslant 2\pi$.

Таким образом, в пределах каждого периода в отличие от синусоидальных величин существуют бестоковые паузы, в пределах которых $i_{нам,бр}$ теоретически отсутствует. Разложение кривой $i_{нам,бр}$ показывает, что в ней, как указывалось выше, помимо основной слагающей содержатся значительная апериодическая слагающая и знакопеременная слагающая двойной частоты (100 Гц), в пределах реальных оснований D не обращающаяся в нуль. Слагающие более высоких частот имеют значительно меньшие значения или вообще отсутствуют. Возможное соотношение всех слагающих приведено в табл. 13.1 [72].

В установившемся режиме ток $I_{нб}$ также несинусоидален, но является уже периодической функцией. Входящие в него гармоники, как указывалось в гл. 9 и 12, иногда используются в защитах от $K_з^{(1)}$.

Большие теоретические и экспериментальные работы по определению значений бросков были, как указывалось в гл. 1, проведены в НПИ (А. Д. Дроздовым и др.) и за рубежом. Эти работы дали возможность подойти к аналитическому определению максимальных значений бросков. В общем виде их предлагается определять (см. гл. 1) по выражению $i_{нам,бр\,max}=c_{бр}^{(к)}U_{раб}/[\sqrt{3}(X_с+X_{т,н})]$, где $X_с$ — эквивалентное сопротивление питающей системы, а $X_{т,н}$ — сопротивление защищаемого трансформатора в условиях насыщения его магнитопровода. Значения коэффициента броска $c_{бр}^{(к)}$ обоснованы в [36].

В трехфазных трансформаторах вид переходных $i_{нб,бр}$ оказывается другим из-за взаимного влияния фаз. С использованием общего подхода была выявлена известная и ранее возможность появления в одной из фаз знакопеременного тока, а в двух других — токов с апериодическими встречно направленными слагающими. При этом форма $i_{нб,бр}$ зависит от группы соединения обмоток и разновременности включения фаз. Знакопеременный $i_{нб,бр}$ бывает меньше рассмотренного выше, но все же может достигать $1\div 2$ $I_{ном,т}$, имеет знакопеременную слагающую двой-

ной частоты и некоторые бестоковые паузы. Примерный вид $i_{нб,бр}$ для этого случая приведен на рис. 13.8 (см., например, [48]), а также был дан в гл. 1 (см. рис. 1.54).

Таблица 13.1

Составляющие броска $I_{нам,бр}$	Отношение амплитуд составляющих к основной гармонике, %
Основная гармоника	100
Апериодическая	57,7
Втораи гармоника	63
Третьи гармоника	26,8
Четвертая гармоника	5,1
Пятаи гармоника	4,1
Шестая гармоника	3,7
Седьмаи гармоника	2,4

Примечание. Под высшими гармониками здесь следует понимать знакопеременные затухающие составляющие, имеющие постоянные периоды (см. гл. 1).

Принципы отстройки от $i_{нб,бр}$. Поскольку броски воздействуют на защиту как токи внутреннего КЗ, отстройку от них наиболее целесообразно выполнять, используя несинусоидальный вид кривой $i_{нб,бр}$, отличный от вида кривой тока КЗ $i_к$. При этом, однако, следует учитывать, что как $i_{нб,бр}$, так и $i_к$ могут содержать апериодические слагающие (затухающие, однако, при $i_к$ значительно быстрее), а также то, что вторичные $i_к$ за счет трансформации их *ТА* при больших кратностях токов КЗ могут иметь, как и $i_{нб,бр}$, бестоковые паузы (см. гл. 3); кроме того, при насыщении за счет апериодической слагающей $I_к$ в них содержатся и слагающие двойной частоты. Все это в ряде случаев усложняет отстройку защит от $i_{нб,бр}$ и ограничивает области применения отдельных вариантов отстройки.

За последние десятилетия за рубежом и в СССР было разработано много способов отстройки. Разработки 30-х, начала 40-х годов были обобщены в [72]. Они в основном базировались на электромеханической элементной базе. Исторически первой и в настоящее время неприемлемой была отстройка выдержкой времени, создаваемой реле с зависимыми или независимыми выдержками времени. В начале 30-х годов во Франции было предложено использование слагающих двойной частоты. Они могут быть применены для блокирования или создания специального загрубления; в настоящее время этот способ широко применяется в зарубежной практике часто в сочетании с дифференциальной токовой отсечкой, резервирующей отключение КЗ при $I_к$, обусловливающих появление значительных слагающих двойной частоты. Было предложено много вариантов блокировок, использующих реле напряжения. Все они оказались неэффективными, частично из-за нечеткости работы при бросках, возникающих при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ. В конце 30-х годов в Германии была предложена схема с включением ИО тока через так называемый быстронасыщающийся промежуточный *TALT*, плохо трансформирующий апериодическую слагающую $i_{нб,бр}$, однако из-за неудачно выбиравшихся расчетных индукций *TALT* при срабатывании она была недостаточно эффективна. В отечественной практике, как указывалось в гл. 8 и 12, данная схема получила широкое распространение также для отстройки от переходных значений $I_{нб}$ при сквозных КЗ с применением в ней *TALT* усиленного действия. Косвенно свойства схемы используются и в защитах с магнитным торможением.

Необходимо отметить, что и некоторые другие рассматриваемые ниже способы отстройки от $i_{нб,бр}$ обеспечивают в известной мере и отстройку от переходных $i_{нб}$ при внешних КЗ, однако часто не очень эффективно и недостаточно обоснованно.

В начале 40-х годов в Германии и Швейцарии были разработаны первые защиты, использующие тот факт, что максимумы тока при бросках возникают 1 раз за период, а тока $i_к$ — 2 раза, т. е. бестоковые паузы на определенном уровне измерения при бросках могут быть значительно больше, чем при КЗ. Реализация этого предложения на электромеханической элементной базе была не очень эффективной. Будучи оригинально использованным в СССР на новой элементной базе, способ дал возможность создать отстройку защиты от $i_{нб,бр}$, получившую у нас широкое применение (см. §13.6). Были предложены и другие способы отстройки, например сравнение значений полуволн токов противоположных знаков. Из предложений, сделанных и проработанных в последующие годы на более прогрессивных элементных базах, следует отметить разработку начала 60-х годов кафедры РЗиА МЭИ (Н. И. Овчаренко, М. Х. Салех — Египет, Х. Л. Дмитриев и В. Г. Дорогунцев), предложившей оригинальное решение

отстройки [48]. Она основана на выпрямлении дифференциального тока и выделении из него постоянной слагающей и слагающей промышленной частоты. Оказалось, что слагающие промышленной частоты выпрямленного дифференциального тока могут быть использованы для блокировки дифференциальной защиты при $i_{нб,бр}$. Исследования и разработки, проведенные ЧГУ (А. М. Дмитренко), показали, что на этом принципе, используя выпрямленную производную дифференциального тока, может быть создана на современной микроэлектронной базе интересная время-импульсная схема относительно быстродействующей защиты, получившей промышленную реализацию (см., например, [48]).

Торможение от токов плеч, создавая загрубление защиты, может также несколько улучшать отстройку от переходных $i_{нб}$ при сквозных КЗ, поскольку их значения возрастают с возрастанием сквозных $I_к$, а последние определяют $I_{торм}$. Необходимо, однако, отметить, что даже лучшие разработки, обеспечивая определенную отстройку от $i_{нб,бр}$ и переходных токов небаланса, не дали возможности в отечественной практике получать $I_{с,з\,min}$ трансформаторов меньше примерно $0{,}3 \div 0{,}7 I_{ном,т}$, в то время как было бы желательно (например, для мощных автотрансформаторов) иметь их равными $0{,}1 \div 0{,}15\, I_{ном,т}$. Таким образом, пока нельзя считать проблему создания высокочувствительных дифференциальных защит трансформаторов полностью разрешенной. Исключением является реализованная только для повышающих трансформаторов (но не автотрансформаторов) защита от $K_в^{(1)}$, разработанная НПИ (А. С. Засыпкин) и основанная на сравнении токов в параллельных ветвях обмотки, специально для этого имеющих отдельные выводы [71].

Необходимо отметить, что в СССР в конце 30-х годов была предложена и далее получила с 40-х годов по инициативе Главного технического управления Минэнерго (И. А. Сыромятников) широкое применение грубая дифференциальная защита без выдержки времени, отстройка которой от $i_{нб,бр}$ и $I_{нбmax}$ при сквозных КЗ осуществляется только по току срабатывания обычного органа тока. Такая защита по аналогии с токовыми отсечками линии (см. гл. 5) была названа *дифференциальной токов отсечкой*. Она использовалась на понижающих трансформаторах небольшой мощности, не имеющих регулирования напряжения под нагрузкой. В настоящее время ее довольно часто

применяют в СССР и за рубежом как вспомогательную к основным чувствительным, но значительно более сложным дифференциальным защитам, которые по некоторым отмеченным выше причинам могут отказывать при внутренних КЗ, сопровождающихся большими кратностями $I_к$.

Выбор параметров, оценка и области применения. Выбор параметров и структурных схем (см. рис. 13.4) определяется принципами, принятыми для отстройки от расчетных токов небаланса. Для дифференциальных токовых отсечек с выравненными (но без автотрансформаторов) сравниваемыми токами плеч (см. рис. 13.4, *б*) при достаточно инерционных старых исполнениях электромеханических реле тока удавалось получать $I_{с,з} \approx 3{,}5 \div 4{,}5 I_{ном,т}$, а иногда и менее. Для новых исполнений ИО тока $I_{с,з}$ могут достигать $6 \div 8 I_{ном,т}$, что уже мало приемлемо. При применении органов тока с насыщающимися *TAL* усиленного действия, имеющими уравнительные обмотки, обеспечивающие при нормальной работе $I_{2I}(w_{урI} + w_{раб}) = I_{2II}(w_{урII} + w_{раб})$, удается иметь по схеме на рис. 13.4, *б* $I_{с,з} \approx 1 \div 1{,}2 I_{ном,т}$. Для защит с магнитным торможением (по схеме на рис. 13.4, *а*) $I_{с,з\,min} \approx 1{,}5\, I_{ном,т}$, что делает защиту мало приемлемой. Имелось, как отмечалось выше, предложение НПИ по повышению чувствительности этой защиты, однако в связи с переходом на новую элементную базу оно промышленностью не было реализовано. У новых дифференциальных токовых защит с торможением от токов плеч (рис. 13.4, *а*), имеющих специальную отстройку от $i_{нб,бр}$ и частично от переходных $i_{нб}$ при внешних КЗ (см. § 13.6), $I_{с,з\,min} \approx 0{,}3 \div 0{,}7\, I_{ном,т}$.

В настоящее время дифференциальные токовые защиты разных исполнений, но обязательно без выдержек времени, применяются как основные практически для всех автотрансформаторов и трансформаторов мощностью больше 4000 кВ·А и даже больше 1000 кВ·А, если токовые ступенчатые защиты не обеспечивают коэффициента чувствительности $k_ч \geqslant 2$ при КЗ на выводах низшего напряжения или имеют при этом неприемлемую выдержку времени.

Недостаточная чувствительность дифференциальных защит при внутренних КЗ с малым числом замкнувшихся витков допускается с учетом наличия газовых защит (см. § 13.8), которые обычно ликвидируют такие повреждения.

13.6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С КОМПЛЕКСНОЙ ОТСТРОЙКОЙ ОТ ТОКОВ НЕБАЛАНСА

Рассматривается внедренная в серийное производство и эксплуатацию схема, разработанная ВНИИР (А. М. Дмитриенко) применительно к защите мощных трансформаторов и автотрансформаторов. В основу ее осуществления положены рассмотренные выше принципы отстройки от бросков $i_{нб,бр}$ переходных и установившихся токов небаланса при сквозных КЗ. Использование более современной элементной базы дало возможность внести в защиту некоторые принципиально новые улучшения.

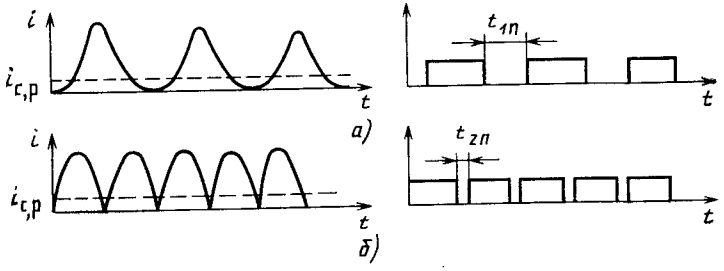


Рис. 13.9. Паузы, получающиеся в выпрямленных $i_{нам,бр}$ (*а*) и токах в дифференциальной цепи при внутрениих КЗ (*б*)

Основные положения по осуществлению. Для отстройки от токов небаланса использованы четыре в принципе известных (см. § 13.5) способа: использование положения о том, что при бросках намагничивающего тока за период появляется только один максимум $i_{нб,бр}$, а при КЗ их бывает два, что обусловливает разные бестоковые паузы при определенном конечном значении токов; использование наличия в $i_{нб,бр}$ составляющей двойной частоты, которая обычно отсутствует в первичных токах КЗ; отстройка от любых $i_{нб}$ выбором $I_{с,з}$ (токовая отсечка) и, наконец, применение торможения от токов плеч, особенно полезного при наличии встроенного регулирования $n_т$ под нагрузкой, но дающего некоторый положительный эффект и при отстройке от переходных $i_{нб}$ при сквозных КЗ. Целесообразность первого способа отстройки иллюстрируют соотношения, приведенные на рис. 13.9, *а* и *б*. При броске $i_{нб,бр}$ получаются паузы $t_{1п}$ значительно бо́льшие, чем $t_{2п}$ при внутренних выпрямленных токах КЗ $i_к$, если предположить $i_к$ синусоидальными. В действительности при трансформации и насыщении *ТА* токи $i_{нам,в}$ могут иметь в течение периода некоторые не явно выраженные паузы с небольшим затуханием отрицательных полуволн (рис. 13.10, *в*). Для улучшения работы схемы в этих условиях (создания необходимой бестоковой паузы) в схему введено дифференцирование тока $I_к$, осуществляемое трансреактором, включаемым в дифференциальную цепь. Это дифференцирование может быть полезно также для подчеркивания значений составляющих двойной частоты $i_{нб,бр}$, используемых для второго способа отстройки от $i_{нб,бр}$, создающего дополнительное торможение. Трансреактор плохо трансформирует и апериодические слагающие токов небаланса. Поэтому его использование полезно также для отстройки от переходных $i_{нб}$ и для уменьшения времени срабатывания защиты при внутренних КЗ. Третий способ отстройки — использование дифференциальной токовой отсечки — обеспечивает срабатывание защиты при больших кратностях токов $I_к$ внутренних КЗ, когда торможение от слагающих двойной частоты могло бы недопустимо загрублять защиту. Торможение от токов плеч (четвертый способ) осуществляется суммой выпрямленных токов плеч через специальный формирователь, создающий ток смещения, пропорциональный тормозному току; при этом для обеспечения работы защиты без торможения (с $I_{с,з min}$) при небольших токах в фазах в случаях $K_в^{(1)}$ последовательно в тормозную цепь включается стабилитрон.

Использование современной элементной базы позволило также применить время-импульсный способ сравнения, широко используемый в настоящее время для выполнения разных защит, но со своеобразным схемным решением.

Выполнение схемы. Упрощенная структурная однолинейная схема защиты, достаточная только для выявления ее основных рассмотренных особенностей, приведена на рис. 13.10, *а*. Там же (рис. 13.10, *б*) дана результирующая характеристика защиты $I_{с,з}=I_{с,з min}+k_{торм}(I_{торм}-I_{торм,нач})$.

Общая оценка защиты. Рассмотренная схема учитывает многие факторы, которые должны обеспечивать ее эффективное функционирование. Однако она получилась достаточно сложной и имеющей все же некоторые недостатки, к которым можно отнести по данным опыта эксплуатации: иногда недостаточно полноценную отстройку от переходных $i_{нб}$ при сквозных КЗ, обусловленную тем, что она осуществляется способом, предназначенным в ос-

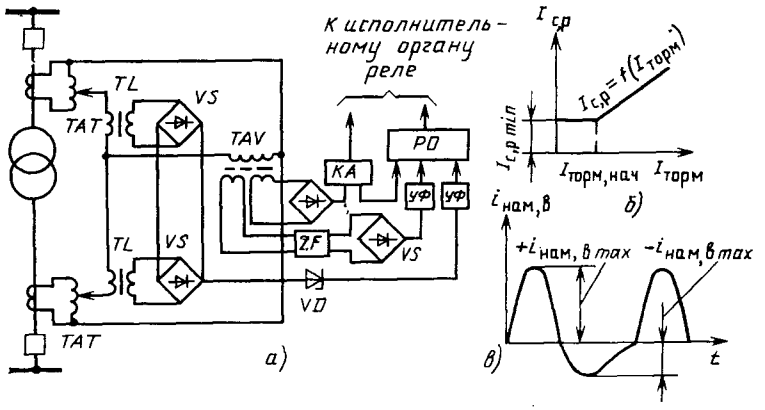


Рис. 13.10. Совмещенная структурная схема дифференциальной токовой защиты с время-импульсной отстройкой от переходных токов небаланса и торможением (*а*), ее характеристика $I_{с.р}=f(I_{торм})$ (*б*) и кривая броска $i_{нам.в}$, трансформированного глубоконасыщенным *ТА* (*в*)

новном для предотвращения действия защиты при бросках $i_{нб.бр}$; несогласованность по чувствительности токовой отсечки и, например, устройства, использующего торможение от слагающих двойной частоты (желательно было бы иметь у отсечки ток срабатывания, меньший принятого в защите). Поэтому на практике получают распространение, например для понижающих трансформаторов средней мощности, и более простые схемы, среди которых следует отметить разработанную ЧГУ (А. М. Дмитриенко) схему с торможением от составляющих промышленной частоты — выпрямленной производной дифференциального тока (см. § 13.5).

В целом следует констатировать, что создание полноценной высокочувствительной защиты требует дальнейших исследований и разработок.

13.7. ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ С ЧИСЛОМ ГРУПП *ТА* БОЛЬШЕ ДВУХ

Такие случаи возникают при осуществлении защит автотрансформаторов, трехобмоточных трансформаторов, а также присоединении их сторон к системе, например через два выключателя.

Согласно общим условиям выполнения дифференциальных защит (см. гл. 8) ее *ТА*, ограничивающие защищаемую зону, должны устанавливаться со всех сторон соединений защищаемого элемента с остальной частью системы.

Соединение всех *ТА* защиты между собой должно обеспечивать отсутствие тока в дифференциальной цепи защиты во всех режимах, если нет КЗ в защищаемой зоне. Для этого кроме рассмотренных выше выравниваний сравниваемых токов плеч по фазе и абсолютному значению все расчеты необходимо производить, исходя из одной и той же мощности вне зависимости от реальных мощностей ветвей защищаемого элемента.

Токи небаланса в рассматриваемой защите часто больше, чем для защит трансформаторов с двумя группами *ТА*. Это прежде всего определяется возможными повышенными кратностями токов сквозных КЗ за счет прохождения через *ТА*, расположенные со стороны внешнего КЗ, суммы токов других сторон (например, трехобмоточного трансформатора с тремя выключателями) и отсутствия ограничения слагающих токов реактивностью защищаемого элемента при присоединении к шинам со стороны питания через несколько (например, два) выключателей. Поэтому защиты, как правило, имеют торможение от токов плеч.

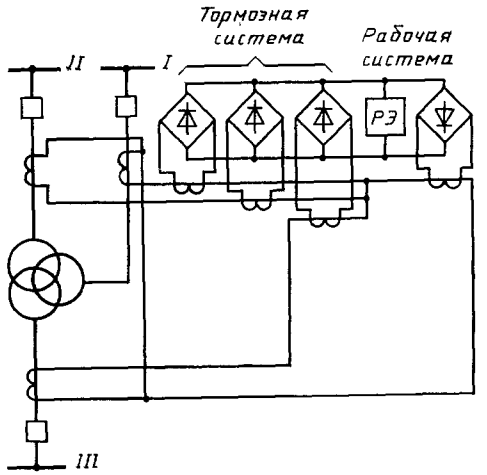


Рис. 13.11. Совмещенная структурная схема дифференциальной токовой защиты с торможением на выпрямленных токах с тремя тормозными системами

Значительное увеличение числа тормозных систем у электромеханических реле вызывало трудности. Принципиально лучшие результаты были получены при использовании многополюсных индукционных систем [3]. Практическое применение имели и реле с магнитным торможением с несколькими тормозными системами по разработке НПИ (А. Д. Дроздов и др., см., например, [10]). Проще и эффективнее вопрос решается при использовании торможения от выпрямленных токов плеч (рис. 13.11). Это торможение может производиться от тока одного плеча с $I_{к,вн max}$ или от арифметической суммы выпрямленных токов плеч. Второй вариант считается предпочтительным. В нем торможение характеризуется выражением $k_{тормI}|\underline{I}_{кI}|+k_{тормII}|\underline{I}_{кII}|+\ldots$ $\ldots+k_{тормn}|\underline{I}_{кn}| = k_{торм,э}\underline{I}_{к,вн max}$, где $k_{торм,э}$ — *эквивалентный коэффициент торможения* (введен А. Г. Геворковым), СРЗиУ ТЭП). В целях упрощения часто принимаются $k_{тормI}=k_{тормII}=\ldots=k_{тормn}$. Для этого случая получаем

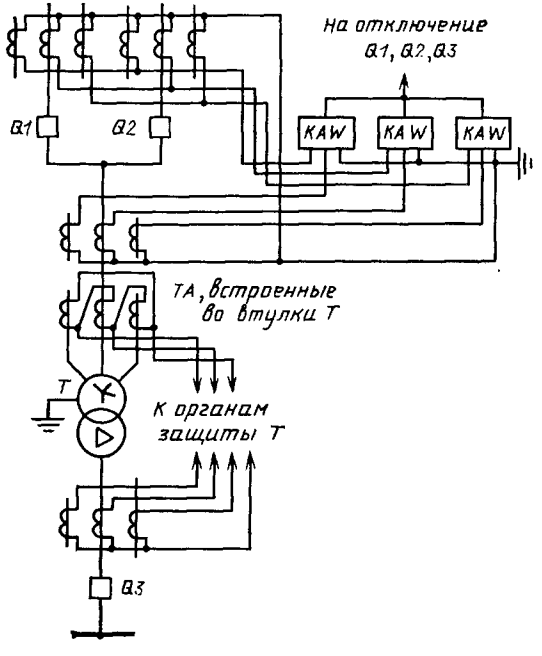


Рис. 13.12. Совмещенная структурная схема дифференциальной токовой защиты ошиновки

$k_{торм,э}=2\,k_{торм}$. Выбор одинаковых $k_{торм}$ имеет тот недостаток, что может без надобности загрублять защиту при некоторых внутренних КЗ.

Для облегчения осуществления защит трансформаторов (автотрансформаторов) с несколькими выключателями на одном из высоких напряжений ограничивают защищаемую ими зону *ТА*, встроенными во втулки трансформаторов со стороны указанного напряжения. При этом внешняя часть втулок трансформаторов (автотрансформаторов) вместе с соединениями до *ТА* выключателей защищается отдельной дифференциальной токовой защитой (рис. 13.12), называемой *защитой ошиновки*. Она осуществляется, как рассмотренные выше защиты шин (см. гл. 11). Такое выполнение бывает полезным и по другим причинам, например при отсоединенном через разъединитель трансформаторе (автотрансформаторе) для проверки, ремонта дает возможность сохранять в работе всю схему соединений (оставлять включенными все выключатели).

13.8. ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА

Общие данные. Баки трансформаторов и автотрансформаторов заполняются маслом, которое используется как для целей изоляции, так и охлаждения. Бак снабжается расширителем (рис. 13.13), воздушный объем в верхней части которого сообщается с атмосферой. Бак часто имеет также герметически закрытую мембраной выхлопную трубу, предохраняющую его от механических деформаций при взрывообразных выделениях газа.

Корпус *газового реле* врезается в маслопровод между крышкой бака и расширителем так, чтобы не препятствовать циркуляции масла между ними. *Газовой* называется защита, основанная на использовании газов, возникающих в результате разложения масла и других изолирующих материалов под действием электрической дуги и других факторов (например «пожара» стали магнитопровода). Интенсивность газообразования зависит от характера и размеров повреждения. Газ, образующийся при повреждениях, может использоваться путем установления объема газа или быстроты его образования, косвенно определяемой скоростью движения масла в трубопроводе к расширителю. Обычно применяются оба способа. При защите же трансформаторов малой мощности или встроенных

устройств регулирования напряжения под нагрузкой (размещаются в баке в отдельном кожухе) применяют реле, реагирующее только на быстрое выделение газа.

Реле, осуществляющее газовую защиту, было предложено в конце 20-х годов в Германии (Бухгольцем). С тех пор оно в зарубежной литературе обычно называется реле Бухгольца.

Процессы, проходящие в маслонаполненном баке работающего трансформатора, могут быть достаточно слож-

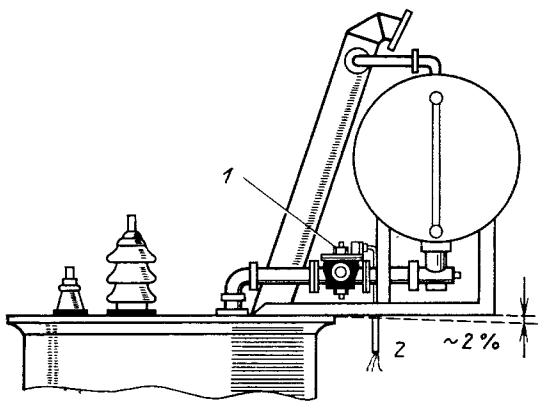


Рис. 13.13. Установка газового реле на трансформаторе (бак трансформатора и труба к маслорасширителю имеют небольшой, примерно 2 %, наклон к горизонту):

1 — газовое реле; *2* — подвод оперативного тока

ными. На них влияют как внешние факторы (внешние КЗ, колебания почвы и т. д.), так и внутренние (например, изменения режимов работы системы охлаждения). Вопросам разработки конструкций газовых реле, а также гидродинамическим процессам, влияющим на их работу, к сожалению, у нас не уделялось должного внимания. Обобщающих работ по переходным гидродинамическим процессам в трансформаторах также мало. Следует только отметить работу кафедры «Электрические сети и системы» ЧПИ [73], в которой, в частности, сделана попытка создать электрические модели, имитирующие такие переходные процессы в трансформаторах и автотрансформаторах. По улучшению действия защиты полезные работы выполнены в Союзтехэнерго, а по разработке улучшенных конструкций—релейщиками Челябэнерго (Ф. Ф. Дерюгиным, А. Д. Булитко и др.). В настоящее время в нашей стране широко применяются газовые реле, выпускаемые в Германии.

Выполнение и работа. Существующие конструкции имеют два, иногда три органа. Один реагирует на выделяющийся объем газа, другие — на скорость прохождения масла или смеси масла и газа из бака в расширитель. Конструкции трех основных исполнений — старой, разработанной в Челябэнерго и освоенной на заводе, а также поставляемой из Германии, представлены соответственно на рис. 13.14, *а*, *б* и *в* (см., например, [66, 73]). Их особенности рассматриваются ниже.

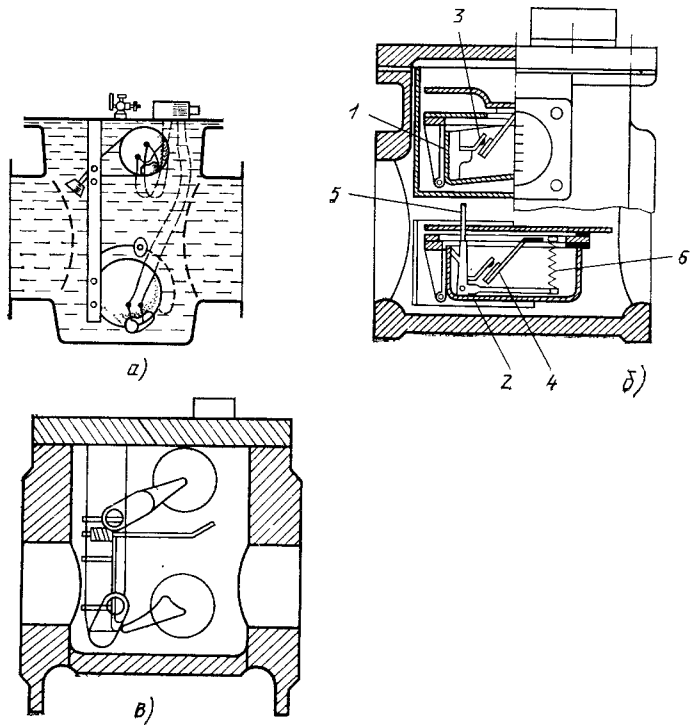


Рис. 13.14. Принципы выполнения газовых реле (подвижные элементы на рис. 13.14, *б* и *в* даны в предположении, что корпус реле заполнен маслом, как на рис. 13.14, *а*):

1 — чашка *1*; *2* — чашка *2*; *3* — контакт *1*; *4* — контакт *2*; *5* — лопасть; *6* — спираль

Реагирующие органы укреплены на осях, вокруг которых могут поворачиваться; верхний орган предназначен срабатывать при определенном объеме газа, скопившегося в верхней части корпуса, и действует на сигнал, нижний (или два связанных между собой нижних) — при большой скорости движения через него и действует на отключение. Органы выполнены в виде поплавков, представляющих собой полые металлические цилиндры (рис. 13.14, *а*) или полые пластмассовые шарики (рис. 13.14, *в*), а в конструкции по рис. 13.14, *б* — открытые сверху чашечки. В двух последних конструкциях дополнительно к поплавкам устанавливаются лопасти-пластины, расположенные поперек движения потока в маслорасширитель и обеспечивающие эффективное действие защиты при быстром движении потока в расширитель.

Для облегчения выхода газов крышка бака и маслопровод должны иметь по направлению к расширителю небольшой подъем (примерно 2 %). Контакты реле выполняются по-разному. В конструкции по рис. 13.14, *а* они расположены в герметизированных трубках и замыкаются при срабатывании ртутью, переливающейся в этих трубках. В конструкции по рис. 13.14, *б* медные контакты расположены непосредственно в чашечках, т. е. работают непосредственно в масляной среде. В конструкции по рис. 13.14, *в* для них применены герконы (герметизированные контакты), которые замыкаются под воздействием поля постоянных магнитов, перемещаемых поплавками и поворотной пластиной. Выводы от контактов располагаются обычно в коробке, расположенной на резервуаре реле.

При нормальной работе резервуар реле заполнен маслом, поплавки, лопасти-пластины подняты и контакты реле разомкнуты. При слабом газообразовании, характеризующем незначительные повреждения (например, «пожар» стали), газы, поднимаясь вверх, скапливаются в верхней части резервуара, вытесняя из него масло. Верхний орган начинает опускаться, и его контакт замыкает цепь сигнализации. При сильном газообразовании, характеризующем серьезные повреждения (например, $K_{в}^{(1)}$), под влиянием большого количества выделяющихся газов масло интенсивно вытесняется в расширитель и опрокидывает своей струей нижний поплавок или лопасти-пластины, контакт которых замыкает цепь отключения. Верхний поплавок может при этом срабатывать позже. В случае сильного понижения уровня масла (например, течь в кожухе) реле срабатывает, замыкая сначала сигнальный, а затем и отключающий контакт. К реле предъявляются жесткие требования в части вибростойкости, с тем чтобы исключать возможность их ложных срабатываний при вибрациях, возникающих под воздействием электродинамических усилий при внешних КЗ, колебаниях почвы и т. д.

Общая оценка и область применения. Защита до последнего времени являлась единственной, построенной не на электрическом принципе действия. Постепенно конструкции газовых реле совершенствовались и продолжают совершенствоваться. Последние их модификации (например, по рис. 13.14, *в*) являются достаточно приемлемыми, хотя все еще не лишены некоторых недостатков. Так, например, отмечалась возможность отказов в срабатывании при быстром уходе масла из трансформатора, снабженного указанной выше пленочной защитой [73]. Часть практических недостатков защиты была также устранена проведенной Союзтехэнерго работой, установившей дифференцированный подход к выбору уставок защиты по скорости движения потока масла в зависимости от мощности трансформаторов и системы их охлаждения.

Достоинствами газовой защиты являются: высокая чувствительность, позволяющая реагировать практически на все опасные повреждения внутри бака; весьма небольшое для неэлектрического принципа время срабатывания (0,1—0,15 с) при больших скоростях потока масла. Защита имеет следующие недостатки: значительное время срабатывания при медленном газообразовании, что не позволяет отнести ее к быстродействующим; не реагирует на повреждения, возникающие вне бака, но в зоне между трансформатором и выключателями (на вводных втулках, соединениях с выключателями), поэтому она не может быть единственной защитой от внутренних повреждений; при использовании защиты в районах с сильными землетрясениями, на установках, вблизи которых производят взрывные работы, и т. п. могут возникать затруднения с выполнением ее действия на отключение; защиту временно переводят действием только на сигнал при доливке масла, включении трансформатора в работу после ремонта.

В настоящее время газовая защита используется очень широко. Ее применение считается обязательным на всех трансформаторах (автотрансформаторах) мощностью выше 6300 кВ·А, а также мощностью 1000—4000 кВ·А, не

имеющих дифференциальной или другой быстродействующей защиты; на внутрицеховых трансформаторах мощностью выше 630 кВ·А независимо от наличия других быстродействующих защит.

13.9. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ЗАЗЕМЛЯЮЩИМ ПРОВОДОМ

Защитой с заземляющим проводом называется токовая защита нулевой последовательности, присоединяемая к *ТА*, включаемому в цепь провода, который заземляет металлические конструкции (баки трансформаторов, автотрансформаторов, некоторые виды комплектных распределительных устройств и т. п.). Для правильного функционирования защиты эти конструкции не должны иметь связей с землей.

Принцип действия и выполнение. Действие защиты основывается на различии значений токов, проходящих по заземляющему проводу при внешних КЗ и перекрытиях на металлическую конструкцию (например, бак трансформатора). В первом случае ток мал, во втором может быть достаточен для срабатывания защиты. Для отстройки от случайно проходящих токов, например при возникновении на конструкции напряжения от вспомогательных источников, действие защиты иногда дополнительно контролируется напряжением нулевой последовательности (см., например, [72]).

На рис. 13.15, *а* приведена защита трансформатора, работающего в сети с глухозаземленными нейтралями. Трансформатор установлен на монолитном железобетонном фундаменте, металлические части которого не имеют связей с заземляющим контуром электроустановки. Ток срабатывания защиты в соответствии с работами СРЗиУ ТЭП (Г. Т. Грек и Н. Е. Рибель), в которых учитывается примерное токораспределение при внешних $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ (рис. 13.15, *б*), выбирается по выражению $I_{с.з} \geqslant k_{отс} k_{отmax} \times (k_{ток} 3I_0)_{max}$, где $k_{ток}$ — коэффициент токораспределения для $3I_0$ в месте КЗ, $k_{отmax}$ — коэффициент отсоса, учитывающий часть тока $(k_{ток} 3I_0)_{max}$, ответвляющегося на фундамент и далее проходящего через заземляющий провод с *ТА* защиты. Сопротивления монолитных фундаментов по экспериментальным данным авторов относительно велики, и $i_{отmax}$ иногда не превышает тысячных долей. Чувствительность защиты определяется по выражению $k_ч \approx$

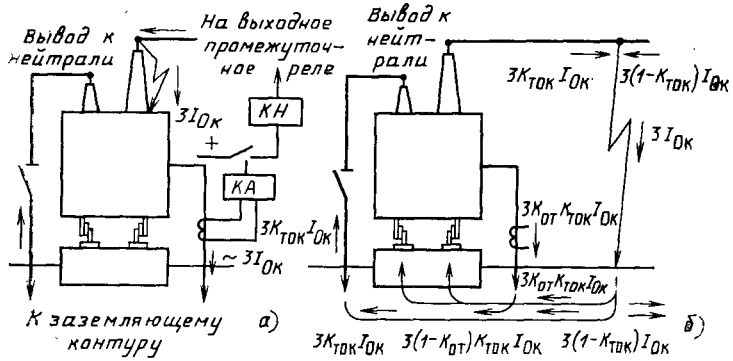


Рис. 13.15. Токовая защита нулевой последовательности с заземляющим проводом:

а — принципиальное выполнение и действие при повреждении трансформатора. *б* — поведение при КЗ на землю в питающей сети

$\approx 3I_{0min}/I_{с.з}$, где $3I_{0min}$ — полный ток в месте повреждения.

Оценка и область применения. Защита имеет довольно широкое применение в ряде стран. В отечественной практике ее начали применять в 50-е годы на подстанциях с упрощенными схемами электрических соединений на высшем напряжении 110—220 кВ, когда для защиты трансформаторов использовались *ТА*, встроенные во втулки трансформаторов, и защита трансформаторов не могла реагировать на наружные перекрытия этих втулок. Однако широкое использование для фундаментов сборного железобетона поставило под сомнение эффективность защиты. В связи с этим в настоящее время она в нашей стране применяется редко, в частности для выявления поврежденной фазы трехбаковых автотрансформаторов (трансформаторов) станций с целью действия основных защит на устройство пожаротушения только одной фазы (см., например, [65]).

13.10. КОМПЛЕКСНЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

На понижающих трансформаторах небольшой мощности, не имеющих дифференциальной защиты, часто используются схемы, сочетающие газовую защиту с токовой защитой, включаемой с питающей стороны и имеющей две

ступени — I (токовая отсечка без выдержки времени) и III (максимальная токовая защита); структурная схема токовой защиты приведена на рис. 13.16. Ток срабатывания I ступени отстраивается от $K^{(3)}$ за трансформатором: $I^{I}_{с,з}=k_{отс}I^{(3)}_{кmax}$. Ее чувствительность $k_ч$ определяется по КЗ на вводах трансформатора с питающей стороны и бывает достаточно большой, однако совершенно недостаточной для охвата всех внутренних КЗ в баке. Третья ступень выполняется с независимой или зависимой характеристи-

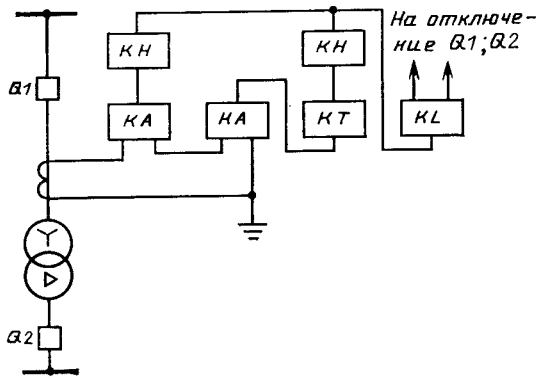
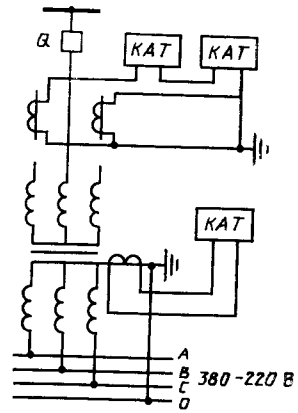


Рис. 13.16. Совмещенная структурная схема двухступенчатой токовой защиты трансформатора небольшой мощности

кой выдержки времени и имеет назначение дополнять I ступень при внутренних повреждениях (прежде всего действовать при КЗ на втулках и соединениях до выключателя со стороны низшего напряжения), а также являться защитой от внешних КЗ, например на шинах (см. гл. 11). Требуемый для III ступени $k_{чmin}$ равен 1,5—2. На трансформаторах совсем малой мощности III ступень при малых временах срабатывания ($\leqslant$0,5 с) может являться вообще его единственной защитой.

Некоторые затруднения возникают при осуществлении токовой защиты понижающих трансформаторов, имеющих соединение обмоток У/У$_0$ с четырехпроводной системой 380—220 В, имеющей глухое заземление (рис. 13.17). При $K^{(1)}$ на землю или нейтральный провод возникает ток $I^{(1)}_к$, равный $I^{(1)}_к=3U_ф/(X_{1т}+X_{2т}+X_{0т})$, если пренебречь сопротивлением питающей системы.

Рис. 13.17. Совмещенная структурная схема комплексной защиты трансформатора, работающего на сеть 380/220 В.



Сопротивление $X_{0т}$, задаваемое заводами-изготовителями и обусловленное сопротивлением намагничивания трансформатора, много больше $X_{1т}=X_{2т}$. Так, например, по литературным данным при мощности трансформатора 1000 кВ·А $X_{0т}\approx 9X_{1т}$. Поэтому токи $I^{(1)}_к$ с питающей стороны бывают небольшими, недостаточными для действия максимальной токовой защиты. Приходится также учитывать их своеобразное распределение в фазах, затрудняющее применение некоторых двухфазных схем (см. гл. 1). В связи с этим в начале 30-х годов в ТЭП (Б. С. Успенским) была предложена дополнительная токовая защита нулевой последовательности, питаемая от *ТА*, включаемого между нейтралью трансформатора и точкой глухого заземления (рис. 13.17). Ее ток срабатывания отстраивается от длительно допустимого рабочего тока в нейтральном проводе, составляющего несколько десятков процентов $I_{т,ном}$, и согласуется по чувствительности с параметрами защит питаемой сети.

13.11. ЗАЩИТЫ ОТ ВНЕШНИХ КЗ

Назначение и типы защит. Основным назначением защит является отключение внешних КЗ в случаях отказа защит или выключателей смежных элементов. Они используются также как основные при отсутствии у шин, на которые работают трансформаторы (автотрансформаторы), специальных защит шин (см. гл. 11) и как резервные к основным защитам трансформаторов от внутренних КЗ. С учетом последнего они там, где это возможно, включаются со стороны основного питания. Защиты часто выполняются токовыми по схемам, частично рассмотренным применительно к защитам генераторов (см. гл. 12), и в § 13.10 применительно к основным защитам понижающих трансформаторов. Однако при наличии источников питания бо-

лее чем с одной стороны они выполняются как токовые направленные. В последнее время для обеспечения лучшего резервирования, а также облегчения согласования по параметрам с защитами смежных элементов защиты от внешних многофазных КЗ иногда выполняются дистанционными. Ниже рассматриваются некоторые типичные случаи осуществления защит.

Максимальные токовые защиты понижающего трансформатора с двумя выключателями с питаемой стороны (рис. 13.18). Используются три комплекта защиты, причем комплект с питающей стороны имеет выдержку времени на ступень Δt бо́льшую, чем защиты приемных сторон. Это дает возможность сохранить питание одной из сторон при КЗ на другой, а также обеспечивает резервирование основных защит трансформатора. При недостаточной чувствительности защиты, например, питающей стороны, ток

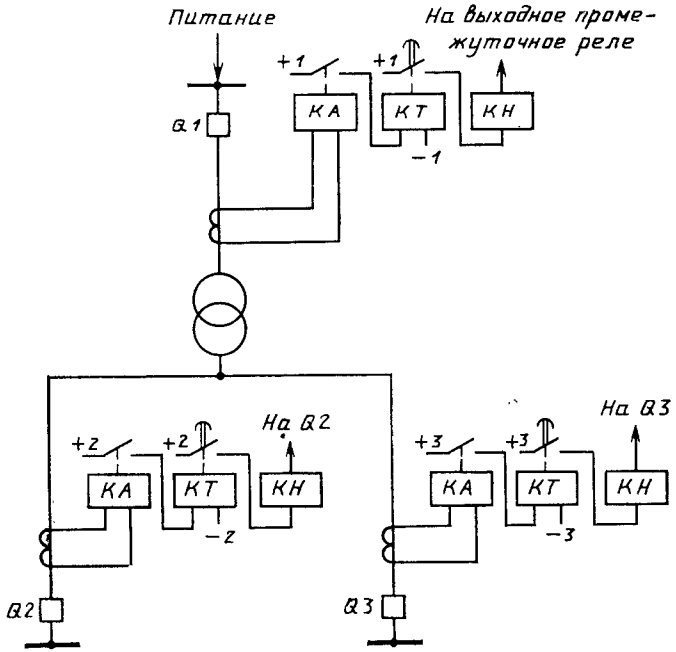


Рис. 13.18. Совмещенная структурная схема максимальной токовой защиты понижающего двухобмоточного трансформатора, имеющего два выключателя с приемной стороны

срабатывания которой должен отстраиваться от суммарного тока нагрузок обеих приемных сторон, используется дополнительный пуск по напряжению, исключающий необходимость отстройки от токов самозапуска (см. гл. 5). Напряжение для органов напряжения необходимо при этом подводить от TV стороны низшего напряжения.

Токовые защиты двухобмоточных повышающих трансформаторов (рис. 13.19). Часто это трансформаторы достаточно большой мощности, работающие со стороны высшего напряжения в системе с глухозаземленными нейтралями ($U_{ном} \geqslant 110$ кВ). В рассматриваемом случае используется комплекс защит от внешних КЗ. Применение для защиты от многофазных повреждений максимальной токовой защиты оказывается неприемлемым, так как ее пришлось бы сильно загрублять, учитывая возможность аварийных перегрузок. Кроме того, она затрудняла бы выбор параметров последних (III) ступеней токовых защит обратной последовательности генераторов (см. гл. 12), питающих трансформаторов. Поэтому от внешних несиммет-

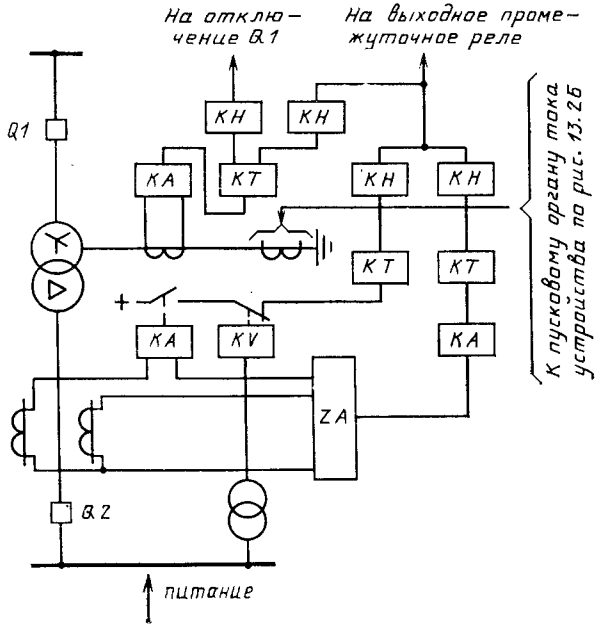


Рис. 13.19. Совмещенная структурная схема защиты от сверхтоков КЗ повышающего трансформатора

ричных междуфазных КЗ обычно применяют токовую защиту обратной последовательности с независимой характеристикой выдержки времени. При этом для защиты от $K^{(3)}$ предусматривается максимальная токовая защита в одной фазе с дополнительным пуском, осуществляемым одним минимальным органом напряжения. Подход к выбору параметров защиты обратной последовательности такой же, как и для защит генераторов. Защита от внешних КЗ на землю ($K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$) осуществляется токовой защитой нулевой последовательности. Ее орган тока получает питание от *ТА*, обычно встраиваемого в вывод нейтрали трансформатора. При его отсутствии устанавливается выносной *ТА* в цепи заземления нейтрали. Выдержки времени защиты нулевой последовательности (одна или две — когда первая используется для действия, например, на разделение секций шин) выбираются бо́льшими максимальных выдержек времени последних ступеней токовых направленных защит нулевой последовательности линий с учетом времени работы УРОВ (см. гл. 5, гл. 15), которые обычно применяются при напряжениях, бо́льших или равных 110 кВ. Ток срабатывания согласуется по чувствительности с указанными защитами линий и обычно составляет примерно 75—150 А.

Токовая направленная защита нулевой последовательности автотрансформаторов с питанием со сторон высшего и среднего напряжений (рис. 13.20). При выполнении рассматриваемых защит учитываются следующие обстоятельства: автотрансформаторы своей обмоткой электрически связывают системы высшего и среднего напряжений и поэтому защиты от $K^{(1)}$ этих сторон, как и защиты от многофазных КЗ, взаимосвязаны и для обеспечения селективности при внешних повреждениях нуждаются в органах направления мощности; ток в цепи заземления нейтрали автотрансформатора по отношению к напряжению U_0 может менять свою фазу примерно на 180° в зависимости от соотношения эквивалентных сопротивлений нулевой последовательности связанных систем (см. гл. 1) и поэтому для защит не используется; токи I_0 со стороны с замыканием на землю и с другой стороны могут сильно разниться за счет ответвления тока в глухозаземленную нейтраль; в связи с этим для обеспечения чувствительности на сторонах высшего и среднего напряжений устанавливаются отдельные защиты от внешних КЗ на землю. Приведенный на рис. 13.20 возможный вариант защиты учитывает приведенные соображения. Устанавливаются два комплекта реле, реагирующих на $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ соответственно в сетях высшего и среднего напряжений. Комплекты выполнены двухступенчатыми — со II и III ступенями — и присоединены к *ТА*, встроенным во втулки автотрансформатора. Вторые ступени — отсечки с выдержкой времени. По-

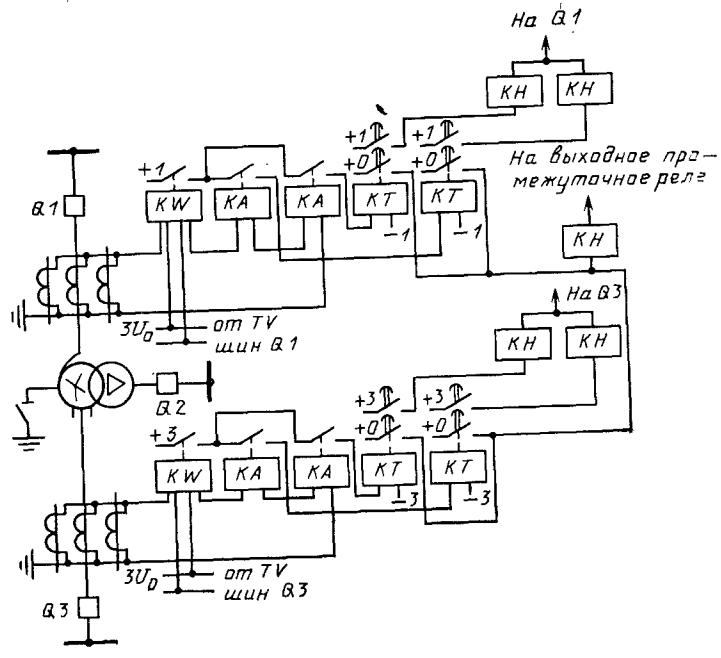


Рис. 13.20. Совмещенная структурная схема токовой направленной защиты нулевой последовательности автотрансформатора с двусторонним питанием с использованием встроенных *ТА*

скольку часто их t^{II} одинаковы, оба комплекта приняты направленными. Необходимо отметить, что для III ступеней, имеющих разные t^{III}, направленность обязательна только у III ступени, имеющей меньшую выдержку времени (см. гл. 5). Отсечки обеспечивают уменьшение времени отключения повреждений, например в ошиновке и на втулках автотрансформатора, а также, что часто весьма существенно, обеспечивают возможность выбора меньших токов срабатывания II ступеней защит нулевой последовательности линий, подходящих к подстанции с другой

(по отношению к месту включения отсечки) стороны повышенного напряжения. Для ликвидации КЗ на землю между *ТА* и выключателями защиты с дополнительной выдержкой времени отключают защищаемый автотрансформатор со всех сторон. При установке на питающих линиях четырехступенчатых защит нулевой последовательности аналогичные защиты автотрансформаторов выполняются трехступенчатыми.

Необходимо отметить, что примерно в тех же целях, что и ступенчатые токовые защиты нулевой последовательности, но применительно к междуфазным КЗ, на автотрансформаторах предусматриваются дистанционные защиты. Устанавливаются также токовые и токовые направленные защиты обратной последовательности.

13.12. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Перегрузки обычно бывают симметричными. Несимметричные перегрузки трансформаторы (автотрансформаторы) воспринимают совершенно по-другому, чем генераторы, — они не представляют для них такой опасности. Поэтому защиты от перегрузок выполняются органом тока, включаемым на ток одной фазы, и работают обычно на сигнал с выдержкой времени, большей максимальных выдержек времени защит от КЗ. На трехобмоточных трансформаторах, имеющих разные номинальные мощности обмоток, двух- или трехстороннее питание в общем случае защиты включается со всех трех сторон. На понижающих автотрансформаторах с питанием только со стороны высшего напряжения защита должна устанавливаться (рис. 13.21, *а*) со стороны низшего напряжения, обмотка которой имеет всегда меньшую мощность (не превосходящую $1-U_{ном,с}/U_{ном,в}$ проходной мощности), и высшего напряжения. В тех случаях, когда возможна передача энергии со стороны среднего на стороны высшего и низшего напряжений или, наоборот, на сторону среднего напряжения одновременно со сторон высшего и низшего напряжений, может перегружаться общая часть обмотки, даже когда токи с указанных сторон меньше номинальных. Поэтому, если такие режимы возможны, защита должна включаться также на общую часть обмотки (рис. 13.21, *б*). Со стороны среднего напряжения защита не устанавливается, так как ток этой стороны не характеризует перегрузку обмоток.

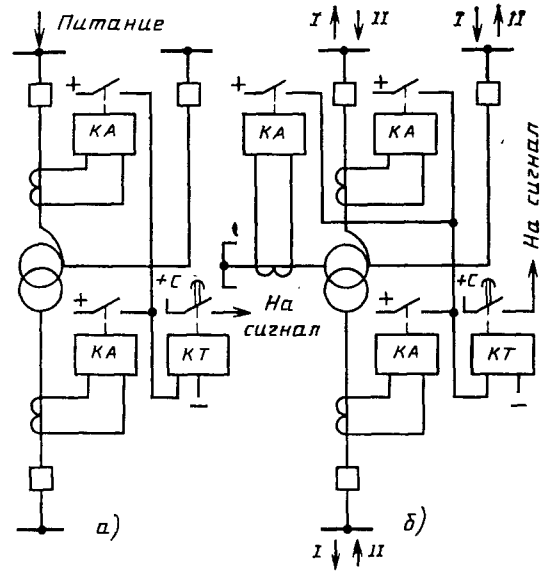


Рис. 13.21. Совмещенные структурные схемы токовой защиты от перегрузок:

а — автотрансформатор с питанием со стороны высшего напряжения; *б* — автотрансформатор, работающий в режимах с перегружаемой общей частью обмотки

13.13. РЕЗЕРВНЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ВНЕШНИХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ С РАЗЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Защита предусматривается со стороны 110—220 кВ трансформаторов, которые в процессе эксплуатации могут работать как с заземленной, так и с разземленной нейтралью. Это может быть при частичном заземлении нейтралей в системе с глухозаземленными нейтралями. Назначением защиты является предотвращение возможности работы трансформатора с изолированной нейтралью с неотключенным внешним замыканием на землю, поскольку уровень изоляции выпускаемых промышленностью трансформаторов 110—220 кВ на этот случай обычно не рассчитывается. Такой режим может, например, возникнуть в случае $K^{(1)}$ на шинах высшего напряжения станции, ликвидируемого защитами противоположных концов линий и трансформаторов станции (рис. 13.3). При наличии спе-

циальной (дифференциальной) защиты шин этот режим может возникнуть при повреждениях на шинах и отказе их защиты или на линии в случае отказа ее защиты или выключателя.

Существует ряд вариантов выполнения таких защит, рассмотренных в литературе (см., например, [10] и др.).

13.14. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТ ПРИ НАЛИЧИИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Продольное регулирование напряжения под нагрузкой трансформаторов и автотрансформаторов получило весьма широкое распространение. Его практическое использование несколько сдерживается только несовершенствами конструктивного выполнения. Устройства бывают встроенными в основные маслонаполненные баки трансформаторов (автотрансформаторов) или в виде выносных аппаратов и имеют много разновидностей своего конструктивного выполнения. При общепринятых исполнениях ответственной их частью являются контакторные устройства, переключающие число витков обмотки, используемой для изменения результирующего коэффициента трансформации трансформатора (автотрансформатора).

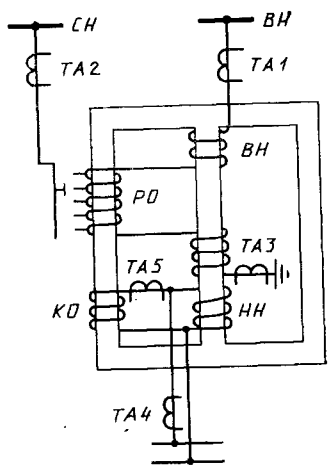


Рис. 13.22. Устройство встроенного регулирования напряжения

Контакторные устройства для мощных трансформаторов (автотрансформаторов) со встроенным регулированием, например по рис. 13.22, когда регулирование осуществляется со стороны среднего напряжения автотрансформатора, располагаются внутри маслонаполненных баков в отдельных отсеках (бачках) с собственной защитой, осуществляемой одноконтактным газовым реле (см. § 13.8) или иногда его разновидностью — реле давления. В СРЗиУ ТЭП были предложены специальные токовые защиты, реагирующие на повреждения в

регулирующей части. Принципы их работы основываются на том, что при внутренних замыканиях в регулирующей части, когда вследствие недостаточной чувствительности могут не работать общие дифференциальные токовые защиты, токи фаз трансформатора (автотрансформатора) близки к рабочим; при сквозных же КЗ, когда токи как в регулируемых витках, так и в основном элементе возрастают, действие специальных защит не требуется. Первый вариант такой защиты был предложен еще в 30-е годы (А. Г. Геворковым), по нему предусматривалось автоматическое выведение токовой защиты при внешних КЗ. Более совершенный вариант, предусматривающий токовую защиту с торможением, был разработан в 50-е годы (А. Н. Кожиным). Специальные токовые защиты, использующие эти идеи, иногда применяются в настоящее время, например для мощных автотрансформаторов [76].

Выносные аппараты для регулирования напряжения применяются, например (в сочетании со встроенным регулированием со стороны среднего напряжения), со стороны низшего напряжения мощных автотрансформаторов. Они обычно оборудуются отдельными дифференциальными и газовыми защитами, причем для дифференциальной защиты используются *ТА*, встроенные в бак защищаемого автотрансформатора.

13.15. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ) БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СО СТОРОНЫ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Схемы присоединений трансформаторов (иногда автотрансформаторов) к питающим их линиям без выключателей со стороны высшего напряжения в настоящее время очень широко используются на понижающих подстанциях в распределительных сетях напряжением 35—220 кВ. Трансформаторы подключаются к линиям обычно через отделители (трехфазные разъединители с дистанционным управлением), которые обеспечивают возможность их отключения в бестоковую паузу после отключения питающей линии, вызванного повреждением трансформатора. Отключение линии может при этом определяться разными условиями (рис. 13.23): непосредственным реагированием ее защит на КЗ, возникшие в трансформаторе (рис. 13.23, *а*), а также воздействием его сработавших защит на короткозамыкатель, создающий искусственное КЗ у вво-

дов высшего напряжения трансформатора (рис. 13.23, *б* и *в*) или на устройство телеотключения выключателей линии (рис. 13.23, *г*). Использование защиты линий как основной защиты трансформаторов, как правило, неэффективно вследствие ее недостаточной чувствительности к КЗ внутри бака. Поэтому такое решение допускается только для трансформаторов малой мощности, работающих в блоках с линией.

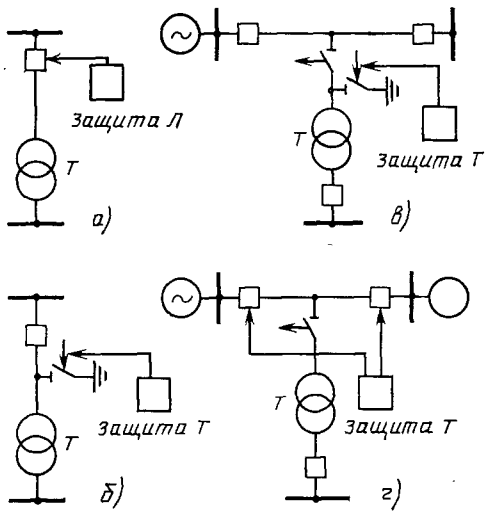


Рис. 13.23. Примеры схем соединений подстанций, работающих без выключателей со стороны высшего напряжения

Более универсальным является использование устройств телеотключения. Особенно эффективным оно является в тех случаях, когда питающие линии имеют ВЧ каналы связи. Это определяется тем, что блокирующие ВЧ сигналы и ВЧ сигналы телеотключения могут передаваться (как было отмечено в гл. 9) по одному каналу. Проводные каналы для телеотключения применяются обычно для упрощенных подстанций, близко расположенных к источнику питания, для которого искусственно создаваемые короткозамыкателями КЗ по тем или другим причинам могут представлять опасность. При этом следует учитывать, что другие удаленные концы линии могут быть отключены только после включения с некоторой выдержкой

времени короткозамыкателя. Эта выдержка времени должна быть больше суммы времен передачи телесигнала и отключения под его воздействием выключателей.

Более простым, с учетом изложенного, является вариант по рис. 13.23, *б*, который наиболее часто и применяется.

Короткозамыкатели бывают однофазными (для сетей 110—220 кВ с глухозаземленными нейтралями) и двух- или трехфазными (для сетей 35 кВ). Одним из важных требований, предъявляемых к ним, является быстрота действия. Однако большинство существующих конструкций имеет время включения, достигающее 0,3÷0,5 с. В большинстве случаев используется сочетание короткозамыкателя с отделителем в трех фазах. Имеется много вариантов и деталей таких сочетаний, рассмотренных в [48, 66 и др.].

Одним из важных вопросов, который приходится решать при выполнении схем с отделителями, является обеспечение его работы только в бестоковую паузу АПВ питающих линий. Существующие для этого схемы можно разделить на две основные группы: косвенно проверяющие отсутствие тока в фазах отделителя по отсутствию тока в цепи короткозамыкателя и непосредственно контролирующие отсутствие напряжения и тока в фазах отделителя. Разработанные в ЭСП схемы (см., например [10, 44]) предусматривают два минимальных органа напряжения, включенных на междуфазные напряжения, специальный трехфазный высокочувствительный орган тока и орган тока в цепи короткозамыкателя, действующие совместно по схеме И (рис. 13.24). Введение органов напряжения предотвращает подачу команды на отключение отделителя при работе газовой защиты, когда токи повреждения могут быть весьма малы. Цепь отключения отделителя в этих схемах дополнительно контролируется органом тока в цепи короткозамыкателя, входящим в указанную выше логическую цепочку И.

Для трансформаторов небольшой мощности часто применяются более простые схемы только с контролем отсутствия тока в цепи короткозамыкателя.

Защиты трансформаторов рассматриваемых подстанций осуществляются на оперативном переменном токе с учетом того, что в бестоковые паузы подстанция полностью лишается напряжения, и поэтому в комплексе источ-

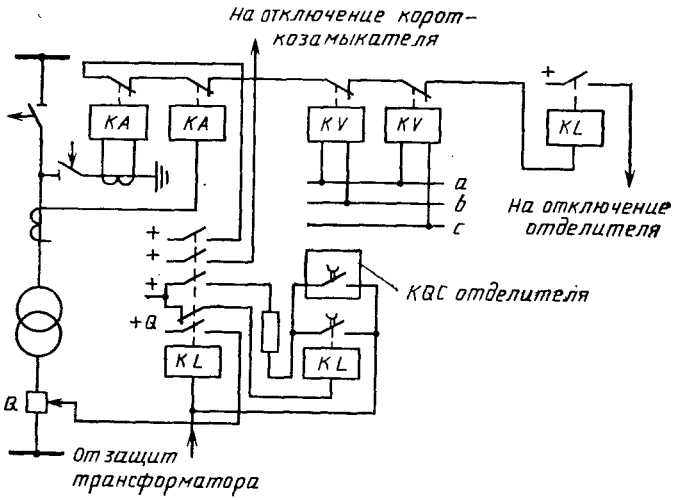


Рис. 13.24. Вариант совмещенной структурной схемы включения отделителя

ников питания целесообразно иметь предварительно заряжаемые батареи конденсаторов.

На высшем напряжении избегают применения выносных *ТА* и *TV* и ограничиваются использованием *ТА*, встроенных во втулки высшего напряжения защищаемых трансформаторов, а при их отсутствии используют накладные (на втулки) *ТА* или магнитные зонды — магнитные *ТА* (см. гл. 4).

13.16. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Выше были рассмотрены основные и резервные защиты трансформаторов и автотрансформаторов. На них могут также устанавливаться некоторые дополнительные устройства и защиты, коротко рассматриваемые ниже.

Контроль изоляции вводов с $U_{ном} \geqslant 500$ кВ. Устройство контроля, коротко именуемое КИВ, реагирует на основную гармонику емкостного тока нулевой последовательности в цепи обкладок трех вводов с бумажно-масляной изоляцией. При частичном пробое изоляции ввода или возрастании активного тока утечки в связи с развитием повреждения ток в цепи КИВ увеличивается и вызывает срабатывание устройства. Его присоединение к измерительным выводам или выводам ПИН (см. гл. 4) осуществляется (рис. 13.25) через согласующий трансформатор с ответвлениями в первичной обмотке, предназначенными для выравнивания МДС, создаваемых токами каждой из фаз при нормальной работе, и снижения, таким образом, тока небаланса в устройстве до минимального значения. Повреждения изоляции вводов развиваются, как правило, относительно медленно. Поэтому оказывается целесообразным иметь в устройстве две ступени: более чувствительную, работающую на сигнал, и более грубую — на отключение трансформатора (автотрансформатора).

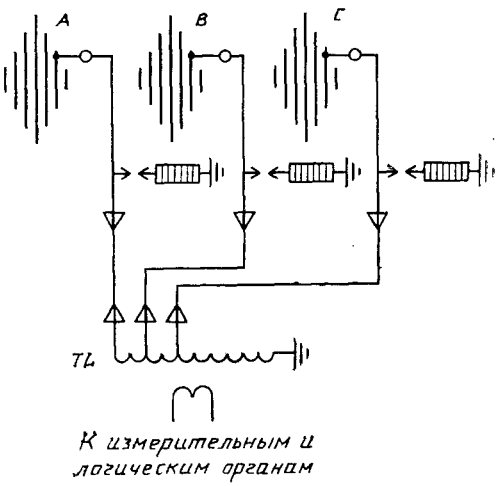


Рис. 13.25. Принцип работы устройства КИВ

Пуск устройства пожаротушения. Трансформаторы (автотрансформаторы) мощностью $S \geqslant 200$ МВ·А и любой мощности напряжением $U_{ном} \geqslant 500$ кВ оснащаются устройствами пожаротушения. При отсутствии специальных датчиков, реагирующих на возникновение пожара, эти устройства должны запускаться только в случаях действия защит, реагирующих на повреждения трансформатора (автотрансформатора). При этом возникает ряд вопросов, требующих учета. На указанные повреждения реагируют основная продольная дифференциальная токовая защита, газовая защита и дифференциальная защита ошиновки

(последняя действует при перекрытии наружной части втулок, в которые встроены ее *ТА* и повреждения которых наиболее часто сопровождаются пожаром). Для предотвращения пуска автоматики пожаротушения при работе этих защит, имеющих более широкую защищаемую зону, их отключающие сигналы иногда контролируются токовой защитой нулевой последовательности, включаемой в заземляющий провод бака (см. § 13.9), а при работе основной дифференциальной защиты — газовой защитой (для предотвращения пуска пожаротушения при повреждениях со стороны соединений низшего напряжения).

Максимальные защиты напряжения нулевой последовательности. На двухобмоточных повышающих трансформаторах какой-либо защиты от $K_3^{(1)}$ со стороны **низшего** напряжения не предусматривается, в частности, потому, что исключен длительный режим их холостой работы с включением со стороны высшего напряжения. Однако такие режимы возможны на блоках генератор — трансформатор при наличии у генератора отдельного выключателя (см. § 13.17) и на автотрансформаторах. В таких случаях предусматривается сигнализация, фиксирующая состояние соединений низшего напряжения. Она выполняется с помощью ИО напряжения, включаемого на зажимы вторичных обмоток *TV*, соединенных в разомкнутый треугольник, и действующего на сигнал с выдержкой времени.

Устройство контроля непереключения фаз. В системах с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ часто применяются выключатели с пофазными приводами. В этом случае считается необходимым учитывать возможные недовключения или недоотключения отдельных фаз, обусловливающие неполнофазные режимы, опасные прежде всего для генераторов. Для ускорения ликвидации таких режимов обычно используется

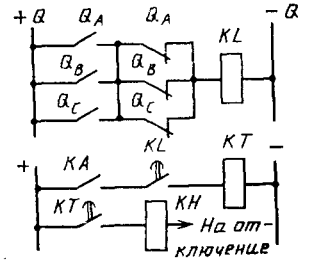


Рис. 13.26. Устройство, контролирующее недовключение илн недоотключение фаз выключатсля высокого напряжения с пофазным управлением, для трансформатора с заземленной нейтралью

ИО тока, включаемый в нейтраль высшего напряжения трансформатора (автотрансформатора), например по рис. 13.19, подающий сигнал на контур, состоящий из трех замыкающих и трех размыкающих контактов выключателя, включенных по логической схеме (конкретная реализация которой на контактах приведена на рис. 13.26), и действующий на цепи ускорения отключения.

13.17. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТ БЛОКОВ ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР (АВТОТРАНСФОРМАТОР)

Блочные схемы обычно выполняются с мощными генераторами и трансформаторами (автотрансформаторами). На блоках предусматриваются защиты от тех же видов повреждений и ненормальных режимов, что и на генераторах и трансформаторах при их раздельной работе. Однако в связи с тем, что генераторы и трансформаторы часто образуют единый рабочий элемент, некоторые защиты могут быть использованы для блока в целом; например возможно применение общих защит от сверхтоков, защит от $K_3^{(1)}$ в системе генераторного напряжения. С другой стороны, могут требоваться некоторые дополнительные защиты, усложняться цепи отключения.

Конкретное выполнение защит в значительной мере определяется схемами соединений блоков. На рис. 13.27 приведено несколько типичных схем таких соединений: схема на рис. 13.27, *а* характерна для ГРЭС (на ней трансформатор собственных нужд присоединен к блоку без выключателя); схема на рис. 13.27, *б* — для АЭС и мощных

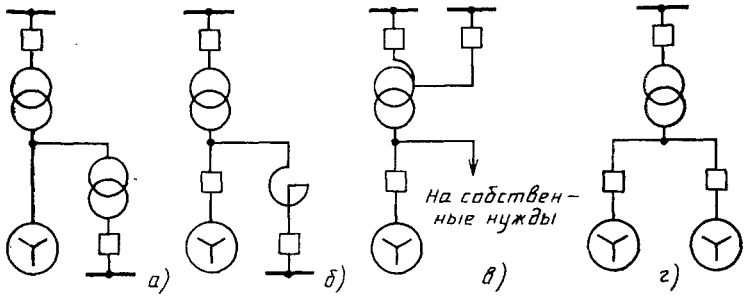


Рис. 13.27. Варианты схем электрических соединений блоков генератор — траисформатор (автотрансформатор)

ТЭЦ (генератор имеет отдельный выключатель, развитые собственные нужды или другие потребители получают питание на генераторном напряжении); схема на рис. 13.27, *в* — для ГРЭС с повышающим автотрансформатором (генератор имеет отдельный выключатель, обеспечивающий возможность работы автотрансформатора при отключенном генераторе); схема на рис. 13.27, *г* — для гидростанций (генераторы с отдельными выключателями работают на общий трансформатор).

Для схемы на рис. 13.27, *а* принципиально можно было бы осуществить общую продольную дифференциальную защиту блока в целом, охватывающую генератор и оба трансформатора. Однако практически обычно осуществляют раздельные защиты для всех трех элементов. Это дает возможность иметь более чувствительные защиты генератора и трансформатора собственных нужд. Защита повышающего трансформатора могла бы не иметь *ТА* со стороны трансформатора собственных нужд, поскольку $I_к$ при повреждениях со стороны его низшего напряжения меньше $I_{т,ном}$. Однако, как показывают расчеты, это загрубляет ее и поэтому обычно не практикуется.

Осуществление защиты от $K_з^{(1)}$ в статорной обмотке генератора для схемы на рис. 13.27, *б* может встречать затруднения в связи с возможными малыми токами, подходящими к месту пробоя из системы генераторного напряжения. Однако защита по последним разработкам ВНИИЭ (см. гл. 12) разрешает это затруднение.

Схема на рис. 13.27, *в* требует установки дополнительной защиты от сверхтоков при работе автотрансформатора без генератора, в том числе и на сторону низшего напряжения.

Для схемы на рис. 13.27, *г* возникали затруднения при осуществлении защит от $K_з^{(1)}$ в статорных обмотках генераторов по причине малых токов повреждения. На практике для таких генераторов нашла применение разработанная ЭНИН направленная защита нулевой последовательности, реагирующая на начальные переходные токи пробоя (см. гл. 10). Возможно также использование указанной выше новой защиты ВНИИЭ. Защиту трансформатора от сверхтоков внешних многофазных КЗ в этой схеме целесообразно осуществлять от соответствующих защит генераторов, так как при их частичном включении собственная защита трансформатора может не обладать необходимой чувствительностью.

В последние годы в зарубежной практике отмечались случаи повреждений трансформаторов, работающих в блоках с генераторами, вследствие недопустимого повышения индукции в магнитных системах. Указывается, что такие явления, маловероятные при параллельной работе блока с системой, иногда возникают при пуске и останове блоков, работающих при пониженной частоте, при недопустимо высоком возбуждении генераторов. Предлагаются защиты от таких режимов. Отечественная практика пока не подтвердила необходимость установки таких защит.

Возникает и ряд других вопросов при осуществлении защит блоков. Многие из них рассмотрены в [65].

Вопросы для самопроверки

1. От каких видов повреждений и ненормальных режимов работы предусматриваются защиты трансформаторов?
2. Какие дополнительные факторы необходимо учитывать при выполнении дифференциальной защиты трансформаторов по сравнению с аналогичной защитой генераторов?
3. Какие слагающие токов небаланса учитываются при выполнении дифференциальной защиты трансформаторов и какими факторами они определяются?
4. Каковы особенности изменения во времени броска намагничивающего тока при включении трансформатора под напряжение и как они могут использоваться для отстройки ИО дифференциальной защиты от тока небаланса?
5. Почему от внешних несимметричных междуфазных КЗ двухобмоточных повышающих трансформаторов обычно применяют токовую защиту обратной последовательности?
6. Как осуществляется защита от внешних $K^{(1)}$ трансформаторов с питанием со стороны высшего и среднего напряжений?
7. Каковы особенности защиты трансформаторов без выключателей со стороны высшего напряжения?
8. Каковы основные особенности защит блоков генератор — трансформатор?

Глава четырнадцатая

ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ И СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

14.1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в коммунальном хозяйстве используются разного вида электродвигатели, выпрямительные агрегаты, электропечи, разного рода коммунальные установки и т. п., питаемые от сетей электрических систем или отдельных станций. Основной категорией потребителей напряжением больше 1 кВ являются трехфазные асинхронные и синхронные двигатели. Их единичные мощности все время возрастают и в последние годы в отдельных случаях уже достигают десятков мегаватт (для синхронных двигателей). Учитывая направленность книги, ниже рассматриваются только общие защиты двигателей общепромышленного назначения.

Для правильного подхода к защите двигателей необходимо представлять их работу в условиях эксплуатации и учитывать предъявляемые ею требования. Это, как в свое время выявилось, особенно необходимо в связи с тем, что машиностроители не всегда в должной мере оценивали при конструировании возможные в эксплуатации режимы. Первые важные исследования по режимам работы двигателей (сначала асинхронных, потом и синхронных) были в 30-е годы выполнены И. А. Сыромятниковым. Наиболее существенные их результаты в последний раз опубликованы в [74]. Эти работы не только дали возможность сформулировать некоторые требования к релейной защите, но и послужили основой для расширенного использования самозапусков (в том числе асинхронных двигателей с фазным ротором), осуществления разработанных автором принципов частотной разгрузки (обычно более эффективного мероприятия, чем разгрузка по снижению напряжения), форсировки возбуждения синхронных машин, включения в действие регуляторов напряжения генераторов без устройств по ограничению тока возбуждения и т. д. Все это способствовало значительному повышению надежности и эффективности работы систем и начало проявляться уже во второй половине 30-х годов. Однако указанные мероприятия, относящиеся к противоаварийной автоматике, прямого отношения к защите не имеют и упоминаются в связи с тем, что роль И. А. Сыромятникова в развитии нашей энергетики, в том числе и в рассматриваемой области, в литературе не получила, к сожалению, должного освещения. Ряд важных работ по режимам работы двигателей, и особенно синхронных генераторов, был выполнен во ВНИИЭ (Л. Г. Мамиконянц и др.), а двигателей также в НПИ (С. Л. Кужеков), ПО «Уралэнергочермет» (М. И. Слодарж), ЕПИ (Г. Г. Гимоян) и специалистами в области электромашиностроения.

14.2. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТЕ

Повреждения. Основным учитываемым видом повреждений двигателей обычно считаются многофазные КЗ в обмотке статора. Они могут не только вызывать большие разрушения машин, но и сопровождаться понижением напряжения в питающей сети, нарушающем работу многих других потребителей. Поэтому защита от многофазных КЗ в двигателях и его соединениях с выключателем выполняется работающей без выдержки времени. Рассматриваются двигатели с $U_{ном}>1$ кВ, работающие обычно в сетях с нейтралью, изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы (см. гл. 10). Поэтому следующим видом повреждения являются $K_з^{(1)}$. Согласно пока действующим общим правилам специальные защиты от $K_з^{(1)}$ рекомендуется устанавливать при суммарном емкостном токе питающей сети $I_C \geqslant 5$ А для двигателей мощностью более 2000 кВт и при $I_C \geqslant 10$ А для двигателей меньшей мощности. Такой подход в настоящее время подвергается серьезной критике. Это определяется рядом факторов. К ним следует отнести следующие:

изоляции обмоток статора по отношению к земле (заземленному корпусу) является обычно более слабой, чем у других элементов системы того же напряжения, а причин возникновения опасных внутренних перенапряжений иногда даже больше, так как системы часто работают с изолированной нейтралью, в них возникают коммутационные перенапряжения при отключениях существующей аппаратурой отдельных потребителей по технологическим условиям и т. д.; в результате $K_з^{(1)}$ являются, как показал многолетний опыт эксплуатации, наиболее частым видом повреждений двигателей (см., например, [75]);

$K_з^{(1)}$ в обмотках машин могут быть опасными и при $I_з^{(1)}<5$ А (см. гл. 12) вследствие медленного разрушения изоляции и возможного перехода в опасные витковые, двойные и другие КЗ.

Поэтому в настоящее время обычно считают, что специальные защиты от $K_з^{(1)}$ должны устанавливаться на всех двигателях при $I_{з\,max}^{(1)} \geqslant 5$ А, а при возможности — и при меньших токах.

Необходимо отметить, что в отдельных случаях идут на более радикальные решения. Так, уже в течение многих лет (см. гл. 10) по условиям техники безопасности на торфопредприятиях, рудниках и в других подобных отраслях осуществляются защиты, которые даже при очень малых $I_{з\,max}^{(1)}$ должны без выдержки времени отключать повреждения; для этого считается допустимым создавать искусственные $I_з^{(1)}$ значением до нескольких ампер. В последние годы в системах 6 кВ собственных нужд атомных электростанций типовым решением (см., например, [47]) является создание искусственных активных токов в несколько десятков ампер, для того чтобы защиты от $K_з^{(1}$ были достаточно чувствительными и охватывали по возможности большее число витков статорной обмотки двигателей (считая от ее выводов к выключателю). Для осуществления защит двигателей от $K_з^{(1)}$ используются те же принципы, что и для линий 6—10 кВ (см. гл. 10), с тем отличием, что при $K_{дв}^{(1,1)}$ с расположением одного места пробоя в двигателе на фазе без *ТА* защиты от многофазных КЗ должны отключать двигатель. Для двигателей большой мощности защиты от $K_з^{(1)}$ осуществляются, как и для генераторов (см. гл. 12). Витковые КЗ часто возникают в результате своевременно не отключенных $K_з^{(1)}$. Необходимость выполнения специальных защит от этого вида повреждений, так же как и для генераторов, не имеющих параллельных ветвей статорных обмоток (с выведенными их концами), в действующих правилах не зафиксирована. В связи с этим в отечественной практике в отличие от зарубежной специальные защиты от $K_в^{(1)}$ обычно не устанавливаются. Необходимость ее более широкого использования в областях, где двигатели работают в более тяжелых условиях (например, горнорудной промышленности), обосновывалась в работах Г. Г. Гимояна (см., например, [77]).

В настоящее время такие защиты, иногда выполняющие и функции защит от недопустимых несимметричных сверхтоков, начинают получать более широкое применение. Для их действия обычно используются составляющие обратной последовательности токов фаз двигателя. У синхронных двигателей, как и у генераторов (см. гл. 12), возможны замыкания на землю в одной и второй точках цепи возбуждения. От первого вида повреждений защиты обычно не предусматриваются, от второго иногда используется схема, рассмотренная в гл. 12. Вторым специфическим видом повреждений синхронных двигателей является потеря возбуждения, вызванная нарушениями системы возбуждения. При этом двигатель оказывается работающим в асинхронном режиме со скольжением. Этот режим, как отмечалось в гл. 12, не следует смешивать с асинхронным ходом, возникающим при выпадении двигателя с исправным возбуждением из синхронизма. Простейшими защитами от потери возбуждения являются устройства, непосредственно или косвенно реагирующие на исчезновение тока возбуждения, например орган «нулевого» тока при электромашинном возбуждении. Защита с выдержкой времени, предотвращающей ее срабатывание при пуске, действует на отключение. Для мощных двигателей или при бесщеточных системах возбуждения применяются более сложные защиты, разработки которых подробно рассмотрены в [75], а также в [79].

Близко примыкающими, с точки зрения защиты, к случаю потери возбуждения являются разного рода режимы синхронных двигателей без возбуждения, например затянувшиеся пуски невозбужденных машин и т. д. Протекающие в двигателях в таких случаях процессы являются также весьма сложными. Они и соответствующие защиты в последние годы достаточно полно исследованы в работах НПИ (С. Л. Кужеков).

Ненормальные режимы работы. Основным видом ненормальных режимов работы, учитываемых при выполнении защиты как асинхронных, так и синхронных двигателей, являются сверхтоки, обусловленные перегрузкой приводимого в движение механизма, понижением или временным исчезновением напряжения в питающей сети, разрывом фазы в этой сети и т. п. Первые фундаментальные работы по режимам работы двигателей, как было указано выше, выполнены И. А. Сыромятниковым. Они, в част-

ности, были положены в свое время и в основу разработки защиты от сверхтоков.

При рассмотрении многих из указанных вопросов приходится учитывать время разворота двигателей (при пуске, восстановлении напряжения). При этом рассматривается динамический процесс, характеризуемый общим выражением $M_д = M_{вр} - M_{пр}$. Увеличение числа оборотов происходит до тех пор, пока динамический момент $M_д$ не станет равным разности вращающего $M_{вр}$ и противодействующего $M_{пр}$. Динамический момент связан с моментом инерции J всего агрегата и угловой скоростью вращения ω соотношением $M_д = J d\omega/dt$. Принимая во внимание, что $\omega = 2\pi n/60$, а $n/n_{ном} \approx n/n_{синх} = 1 - s$, где s — скольжение, можно определить время пуска $t_п$. Эти времена иногда достигают при тяжело нагруженных двигателях десятков секунд и должны учитываться как при определении их нагрева, так и при выборе параметров защит.

Опасность сверхтоков определяется главным образом их тепловым действием.

Сверхтоки перегрузки. Допустимые значения симметричных сверхтоков в функции времени их прохождения определяются перегрузочной характеристикой двигателя. Часто грубо приближенные, но практически приемлемые результаты получаются (см., например, [75, 78]), если считать, что все выделяемое тепло идет на нагревание обмотки статора (адиабатический процесс), и допускать кратковременный ее перегрев сверх максимального длительно допустимого значения. Допустимое время перегрузки может при этом определяться по выражению $t_{доп} = T(a - k^2_{нач})/(k^2 - k^2_{нач})$, где T — постоянная времени нагрева двигателя; k — кратность сверхтока по отношению к номинальному; a — коэффициент, больший 1, характеризующий кратковременное превышение температуры, выбираемый с учетом ряда факторов и в среднем часто имеющий значение 1,3. Например, при $k_{нач} = 1$ (двигатель перед возникновением перегрузки работал с током $I_{дв.ном}$) получаем $t_{доп} = T(a-1)/(k^2-1) = A(k^2-1)$. В ряде случаев характеристику защиты желательно иметь такой, чтобы она давала возможность использовать перегрузочную способность двигателя с учетом температуры охлаждающей среды и того, что он не успел остыть от предшествующей кратковременной перегрузки.

При симметричных сверхтоках, вызванных перегрузкой приводимого в движение механизма (например, на

тепловых электростанциях — мельницы, дробилки и т. п.), защита может действовать на отключение или сигнал и разгрузку. Защиту выполняют действующей на отключение в тех случаях, когда перегрузка не может быть устранена без остановки механизма, или при отсутствии постоянного обслуживающего персонала. При работе защиты на разгрузку она иногда выполняется так, что в случае, если перегрузка не исчезла, защита с большей выдержкой времени действует на отключение. Защита от перегрузок выполняется органами различного типа. Наиболее просто она осуществляется органом тока с зависимой или независимой характеристикой выдержки времени, включаемым на фазный ток. Несколько более сложно защита выполняется с использованием электротепловых реле и температурных органов (см., например, [77]). Электротепловыми называются реле, работа которых основана на использовании выделенного тепла при прохождении электрического тока. В качестве рабочих элементов этих реле применяются обычно биметаллические пластинки. К температурным органам относятся, в частности, полупроводниковые датчики, позисторы, встраиваемые внутрь защищаемого двигателя, в лобовые части обмотки статора. В общем случае рассматриваемые реле и органы должны были бы лучше осуществлять защиту от перегрузок, чем электрические органы. Однако защиты с электротепловыми реле для двигателей напряжением больше 1 кВ перестали использовать в отечественной практике еще с 30-х годов. Это определяется рядом соображений:

1) действительная кривая нагрева двигателей может значительно отличаться от закладываемой в характеристику биметаллического элемента ввиду неоднородности нагрева отдельных частей двигателя, зависимости ее от кратностей тока и т. д.;

2) на нагрев двигателя может сильно влиять температура охлаждающей среды, не соответствующая температуре, в которой работают защитные реле;

3) имеются трудности в создании малогабаритных реле.

Лучшие результаты должны получаться при применении температурных датчиков с позисторами. Однако и применительно к их использованию высказываются некоторые критические замечания, например то, что датчик, расположенный у поверхности изоляции высоковольтного двигателя, может несвоевременно реагировать на перегрев меди обмотки статора, требуются провода для передачи

сигналов от датчиков. Необходимо также учитывать, что промышленности, перешедшей на широкое использование интегральной микроэлектроники, более удобно создавать защиты от перегрузок с применением подходов, освоенных, например, для защит от перегрузок синхронных генераторов (см. гл. 12). В результате датчики с позисторами в отечественной практике широкого применения не получили, хотя внедряемые защиты на микроэлектронной элементной базе (см., например, [75]) несмотря на сложность выполнения также имеют ряд недостатков.

Сверхтоки при понижениях и последующих восстановлениях напряжения. Рассмотрение оказывается целесообразным производить раздельно для асинхронных и синхронных двигателей.

Условия работы асинхронного двигателя определяются характеристиками развиваемого им вращающего момента $M_{вр}$ и противодействующего момента $M_{пр}$ механизма в функции скольжения s ротора. Момент $M_{вр}$ в симметричном режиме пропорционален квадрату напряжения. Для двигателей с фазным ротором $M_{вр}=M_{вр}/M_{вр,ном}\approx 2K_U^2\, b\times$ $\times(s/s_к+s_к/s)$, где $K_U=U/U_{ном}$; $b=M_{вр\,max}/M_{вр,ном}$; $s_к$ — расчетное критическое скольжение, соответствующее $M_{вр\,max}$. Для двигателей с короткозамкнутым ротором простых, достаточно точных зависимостей от s нет и поэтому используются графические соотношения. Приводимые в движение механизмы разделяются на две основные группы: с $M_{пр}=\text{const}$ и с $M_{пр}$, резко снижающимся при увеличении s сверх критического значения.

На рис. 14.1, *а* приведены зависимости $M_{вр}=f(s)$ при разных K_U и $M_{пр}=\text{const}$. Кривые *1* и *2* характеризуют работу двигателя с фазным ротором соответственно при $U_{ном}$ и $U_{к\,min}$, при котором $M_{вр\,max}=M_{пр}$ и двигатель еще может остаться в работе с $s=s_к$. Напряжение $U_{к\,min}=U_{ном}/\sqrt{b}$ и при $b\approx 2$ составляет около $0{,}7U_{ном}$. Если понижение напряжения до $U<U_{к\,min}$ продержится в течение времени, достаточного для достижения предельного $s=s_{пр}$, то при последующем восстановлении напряжения даже до $U_{ном}$ двигатель не сможет развернуться и остановиться, так как при этом его $M_{вр}<M_{пр}$. Необходимо отметить, что при снижениях напряжения до $U<U_{к\,min}$ в течение нескольких десятых долей секунды этого произойти не может. Поэтому при ликвидации, например, внешних КЗ с выдержками времени примерно 0,5 с разворот будет обеспечиваться. Для

двигателя с короткозамкнутым ротором (кривая *3*) разворот оказывается возможным всегда при достаточном значении восстанавливающегося напряжения. На рис. 14.1, *б* приведены аналогичные зависимости для привода с вентиляторной характеристикой и двигателя с фазным ротором. Они показывают, что в данном случае двигатели

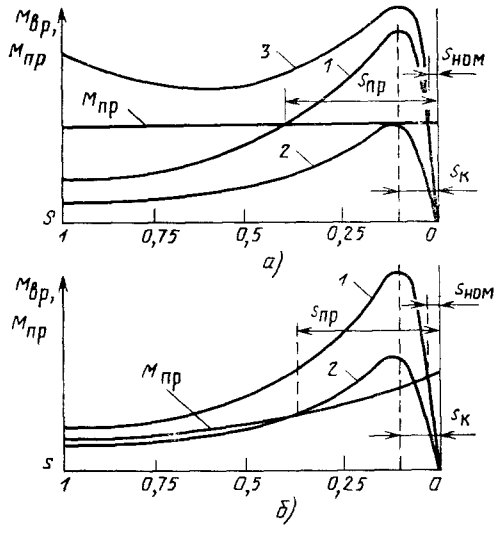


Рис. 14.1. Зависимости от скольжения вращающих моментов асинхронных двигателей при различных значениях напряжения и противодействующих моментов:

а — при постоянном противодействующем моменте; *б* — при противодействующем моменте вентиляторного типа; *1*, *2* — двигатели с фазным ротором; *3* — двигатели с короткозамкнутым ротором

с фазным ротором и выведенным пусковым реостатом, как и имеющие короткозамкнутый ротор, могут разворачиваться независимо от времени снижения напряжения и последующего его восстановления.

При несимметричных КЗ, как показали зарубежные и отечественные работы, двигатели ведут себя примерно так же, как при металлических $K^{(3)}$. Это определяется тем, что составляющие обратной последовательности в напряжениях обусловливают $M_{вр\,2}$, действующий в сторону, противоположную $M_{вр1}$, и результирующий $M_{вр,рез}=M_{вр1}-M_{вр2}$ оказывается небольшим.

При восстановлении напряжения начинается разворот-самозапуск двигателей. В процессе самозапуска по обмоткам двигателей проходят токи самозапуска, которые в несколько раз могут превосходить их $I_{ном}$. Однако эти токи представляют опасность только в тех случаях, когда двигатели не могут развернуться. Сверхтоки в других случаях в правильно спроектированной и эксплуатируемой сети существуют кратковременно и обычно обусловливают допустимые кратковременные перегревы обмоток. До внедрения в практику работ И. А. Сыромятникова для двигателей с фазным ротором опасались также динамического действия бросков при внезапном восстановлении напряжения, когда пусковой реостат выведен, и поэтому такие двигатели практически немедленно при сильных снижениях напряжения автоматически отключали минимальными защитами напряжения. Со второй половины 30-х годов такая практика из эксплуатации была исключена, что дало возможность значительно повысить надежность питания многих потребителей. При принятии такого решения учитывалось, что при внешних КЗ у выводов двигателей через них проходят броски тока, которых избежать нельзя, имеющие примерно те же значения, что и пусковые токи двигателей при выведенном пусковом реостате.

Необходимо, однако, отметить, что самозапуск, как правило, является более тяжелым режимом, чем нормальный пуск отдельных двигателей. Это определяется пониженным напряжением в сети, обусловленным одновременным разворотом ряда двигателей, выведенными пусковыми сопротивлениями двигателей с фазным ротором, возможным (например, при автоматическом включении резерва — АВР) увеличением пусковых токов, если собственные ЭДС двигателей в момент включения еще не успели затухнуть и их фазы таковы, что общая результирующая ЭДС системы и двигателя оказывается большей $U_{ном}$. Изложенное дает возможность сформулировать общие требования к защите от сверхтоков асинхронных двигателей, являющихся следствием понижения и последующего восстановления напряжения: защита должна предусматриваться на двигателях с фазным ротором, работающих с механизмами, имеющими $M_{пр}=\text{const}$, а также на других двигателях, имеющих тяжелые условия самозапуска. Ее основным назначением является защита обмоток от перегрева сверхтоками в случаях, если двигатель не разворачивается при восстановлении напряжения или процесс разворота недопустимо затягивается; она должна, если это оказывается необходимым, отключать менее ответственные двигатели для облегчения самозапуска более ответственных. Для выполнения этих функций целесообразно применять групповые минимальные защиты напряжения, а рассмотренные выше защиты от перегрузок рассматривать только как резервные.

Условия работы синхронных двигателей при понижениях напряжения оказываются другими, чем для асинхронных. Установившийся синхронный режим двигателя характеризуется потребляемой им активной мощностью $P_c = UI\cos\varphi$, ЭДС E_d за синхронным активным сопротивлением в продольной оси X_d и поперечной оси X_q и углом сдвига δ между E_d и напряжением на зажимах U. Мощность $P_c = E_d \sin\delta/X_d + U^2(X_d - X_q)\sin 2\delta/(2X_dX_q)$. С другой стороны, P_c определяется статическим противодействующим моментом $M_{пр}$. Устойчивая работа имеет место в том случае, когда нагрузка механизма меньше максимально возможного значения $P_{c\,max}$. Двигатель работает в синхронном режиме до тех пор, пока снижение произведения E_dU компенсируется возрастанием угла δ. При дальнейшем уменьшении E_dU возникают качания и возможность выпадения двигателя из синхронизма. Таким образом, выпадение двигателя из синхронизма может определяться снижением U, уменьшением тока возбуждения и недопустимым увеличением нагрузки. С другой стороны, форсировка возбуждения, широко используемая в отечественной практике, существенно влияет на повышение устойчивой работы. Внезапные резкие снижения напряжения, опасные с точки зрения выпадения двигателя из синхронизма, обычно возникают в результате КЗ в питающей сети. При этом наиболее тяжелыми являются $K^{(3)}$ (см. гл. 1), так как при несимметричных КЗ всегда остается некоторый вращающий момент, определяемый составляющими прямой последовательности в напряжениях. Поведение двигателей при внешних КЗ достаточно сложно и рассматривается с применением методов, используемых для расчетов динамической устойчивости систем [30]. Использование этих методов дает возможность определить и допустимые времена отключения КЗ, которые дали бы возможность сохранить двигатели в устойчивой работе. Времена эти оказываются весьма малыми. Предельное минимальное значение напряжения, при котором двигатель еще остается устойчиво работающим, принимают весьма приближенно равным $0{,}5U_{ном}$ (для $K^{(3)}$). Вышедший из

синхронизма двигатель при восстановлении напряжения часто обратно в синхронизм не втягивается. На длительный асинхронный ход двигатели не рассчитаны. Поэтому на них устанавливается специальная защита от несинхронной работы. На менее ответственных двигателях она действует на отключение. На ответственных двигателях защита может действовать на устройство ресинхронизации (которое снимает возбуждение и обратно его подает при достижении подсинхронной скорости), автоматическую разгрузку или отключение с последующим автоматическим пуском. Используется также минимальная защита напряжения, в основном для обеспечения бесперебойной работы установки в целом (имеющей и асинхронные двигатели) и действия в случае длительного исчезновения напряжения. Защиту в сочетании с органами направления активной мощности используют также для отделения от шин питающей подстанции (см. гл. 13). Напряжение срабатывания для нее желательно иметь примерно $0{,}5U_{ном}$; выдержки времени выбираются с учетом соображений, данных выше для аналогичных защит асинхронных двигателей.

Сверхтоки при разрыве фазы. В случае разрыва фазы работающий двигатель может продолжать вращаться, если $M_{вр} > M_{пр}$. При этом по его обмоткам могут проходить значительные токи, в том числе особо опасные составляющие обратной последовательности. По литературным данным (см., например, [75]) длительно допустимый ток обратной последовательности имеет тот же порядок значений, что и для генераторов (примерно до $0{,}1I_{ном}$). С разрывом фазы считаются преимущественно в сетях, защищенных от КЗ плавкими предохранителями, учитывая возможность нарушения одного из них, и в сетях, например, горной промышленности. В стационарных сетях с релейной защитой этот вид сверхтоков считался маловероятным. Однако в последние годы и в этих сетях иногда применяют защиту от разрыва фаз, сочетая ее с защитами от витковых КЗ в статорных обмотках. В таких случаях ее часто выполняют реагирующей на составляющие токов обратной последовательности. При этом оказывается необходимой ее отстройка по времени от внешних $K^{(2)}$, например в параллельно работающих двигателях.

14.3. ТИПЫ ЗАЩИТ ДВИГАТЕЛЕЙ

Из проведенного выше рассмотрения следует, что основными видами повреждений двигателей являются, как и для других элементов электроэнергетической системы, разного рода КЗ и однофазные замыкания на землю, а основными видами ненормальных режимов — сверхтоки. Поэтому для защит двигателей в основном используются известные из предыдущих глав токовые, дифференциальные токовые, токовые и направленные защиты нулевой последовательности от $K_з^{(1)}$ и некоторые другие. Однако их выполнение связано с некоторыми специфическими особенностями, обусловленными установкой на двигателях. Имеются и некоторые защиты, разработанные специально для двигателей. В настоящее время в отечественной литературе подробно рассмотрены как общие вопросы выполнения защит двигателей, так и конкретные схемы их осуществления и способы выбора параметров. К таким работам в первую очередь необходимо отнести [75, 77, 79] и некоторые другие. Вместе с тем вопросы как дальнейшего совершенствования, так и промышленного освоения защит двигателей нельзя считать завершенными. Поэтому ниже рассмотрены только примеры выполнения защит. Часто они строятся с использованием оперативного переменного тока.

14.4. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ

Максимальная токовая защита. Возможная совмещенная структурная схема приведена на рис. 14.2. Защита выполнена двухфазной двухсистемной — с двумя органами тока КА, работающими по схеме ИЛИ на отключение выключателя, а для синхронных двигателей — и на гашение поля. Для обеспечения селективности защите как наиболее удаленной от источников питания выдержки времени не требуется. Поэтому она для быстрейшего отключения КЗ осуществляется без нее. Первичный ток срабатывания защиты с учетом соображений гл. 5 выбирается по общему выражению: $I_{с,з}^{(3)} = k_{отс} k_з I_{дв,ном}$. При асинхронном двигателе $k_з$ обычно рассчитывается в предположении включения двигателя под номинальное напряжение с выведенным пусковым реостатом (при фазном роторе). Отстройка от броска при внешнем КЗ обычно не является расчетным случаем. Получающаяся примерная зависимость токов в

статорной обмотке от времени приведена на рис. 14.3. Коэффициент $k_з$ определяется кратностью симметричной составляющей пускового тока в начале пуска, даваемой заводами-изготовителями и в несколько раз превосходящей $I_{дв,ном}$. Для синхронных двигателей расчетным является, наоборот, внешнее трехфазное КЗ. В этом случае под $k_з$ следует понимать кратность симметричной слагающей (для $t=0$) $I_к^{(3)}$ по отношению к $I_{дв,ном}$, равную $I_{дв,ном}/X''_d$. Коэффициент отстройки $k_{отс}$ учитывает наличие апериодических слагающих в расчетных токах, режимы с неуспевшими затухнуть собственными ЭДС асинхронных двигателей и т. п.;

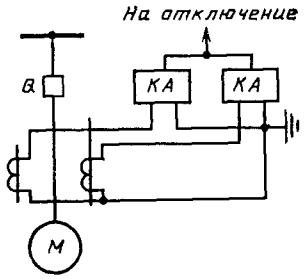


Рис. 14.2. Совмещеиная структурная схема максимальной токовой защиты двигателя

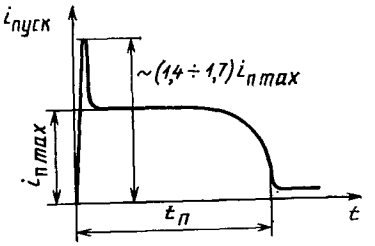


Рис. 14.3. Примерная зависимость огибающей мгновенных значений пускового тока от времени для асинхронного двигателя

он зависит также от типа применяемых органов тока и бывает равным примерно 1,5—2,5. Чувствительность защиты принято характеризовать $k_{ч\,min}$ при КЗ на зажимах двигателя. Допустимым считается $k_{ч\,min} \geqslant 2$. Необходимо отметить, что он не характеризует защитоспособность, которая определяется долей замкнувшихся витков статорной обмотки. Она обычно бывает малой. Небольшое ее повышение может быть достигнуто при применении органов тока, имеющих отстройку от переходных значений токов (см., например, [75]). В этом случае $k_{отс}$ может иметь значительно меньшие значения. Вторым существенным недостатком схемы, осуществляющей защиту от многофазных КЗ, является недействие при $K_{дв}^{(1,1)}$ с расположением одного места пробоя в фазе двигателя без *ТА*. При отсутствии на двигателе защиты от $K_з^{(1)}$ с *ТА* нулевой последовательности, который можно было бы использовать для создания защиты от $K_{дв}^{(1,1)}$, повреждение будет ликвидироваться защитой питающего элемента с выдержкой времени. Последнее приводит к дополнительному разрушению двигателя. Учитывая изложенное, а также простоту и небольшую стоимость, рассмотренную защиту в общем случае применяют на двигателях мощностью $P \leqslant 3500 \div 5000$ кВт. Пределы указанной мощности желательно иметь по возможности меньшими.

Дифференциальная токовая защита. Возможные совмещенные структурные схемы защиты приведены на рис.

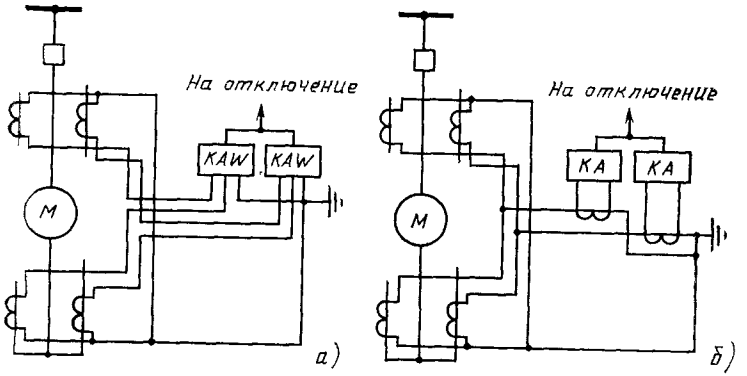


Рис. 14.4. Совмещенные структурные схемы двухфазной дифференциальной токовой защиты двигателя:

а — с торможением; *б* — без торможения

14.4, *а* и *б*. Они выполнены двухфазными в предположении, что опасные для двигателей $K_{дв}^{(1,1)}$ без выдержки времени ликвидируются дополнительными органами тока, использующими *ТА* нулевой последовательности защит от $K_з^{(1)}$, которые, как правило, в рассматриваемом случае имеются. Как и для генераторов (см. гл. 12), схема на рис. 14.4, *а* предполагает применение органов тока, имеющих торможение от токов плеч, а схема на рис. 14.4, *б* — применение органов тока с промежуточными насыщающимися *TALT* усиленного действия (только для отстройки от переходных $i_{нб}$). До последнего времени для двигателей довольно широко применялась, как более простая, схема на рис. 14.4, *б*. Однако, как показали опыт ее эксплуатации (см., например, [66]) и исследования [75], она для правильного функ-

ционирования обычно должна иметь $I_{с,з}$, значительно бо́льшие $I_{дв,ном}$ (до 2—3 $I_{дв,ном}$). Это в основном определяется конструктивным осуществлением защиты: *ТА* со стороны выключателя располагаются в КРУ там же, где и комплект реле, поэтому сопротивление плеча проводов защиты с этой стороны близко к нулю; сопротивление проводов плеча от *ТА*, расположенных у выводов к нейтрали двигателя, может быть во много раз бо́льшим. В результате появляется большая периодическая слагающая в $I_{нб}$, определяемая разницей значений токов намагничивания *ТА*, что обусловливает большой ток $I_{с,з}$ по схеме на рис. 14.4, *б*. Отстраивать ток $I_{с,з}$ от $I_{дв,ном}$, могущих появляться в дифференциальной цепи защиты при обрыве вспомогательных проводов, обычно нет оснований, как и для генераторов. Поэтому предпочтение должно отдаваться схеме с торможением на рис. 14.4, *а* или другим схемам, обеспечивающим, как и она, $I_{с,з} < I_{дв,ном}$.

Минимальные защиты напряжения для асинхронных двигателей. Ниже рассматриваются (рис. 14.5 и рис. 14.6) два варианта схемы, разработанные ТЭП применительно к собственным нуждам тепловых электрических станций и работающие на оперативном постоянном токе с электромеханическими реле. В основном они отличаются друг от друга способом предотвращения ложных срабатываний при нарушениях цепей *TV*, питающих органы напряжения. В схеме на рис. 14.5 для этого используются три минимальных органа напряжения, включенных на три разных междуфазных напряжения и имеющих последовательно соединенные контакты (схема И); в схеме на рис. 14.6 два из минимальных органов напряжения заменены на максимальный, но включенный через фильтр напряжения обратной последовательности.

Схемы имеют следующие особенности: являются групповыми для секций 6—10 кВ и выполняют две основные функции — отключение неответственных двигателей для облегчения самозапуска более ответственных, а также двигателей, которые не могут разворачиваться при восстановлении напряжения после быстрой ликвидации внешних КЗ, и отключение ответственных двигателей при длительном исчезновении напряжения или если двигатели с тяжелыми условиями самозапуска не смогли развернуться. В соответствии с этим защиты имеют две ступени. Первая выполняется для схемы на рис. 14.5 указанными выше *KV1* — *KV3* и органом выдержки времени *KT6*, а на рис.

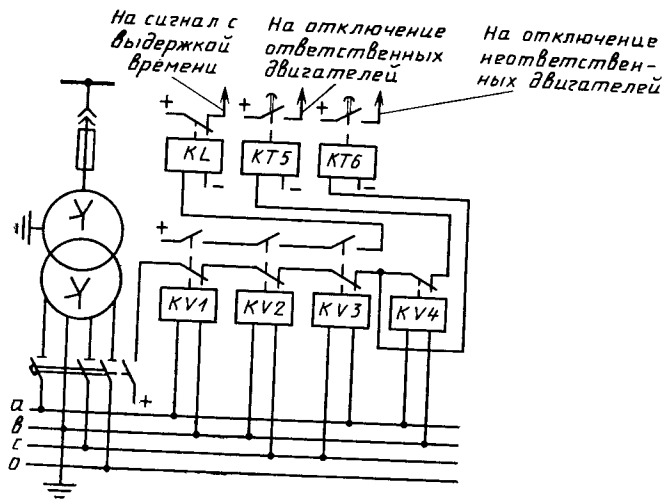


Рис. 14.5. Совмещенная структурная схема минимальной защиты напряжения для двигателей 6—10 кВ (вариант I)

14.6 — органом напряжения обратной последовательности *KV1*, минимальным органом напряжения *KV2* и органом выдержки времени *KT4*. Напряжения срабатывания органов *KV1* — *KV3* и *KV2* $U_{с,з} \approx 0{,}7U_{ном}$, органа обратной последовательности *KV1* $U_{с,з} > U_{нб}$ при нормальной работе ($U_{с,з} \approx 0{,}06U_{ном}$), уставка *KT6* и *KT4* $t \approx 0{,}5$ с. Для работы II ступени в цепь, подающую сигнал на орган выдержки времени *KT5* с $t \approx 9 \div 10$ с, включается контакт минимального органа напряжения *KV4* (или соответственно *KV3*), имеющего $U_{с,з} \approx 0{,}5U_{ном}$. Оперативный ток к защите подводится через вспомогательный контакт автоматического выключателя, защищающего *TV* от КЗ в сети 100 В. При нарушении цепей напряжения защита с выдержкой времени, большей максимальных времен срабатывания защит от КЗ в питающей системе, действует на сигнал. Достоинством схемы на рис. 14.6 по сравнению со схемой на рис. 14.5 является более надежное выведение из действия при перегорании как двух, так и одного предохранителя на стороне высшего напряжения *TV*. Поэтому она является предпочтительной.

С применением схем на рис. 14.5, 14.6 или им подобных

осуществляется защита асинхронных двигателей от сверхтоков при понижениях и последующих восстановлениях напряжения. Защита может использоваться также, как отмечалось выше, в качестве вспомогательной для синхронных двигателей.

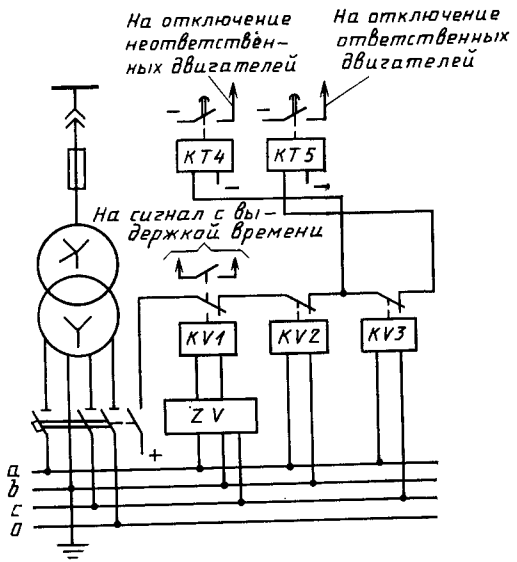


Рис. 14.6. Совмещенная структурная схема минимальной защиты напряжения для двигателей 6—10 кВ (вариант II)

Токовые защиты от симметричных перегрузок. Простейшие схемы токовых защит даны на рис. 14.7 и 14.8. Они осуществляются однофазными с использованием одного органа тока с ограниченно зависимой характеристикой выдержки времени (рис. 14.7) или измерительного органа тока, работающего на орган выдержки времени (рис. 14.8). Ток срабатывания защиты выбирается с учетом номинального тока двигателя по выражению $I_{с,з}=k_{отс}I_{дв,ном}/k_{в}$. При выборе выдержек времени должны учитываться два условия: предотвращение срабатывания при нормальном пуске или самозапуске и недопустимость перегрева обмоток выше определяемого тепловой характеристикой двигателя. Обычно эти требования оказываются между собой увязанными, так как за время нормальных пусков и самозапусков

двигатели должны перегреваться в допустимых пределах. Время пуска и самозапуска нагруженных двигателей часто достигает 10—15 с, а в некоторых случаях и бóльших значений.

Поэтому для рассматриваемого случая требуются модификации органов тока, отличные от применяемых для защиты от КЗ. Основным недостатком рассматриваемых выполнений токовых защит является то, что в случаях, когда

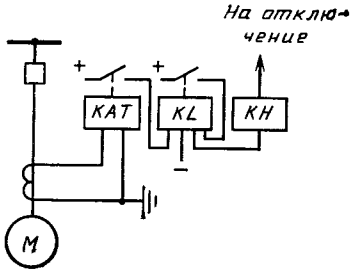


Рис. 14.7. Схема однофазной токовой защиты от симметричных перегрузок с ограниченно-зависимой характеристикой выдержки времени

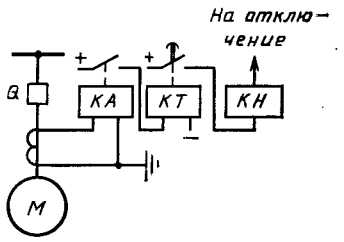


Рис. 14.8. Схема однофазной токовой защиты от симметричных перегрузок с независимой характеристикой выдержки времени

это требуется по условиям кратковременных технологических перегрузок, невозможно полное использование перегрузочной характеристики двигателя при небольших сверхтоках ввиду часто недостаточных времен срабатывания защиты (с этой точки зрения лучше схема на рис. 14.7). Недостатком схем является также невозможность учета предварительной загрузки двигателя и температуры охлаждающей среды. Достоинством схем является их простота. Поэтому они продолжают еще довольно широко использоваться на практике.

Более совершенные, но и значительно более сложные схемы токовых защит начаты выпуском промышленностью в комплектных распределительных устройствах (КРУ) 6—10 кВ. В них защита, подобно защите ротора генератора от перегрузок (см. гл. 12), имеет пусковой орган, функциональный преобразователь мгновенного значения входного напряжения с квадратичной характеристикой, интегратор, реагирующий и выходной органы (см., например, [75]). За-

щита рассчитана на работу при температурах окружающего воздуха от —20 до +45 °С. Однако изменение температуры окружающей двигатель среды защита учитывать не может. Она имеет высокий $k_в$ пускового органа и поэтому может начинать работу при токах более близких к $I_{дв,ном}$, чем простые токовые защиты; имеет лучшие характеристики выдержки времени, соответствующие принятому выражению для перегрузочной характеристики двигателя.

Защиты синхронных двигателей от асинхронного хода. Простейшие защиты выполняются с использованием тока статора. Поскольку режим является симметричным, они включаются на ток одной фазы. При выпадении двигателя из синхронизма через измерительный орган тока проходит пульсирующий ток (рис. 14.9). Орган срабатывает в точках

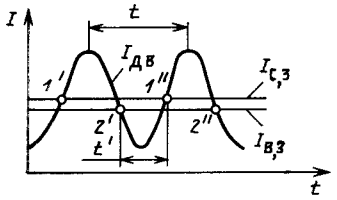


Рис. 14.9. Зависимость пульсирующего тока в синхронном двигателе, выпавшем из синхронизма

$1'$ и $1''$, соответствующих пересечению кривой пульсирующего тока $I_{дв}$ с прямой тока срабатывания $I_{с,з}$ защиты. Он начинает возвращаться в исходное состояние в точках $2'$, $2''$, определяемых током возврата защиты $I_{в,з}$. Для срабатывания защиты необходимо, чтобы его время возврата $t_в$ превышало паузу t' между точками $2'$ и $1''$ или сигнал о сработавшем органе был расширен до значения $t''>t'$. На возможность применения этих соотношений для выполнения защиты существенное влияние оказывает ОКЗ двигателей, примерно равное $1/X_d$. Синхронные двигатели с ОКЗ>1 по сравнению с двигателями с ОКЗ<1 имеют при асинхронном ходе бóльшие значения скольжения, сопровождаются значительными колебаниями тока статора и малыми t'. Это дает возможность более эффективного применения для них токовых защит. На рис. 14.10 и 14.11 приведены возможные их исполнения на реле отечественного производства, разработанные и экспериментально проверенные в 40-е годы СРЗиУ ТЭП [1]. Схемы даны в упрощенном структурном виде. Некоторые практические улучшения работы схемы на рис. 14.10 приведены в [75]. В схеме на рис. 14.10 измерительный орган тока работает на отключение через логический орган KL, имеющий выдержку времени на возврат, и орган времени KT. Выдержка времени KT в рассматриваемой упрощенной схеме выбирает-

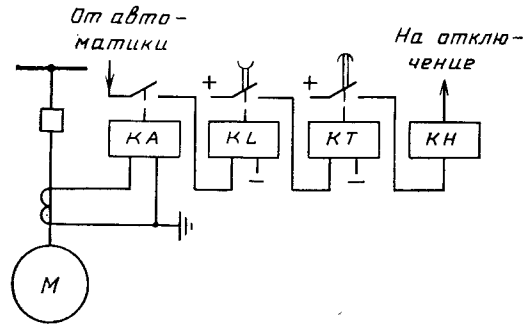


Рис. 14.10. Упрощенная схема токовой защиты синхронного двигателя от асинхронного хода (вариант I)

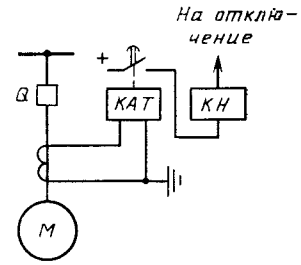


Рис. 14.11. Упрощенная схема токовой защиты синхронного двигателя от асинхронного хода (вариант II)

ся большей времени пуска и самозапуска двигателя (при применении соответствующей автоматики). Время возврата органа KL должно быть больше t' (рис. 14.9). В менее совершенной схеме на рис. 14.11 применен орган тока с ограниченно-зависимой характеристикой выдержки времени в конструктивном исполнении, обеспечивающем его невозврат в исходное состояние при снижениях тока до значений, меньших $I_{в,з}$ (рис. 14.9). К достоинствам схем относится их простота и иногда возможность использования для защиты двигателей от перегрузок (рис. 14.11). К недостаткам относятся значительная выдержка времени (в основном

для схемы на рис. 14.11) и малая чувствительность при ОКЗ<1. Поэтому защиты практически применяются только для неответственных двигателей и двигателей, ресинхронизация которых не используется. В других случаях применяются более сложные защиты, рассмотренные в [75, 79]. Необходимо, однако, отметить, что достаточно универсальных схем современных защит, освоенных промышленностью, которые можно было бы признать типовыми, пока нет.

Вопросы для самопроверки

1. От каких видов повреждений и ненормальных режимов работы предусматриваются защиты асинхронных и синхронных двигателей?
2. Как различаются расчетные условия при выборе максимальной токовой защиты асинхронных и синхронных двигателей?
3. Поясните назначение минимальной защиты напряжения асинхронных двигателей. Как предотвращается ложное срабатывание защиты при нарушениях цепей *TV*?
4. Как осуществляются защиты синхронных двигателей от асинхронного хода?

Глава пятнадцатая

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

15.1. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Общие вопросы. Как было рассмотрено в гл. 1, релейная защита от КЗ и некоторых других повреждений при своем функционировании выполняет три функции: срабатывания при повреждениях в защищаемой зоне, несрабатывания при внешних повреждениях и несрабатывания в режимах без повреждений. Невыполнение каждой из этих функций является отказом функционирования, который в общем случае не следует смешивать с отказом в работоспособности. Отказы функционирования представляют соответственно отказ срабатывания, излишнее срабатывание (отказ несрабатывания) и ложное срабатывание. Отказы функционирования появляются в результате неполноты свойств технического совершенства и надежности и в целом характеризуют эффективность функционирования защиты и в значительной мере ее качество. Под защитой в широком смысле понимают при этом не только само защитное устройство, но также вторичные цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения, в которых создаются воздействующие на защиту величины, каналы связи, цепи питания и отключения, оперативного тока и другие вспомогательные устройства.

Существенное влияние на эффективное отключение повреждений имеют также коммутационные аппараты — прежде всего выключатели, отключающие поврежденный элемент.

Для повышения эффективности работы защищаемой электрической системы следует добиваться необходимого качества защищаемого оборудования и сооружений (линий, распредустройств, КРУ) с учетом экономической эффективности, а также высокого уровня эксплуатации. Важное значение имеют также качество защитной аппаратуры и правильная ее эксплуатация. В пределах заданных условий повышение эффективности функционирования защиты достигается путем использования разного рода резервирования, которое требует, однако, введения в большинстве случаев избыточности. Основное внимание при этом уделяется резервированию функции срабатывания как защиты, так и выключателей по той причине, что именно отказ в срабатывании часто влечет за собой более тяжелые последствия, чем излишние и ложные срабатывания. Однако их предотвращению необходимо уделять должное внимание.

В гл. 1 и последующих рассматривались два основных способа резервирования отключения поврежденного элемента — дальнее и ближнее. Под *дальним* понимается такое резервирование, при котором в случае отказа срабатывания защиты или выключателя элемента повреждение ликвидируется защитами элементов, смежных с поврежденными, действующими на отключение выключателей этих элементов. При этом часто указанные резервирующие защиты и выключатели располагаются на других электроустановках. Однако под понятие дальнего резервирования попадают случаи, когда смежные элементы расположены на той же электроустановке, например неотключенное КЗ на линии ликвидируется защитами от сверхтоков автотрансформаторов той же подстанции. Поэтому для большей четкости были введены [70] два термина: *удаленное и ме-*

стное дальнее резервирование. Они имеют свои достоинства и недостатки.

Под *ближним* понимается такой способ резервирования отключения поврежденного элемента, при котором в случае отказа срабатывания одной защиты повреждение ликвидируется другой защитой того же элемента. Для ближнего резервирования также предлагается использовать [70] несколько уточняющих вариантов названия, однако они имеют меньшее значение, чем для дальнего резервирования, и здесь не рассматриваются.

Важным обстоятельством при осуществлении ближнего резервирования является учет отказов в срабатывании выключателей, которые, к сожалению, являются относительно частым событием при ликвидации повреждений. Поэтому при осуществлении ближнего резервирования, в первую очередь в системах с $U_{ном} \geqslant 110$ кВ, предусматриваются специальные *устройства резервирования при отказе выключателей* (УРОВ), неоднократно упоминавшиеся в главах о защитах с относительной селективностью, поскольку их наличие влияет на значения выдержек времени ступенчатых и им подобных защит.

Ближнее резервирование защит и УРОВ образуют *систему ближнего резервирования.*

Важными, но сложными для разрешения являются вопросы обеспечения необходимой надежности функционирования защит. Особые трудности возникают при оценке надежности систем дальнего резервирования, которая в настоящее время может решаться только при системном подходе с использованием, например, разработанного Н. В. Вавиным логико-вероятностного метода, упомянутого в гл. 1 и подробно рассмотренного в [16]. Однако и он дает только возможность раздельного определения коэффициентов неготовности срабатывания, несрабатывания и ложных срабатываний. Желательно было бы иметь комплексный показатель ненадежности или соответственно надежности (см. гл. 1). Однако использование его, как и совокупности отдельных показателей, наталкивается на затруднения, связанные со сложностью решения общих теоретических экономических проблем. Одним из возможных вариантов при такой ситуации является принятие некоторых нормативных коэффициентов, разработанных и предложенных ЭСП (Э. П. Смирнов).

Более просто могут быть решены вопросы оценки надежности при ближнем резервировании с использованием

статистических материалов, собранных и обработанных Союзтехэнерго (М. И. Сулимова и др.) и полезно примененных в [70] для оценки надежности разных вариантов выполнения ближнего резервирования. При использовании этих материалов необходимо, однако, учитывать их некоторую специфику, сводящуюся к следующему. Отказы, излишние и ложные срабатывания могут определяться, как подчеркивалось в гл. 1, не только ненадежностью, но и техническим несовершенством. Имеющиеся статистические материалы этого обстоятельства обычно не учитывают; поэтому получающиеся в таких случаях данные носят не чисто надежностный характер. В те же статистические материалы входят также неправильные действия защит, определяемые ошибками персонала. Для практических оценок эти обстоятельства могут быть и полезными. Однако теория надежности (см., например, [24]) эти обстоятельства не учитывает. Поэтому ее формулами при рассматриваемом учете статистических материалов следует пользоваться осмотрительно или, во всяком случае, оговаривать некоторую условность получаемых данных, что не всегда делается.

Дальнее резервирование. Дальнее удаленное резервирование как единственное широко применяется в сетях $U_{ном} \leqslant 35$ кВ, а также пока в сетях 110—220 кВ. Его недостатками часто являются недостаточная чувствительность, а также то, что при нем обычно полностью нарушается работа элементов подстанций, оказывающихся в зоне резервирования. Лучшие результаты с точки зрения указанных его особенностей получаются при местном дальнем резервировании, которое имеет большие области применения. Его основным недостатком по сравнению с первым является отказ в работе при потере централизованного источника питания оперативных цепей, который, как правило, является общим.

Ближнее резервирование. Оно, как правило, применяется в системах с $U_{ном} \geqslant 330$ кВ, однако за последние годы все шире используется также в сетях 110 и особенно 220 кВ. Одним из его существенных недостатков является отказ при потере общего источника оперативного тока. Поэтому и по некоторым другим причинам ближнее резервирование, как правило, сочетается с дальним. Согласно теории надежности результирующий коэффициент ненадежности двух защит, выполняющих общие функции при полностью независимой работе, $q_{рез} = q_1 q_2$. Однако обычно появляются зависимые отказы. В общем случае их учет,

как отмечается в теории надежности, может быть достаточно сложен. Применительно к тем случаям, которые приходится рассматривать при ближнем резервировании, поправочный коэффициент, как показано в работах ЭСП (Н. В. Вавин, Э. П. Смирнов), может достигать двух [27]. Тогда $q_{рез}=2q_1q_2$. Для более полного резервирования ближнее резервирование в сетях с $U_{ном}\geqslant 110$ кВ применяется совместно с УРОВ. Чем более совершенна система ближнего резервирования, тем менее нужно удаленное дальнее резервирование. При практическом осуществлении систем ближнего резервирования большое внимание уделяется повышению надежности вторичных цепей *ТА* и *TV*, цепей оперативного тока. Так, например, каждая из защит присоединяется к отдельному сердечнику *ТА*, в зарубежной практике иногда применяют для их действия отдельные электромагниты приводов отключения выключателей. Отечественная промышленность выключателей с такими приводами не поставляет.

15.2. УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ ОТКАЗЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ (УРОВ)

Назначение. УРОВ предназначается для ликвидации с наименьшими потерями повреждений преимущественно при $U_{ном}\geqslant 110$ кВ, сопровождающихся отказом выключателя, и КЗ в зоне между *ТА* и выключателем (если применяются выносные *ТА*). Целесообразность использования УРОВ по первой причине определяется, как отмечалось выше, тем, что вероятность отказов выключателей в сетях с $U_{ном}\geqslant 110$ кВ значительно выше, чем вероятность отказа срабатывания действующей на него защиты (см., например, [70]). УРОВ пускается в действие при срабатывании защит поврежденного элемента и осуществляет отключение выключателей, смежных с отказавшим, с выдержкой времени, большей времени отключения выключателя. При этом иногда применяется отключение не только смежного выключателя, но и выключателя линии данной электроустановки с другой ее стороны, с помощью, например, снятия блокирующего сигнала защиты линии.

Принцип действия. Принцип действия УРОВ впервые был предложен СРЗиУ ТЭП и кафедрой РЗиА МЭИ во второй половине 40-х годов [1]. Он рассматривается ниже на примере его использования на электроустановке со схемой соединений в виде четырехугольника с выносными *ТА*

(рис. 15.1). Защита элементов, например линии *W1*, включена на *ТА1* и *ТА2*, установленные у выключателей *Q1* и *Q2*. Контроль их действия при срабатывании защиты линии *W1* осуществляется органами тока *КА1* и *КА2*, включенными соответственно во вторичные цепи *ТА1* и *ТА2* (использование для этого вместо органов тока логических реле, фиксирующих положение выключателя, недопустимо, так как они не могут фиксировать неотключенные защитой *W1* КЗ между *Q* и выносными *ТА*). При КЗ в защищаемой зоне, ограниченной *ТА1* и *ТА2*, защита непосред-

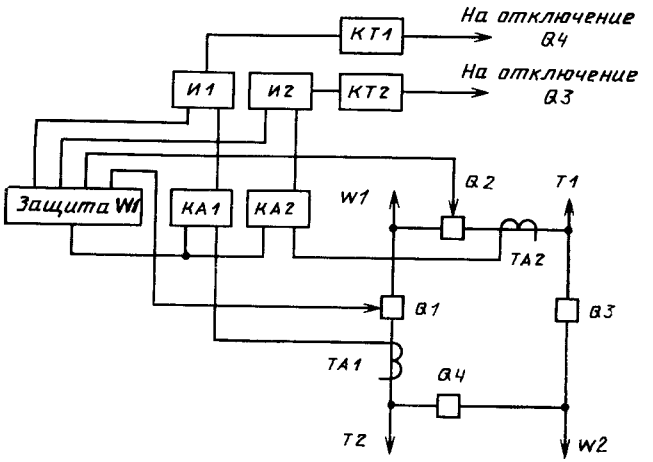


Рис. 15.1. Пример схемы УРОВ для схемы соединений в виде четырехугольника с выносными *ТА*

ственно действует на отключение *Q1* и *Q2* и дополнительно совместно с *КА1* и *КА2* (включены по схемам И) — соответственно на органы времени *КТ1* и *КТ2*. При отказе выключателя и срабатывании соответствующего *КТ* осуществляется отключение выключателя, ближнего к отказавшему. Например, в случае отказа выключателя *Q2* орган *КА1* возвращается в исходное положение, а *КА2* нет. Тогда защита через *КТ2* производит дополнительное отключение *Q3*. В результате отключается не вся электроустановка — линия *W2* и трансформатор *Т2* остаются в работе. Аналогично будет ликвидироваться КЗ между *Q2* и *ТА2*, когда защита линии *W1* срабатывает, выключатели *Q1* и *Q2* действуют, но токи КЗ к месту повреждения про-

должают проходить через оставшиеся в работе элементы. Ток возврата (а соответственно и ток срабатывания) *КА* принципиально должен выбираться достаточно малым, так как после отключения контролируемого выключателя ток в нем пропадает. Выдержка времени *КТ* выбирается больше времени действия выключателя *Q* с учетом погрешности *КТ* и времени возврата *КА*.

Реальные схемы УРОВ оказываются значительно более сложными, чем схема, приведенная для рассмотрения его принципа действия (см., например, [70]). Это определяется стремлением повысить надежность схем УРОВ, исключить их возможные ложные и излишние срабатывания, в том числе и по причине неправильных действий персонала.

Например, в схемах осуществляются автоматическая проверка исправности выключателя путем дополнительного действия на его отключение еще от самого УРОВ, дополнительный контроль действия на орган времени контактов логического реле положения выключателей и т. п.

Выполнение схем и их оценка. На практике получили применение два варианта повышения надежности схем: схема с использованием вспомогательного органа — реле положения «включено» выключателя (рис. 15.2) и схема с автоматической проверкой исправности выключателя путем действия на его отключение (рис. 15.3). По первой схеме (предложена В. М. Елфимовым, Мосэнерго) при ошибочном замыкании контакта выходного логического органа защиты *KL5* действует логический орган *KL8*, но орган времени УРОВ *КТ7*, даже если орган тока *КА6* имеет замкнутый контакт, при этом не запускается, так как размыкающий контакт органа положения *KQC9* выключателя при включенном положении последнего разомкнут, поскольку сигнала на отключение выключателя не было. Во второй схеме (предложена В. М. Ермоленко и В. Н. Красевой, ОРЗАУМ ТЭП) при ошибочном замыкании контакта выходного логического органа защиты *KL5*, пускающего УРОВ, действует его логический орган *KL8*, подающий сигнал на отключение *Q* и пуск органа времени *КТ7* через

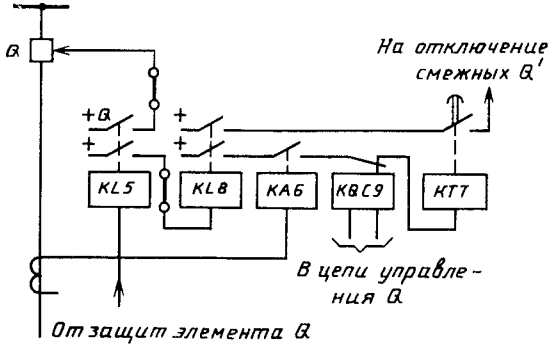


Рис. 15.2. Принцип работы УРОВ с использованием реле положения «включено»

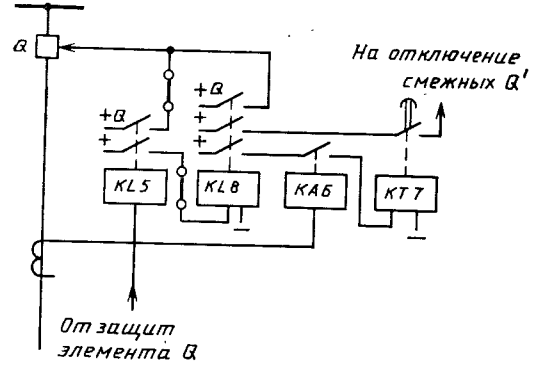


Рис. 15.3. Принцип работы УРОВ с автоматической проверкой исправности выключателя путем действия на его отключение

контакт органа тока *КА6*. После отключения *Q* орган *КТ6*, контролирующий наличие тока в элементе, размыкая свой контакт (если он был замкнут), разрывает цепь пуска *КТ7*. Таким образом предотвращается ложное срабатывание УРОВ. Однако если при этом выключатель *Q* не отключится, произойдет ложное срабатывание УРОВ со всеми вытекающими из этого последствиями, а при отключении выключателя — потеря элемента, если он был включен через один выключатель. Этот недостаток второй схемы не является очень существенным для систем сверхвысоких напряжений, для которых принято выполнять индивидуальные УРОВ для каждого выключателя, а не централизованные, используемые в системах более низких напряжений. Важное значение имеют в схемах органы тока, определяющие в числе прочих задач также направленность его дей-

ствия. Выполнение надежных, чувствительных органов тока встретило ряд затруднений. В основу выпускаемых промышленностью органов тока легла разработка ЭСП (Е. В. Лысенко). Они выпускаются трехфазными для линий, не имеющих однофазного отключения и последующего автоматического включения линии (ОАПВ), или однофазными при наличии последнего, когда защиты линии действуют на отключение через избирательные органы ОАПВ. Для большей надежности при сверхвысоких напряжениях принято применять удвоенное число органов тока, действующих по схеме И. В Советском Союзе основные разработки по УРОВ были выполнены большим коллективом работников СРЗиУ ТЭП и ЭСП. Из зарубежных работ в этом направлении следует назвать работы Варрингтона (Великобритания). В настоящее время промышленностью с учетом приведенных и ряда других соображений (см., например, [70]) выпускаются индивидуальные УРОВ с использованием схемы на рис. 15.3 и централизованные для более низких напряжений с использованием схемы на рис. 15.2.

15.3. ДУГОВЫЕ ЗАЩИТЫ В КРУ

Дуговыми называются защиты, реагирующие на повышение давления в ячейке КРУ, вызванное горением дуги, или изменением освещенности ячейки. Указанные явления возникают при отказе защиты или выключателя в случае КЗ на отходящих линиях 6 или 10 кВ, приводящих к распространению повреждения на ячейку, а затем на шины и смежные ячейки КРУ. Контакты, связанные с датчиками давления, или контакты выходных органов светочувствительных устройств дают сигнал на отключение ввода от питающего источника. Для предотвращения ложных срабатываний при неисправности датчиков вводится блокировка по току. Защита на подстанциях с упрощенными схемами электрических соединений может выполняться двухступенчатой. С первой выдержкой времени отключается ввод, а с большей, второй включается короткозамыкатель со стороны высшего напряжения трансформатора [48]. Представляется, что появление рассматриваемой защиты является достаточно типичной иллюстрацией рассмотренного выше положения о том, что на защиту иногда возлагаются задачи, которые более полноценно должны были бы решаться качественным выполнением аппаратуры электрических соединений.

15.4. ЗАЩИТЫ НА ОБХОДНЫХ, ШИНОСОЕДИНИТЕЛЬНЫХ И СЕКЦИОННЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ ШИН

На обходных, шиносоединительных, а в ряде случаев и на секционных выключателях шин станций и подстанций устанавливаются комплекты защиты. Назначение и выполнение этих защит определяется тем, в цепь какого из указанных выключателей они включены, и функциями, выполняемыми выключателем в схеме соединений.

На обходном выключателе, заменяющем при необходимости выключатели элементов, обычно предусматривается комплект защиты, которая может заменить прежде всего защиту со ступенчатыми характеристиками присоединенных к шинам линий, так как защита последних обычно проверяется одновременно с выключателем. При наличии на линии быстродействующей основной защиты (например, направленной с ВЧ-блокировкой) она может переключаться действием на обходной выключатель. У основных дифференциальных защит машин (например, защит трансформаторов блоков) при их работе через обходной выключатель соответствующая сторона защиты переключается на *ТА* у обходного выключателя и обеспечивается подача сигнала на его отключение.

На шиносоединительных выключателях при отсутствии обходного (схема на высоких напряжениях в настоящее время применяется редко) тип устанавливаемых на них защит обычно выбирается так же, как и на обходных выключателях.

На секционных выключателях при наличии специальных защит шин, а также на шиносоединительных нормально включенных выключателях при наличии обходных защиты имеют другое основное назначение: обеспечение в аварийных ситуациях более полноценного (например, лучшего по чувствительности) удаленного дальнего резервирования путем разрезания (деления) шин на части шиносоединительными и секционными выключателями. Часто это достигается совместно с местным дальним резервированием, например защитами от внешних КЗ на трансформаторах, автотрансформаторах, которые, как указывалось в гл. 12 и 13, с меньшей выдержкой времени действуют на секционные, шиносоединительные выключатели и толь-

ко с большей выдержкой времени — на выключатели защищаемого элемента. Это положение относится и к защитам линий (токовым направленным нулевой последовательности, дистанционным), выполняемым с «вывернутыми» последними ступенями (см. гл. 1). При рассматриваемом назначении защит на шиносоединительных и секционных выключателях они выполняются по весьма упрощенным схемам (см., например, [70]). Необходимо отметить, что делительные защиты часто применяются и для других целей: например, с использованием неселективных резервных ступеней защит с относительной селективностью линий высокого напряжения — для обеспечения более селективного действия резервных ступеней других защит (см. гл. 5, гл. 6), а также для деления секций шин низшего напряжения на подстанциях с упрощенными схемами электрических соединений [48] и т. д.

15.5. КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТ И ИХ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Повышение технического совершенства устройств защиты в соответствии с общими условиями развития техники ведет обычно к их все большему усложнению и может приводить к снижению надежности. Следует также учитывать, что в отечественной практике изделия иногда поступают к потребителю в состоянии, не доведенном до возможности их быстрого, без тщательных проверок и доводок включения в работу. Указанные обстоятельства требуют более напряженной работы эксплуатационного персонала и персонала производственных лабораторий, постоянного повышения их научно-технической и производственной квалификации.

Для проверки состояния защит всегда осуществляются те или иные мероприятия: регулярный профилактический контроль, ручные или автоматические тестирования, а в последние годы — и более глубокое функциональное диагностирование. Осуществление диагностирования при появлении защит на новых элементных базах (например, на интегральной микроэлектронике) с малой потребляемой мощностью облегчается по сравнению с применявшимися электромеханическими защитами. Для контроля функционирования защиты оказываются также полезными устройства, регистрирующие действие защит и выключателей; при этом следует учитывать (см. гл. 1), что, например, КЗ также осуществляют своеобразную проверку функционирования (срабатывания и излишнего срабатывания) защит. Повышению качества защит на новых элементных базах будут также способствовать внедряемые промышленностью программируемые стенды для технологического контроля выпускаемой продукции. Ряд перечисленных мероприятий должен не только обеспечить повышение уровня эксплуатации защит, но и создать условия для более продуктивной работы эксплуатационного персонала.

15.6. АВТОНОМНЫЕ И ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ ЗАЩИТЫ

Релейная защита электрических систем от КЗ принципиально может выполняться автономными и централизованными устройствами. *Автономные устройства* работают на базе информации, получаемой от данного защищаемого элемента системы, например участка линии, и действуют на его выключатели. *Централизованные устройства* работают на базе информации, получаемой от ряда элементов объекта (например, охватываемых главной схемой электрических соединений электрической станции или сетью в целом), и выдают сигналы на отключение необходимых выключателей.

Имеется ряд вариантов выполнения централизованных защит, разрабатывающихся как за рубежом, так и отечественными организациями. Число таких вариантов в последнее время возросло в связи с начавшимся использованием для осуществления защит микропроцессорной элементной базы. Так, например, разрабатывались централизованные защиты электроустановки в целом (элементов главной схемы электрических станций), отдельных частей главной схемы (линий одного из напряжений, блоков генератор — трансформатор и т. п.), а также электрической сети в целом (с охватом совокупности всех ее элементов). При этом не следует смешивать централизованные защиты с комплектными защитами, образованными совокупностью автономных защит.

При осуществлении централизованной защиты электроустановки от КЗ часто применяется принцип, разработанный еще в 30-е годы применительно к защите шин, при котором органы направления мощности (ОНМ), входящие в защиты всех элементов, присоединенных к шинам, используются не только в защитах этих элементов, но и в защите шин. При КЗ на элементах действуют ОНМ их защит (например, дистанционных или токовых направленных за-

щит нулевой последовательности линий); срабатывать при этом могут только те из них, в которых мощность КЗ в элементе направлена от шин. При КЗ на шинах ОНМ (при выполнении их с двусторонним действием) указывают направление мощности КЗ к шинам, обеспечивая их отключение. Таким образом, фиксация направления (знака) мощности КЗ или токов (при фиксации их полярности) дает возможность выявить место повреждения — на элементах, связывающих шины с сетью, или на последних. При этом необходимо учитывать, что полная мощность на указанных элементах, не имеющих генерирующих источников с противоположной стороны (питающих нагрузку), при КЗ на шинах оказывается направленной от шин, как при внешних КЗ, поэтому требуется соответствующая отстройка защиты от таких режимов. Проще обстоит дело при использовании ОНМ, включенных на аварийные слагающие, так как их составляющие, например, нулевой или обратной последовательности имеют мощности, всегда направленные от места КЗ соответственно к заземленным нейтралям сети или нейтралям генераторов и нагрузок любого вида.

При осуществлении централизованной защиты сети возникают дополнительные трудности, связанные прежде всего с необходимостью использования каналов связи как для передачи сигналов к централизованной защите от отдельных элементов сети, так и для передачи от нее команд на отключение поврежденных элементов.

Отечественные разработки централизованных защит на старых элементных базах исследовались в основном в УПИ (В. Е. Поляковым и др.). Трудности здесь возникали при выявлении поврежденного элемента электроустановки без применения автономных его защит. В настоящее время разработки проводятся в ряде организаций, главным образом на новой микропроцессорной элементной базе.

За рубежом значительные работы по выполнению централизованных защит с использованием ЭВМ были проведены в Великобритании.

В настоящее время в отечественной практике, как правило, применяется система построения защиты электрических систем с использованием автономных устройств. Централизованные системы пока нашли применение только в отдельных случаях. Более широкое применение они могут получить при использовании микропроцессорной элементной базы. Работы в этом направлении ведутся в ряде организаций.

15.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТ

Уже в самом начале 30-х годов стало очевидным, что проведение расчетов токов КЗ, необходимых для выбора параметров защит и проверки их чувствительности, аналитическим путем, с использованием простейших расчетных средств, требует недопустимо больших затрат времени, а иногда и просто затруднительно. Поэтому в ВЭИ Д. А. Городским были разработаны и выполнены первые универсальные расчетные столы постоянного тока, значительно ускорявшие производство работ; их отличительной особенностью являлся быстрый набор необходимой схемы системы в предположении однородности сопротивлений всех ее элементов. Вскоре в системах (например, Мосэнерго по разработке С. А. Ульянова) стали появляться индивидуализированные модели уже на переменном токе, предоставлявшие для эксплуатации бóльшие возможности. В настоящее время такие модели, значительно более совершенные, использующие преимущества современной микроэлектроники, успешно эксплуатируются в некоторых зарубежных энергосистемах (например, США и Японии). Ситуация резко изменилась в конце 50-х — начале 60-х годов, когда стали доступны для широкого использования ЭВМ. Они оказались основным средством для расчетов токов КЗ путем ориентирования прежде всего на мощные вычислительные машины (первые из которых разработаны в Советском Союзе С. А. Лебедевым) были созданы и внедрены в эксплуатацию программы расчетов токов КЗ, учитывающие большинство факторов, необходимых как при проектировании, так и при эксплуатации. Наиболее широкое применение получили при этом программы, разработанные в ИЭД АН УССР (В. А. Крыловым и др.) и Энергосетьпроекте (С. Б. Лосевым и др.), и модификации последних в вычислительном центре Мосэнерго. Однако использование этих программ в простых случаях вызывало некоторые затруднения. Эти затруднения были обусловлены принятым подходом к составлению программ, по которому от общего решения подходили к частным случаям. Новым направлением, начавшим получать за рубежом все большее признание, является создание так называемых «открытых программ» (см., например, [80]), при которых пользователь может, наоборот, осуществлять наращивание программ для более сложных случаев. Это направление требует оценки специалистов. Более сложным оказался вопрос автоматизации выбора

собственно параметров защит. К их выбору часто продолжают подходить, используя как первый этап автоматизации рассчитанные на ЭВМ токи КЗ. При этом полная автоматизация расчетов для защит с абсолютной селективностью особых затруднений не вызывает и начинает широко внедряться. Для защит с относительной селективностью вопрос оказался более сложным и пока окончательно не решенным, что определилось двумя тесно связанными между собой обстоятельствами: возможной многовариантностью целесообразных решений для ступеней защит с выдержкой времени (II — IV ступеней) и в связи с этим необходимостью использования последовательности расчетов с применением диалога машина — расчетчик. Положительные результаты при таком подходе достигнуты в Сибирском отделении ЭСП (М. Я. Ирлахманом и др.). К сожалению, учебной литературы, систематически излагающей все отмеченные вопросы (как расчетов токов КЗ, так и собственно выбора параметров защит), пока нет. Имеются только отдельные внутренние издания вузов, например ИЭИ (Е. А. Аржанников), МЭИ (кафедра РЗиА) и др., в которых освещаются некоторые вопросы расчетов с применением малых ЭВМ.

Заслуживает внимания использование для выбора параметров защит широкое применение персональных компьютеров.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните назначение УРОВ.
2. Какие два варианта повышения надежности схем УРОВ получили применение на практике?
3. Какие защиты называются дуговыми? Определите их область применения.
4. Какие защиты предусматриваются на обходных и шиносоединительных выключателях, а также секционных?
5. Поясните значение профилактического контроля, тестирования и функционального диагностирования в повышении надежности защит.
6. Какие защиты называются централизованными? Какова перспектива их применения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федосеев А. М.** Релейная защита электрнческих систем. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1952.
2. **Атабеков Г. И.** Теоретические осиовы релейиой защиты высоковольтных сетей. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957.
3. **Фабрикант В. Л.** Теория обмоток реле переменного тока. М. — Л.: Госэнергонздат, 1958.
4. **Фабрикант В. Л.** Основы теории построения измернтельиых органов релейиой защиты и автоматики. М.: Высшая школа, 1968.
5. **Фабрикант В. Л.** Фильтры симметричных составляющих. М.: Госэнергоиздат, 1962.
6. **Чернин А. Б.** Вычислеиие электрических величин и поведенне релейной защиты при неполнофазиых режимах в электрических системах. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963.
7. **Дроздов А. Д.** Электрические цепи с ферромагнитиыми сердечниками в релейной защите. — М.: Энергия, 1965.
8. **Сирота И. М.** Переходиые режимы работы траисформаторов тока. Киев. Изд-во АН УССР, 1961.
9. **Гельфанд Я. С.** Релейиая защита распределительных сетей. М.: Энергия, 1975.
10. **Федосеев А. М.** Релейиая защита электрических систем. М.: Энергия, 1976.
11. **Фабрикант В. Л.** Дистанциониая защита. М.: Высшая школа, 1978.
12. **Шнеерсон Э. М.** Динамика сложиых измерительиых органов релейиой защиты. М.: Эиергоиздат, 1981.
13. **Теоретические** осиовы построения логической части релейной защиты и автоматики/В. Е. Поляков, С. В. Жуков, Г. М. Проскурин и др. М.: Эиергия, 1979.
14. **Ванин В. К., Павлов Г. М.** Релейиая защита иа элементах аналоговой вычислительной техиики. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
15. **Шнеерсон Э. М.** Дистанционные защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986.
16. **Федосеев А. М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейиая защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984.

17. **Казанский В. Е.** Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматнкн. М.: Энергни, 1978.

18. **Warrington A. R., Van C.** Protective relouys, their theory and practice. London: Chapman and Hall, 1962, Vol. 2, 1966.

19. **Neugebauer H.** Selectivsehutz. Berlin: Verlag Springer, 1955.

20. **Смирнов Э. П., Федосеев А. М.** Об основных свойствах релейной защнты электроэнергетнческих систем от коротких замыканий. М., изд. МЭИ. 1974. Вып. 199. С. 3—8.

21. **Зейлидзон Е. Д., Смнрнов Э. П., Федосеев А. М.** Основные свойства релейной защиты от коротких замыкаиий электроэнергетических систем//Электричество. 1975. № 4. С. 1—7.

22. **Зейлидзон Е. Д.** О характере развития особо тяжелых системных аварнй//Доклады на III Всесоюзном научио-техническом совещанин по устойчнвостн н надежностн энергосистем СССР. Л.: Энергия. Леннигр. отд-нне. 1973. С. 49—55.

23. **Надежность** систем энергетики: Терминология. Вып. 95. М.: Наука, 1980.

24. **Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.** Математические методы в теорин надежностн. М.: Наука, 1965.

25. **Смнрнов Э. П.** Исследованне вопросов выбора критериев и моделей иадежностн релейной защнты н применение их в проектных задачах: Автореф. днс.... канд. техн. наук. М., 1970.

26. **Смирнов Э. П.** О критернях надежностн//Электричество. 1973. № 5. С. 24—28.

27. **Вавин Н. В.** О расчетной оценке надежностн релейной защнты//Электричество. 1982. № 8. С. 34—39.

28. **Мнкуцкий Г. В.** Каналы высокочастотной связи для релейной защнты и автоматики. — М.: Энергия, 1977.

29. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970.

30. **Веников В. А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1978.

31. **Лосев С. Б., Чернин А. Б.** Вычисление электрических величин в несимметричных режнмах электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1983.

32. **Руководящие** указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкання для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110—750 кВ. М.: Энергия, 1979. Вып. 11.

33. **Лосев С. Б., Чернин А. Б.** Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1972.

34. **Гетта Т. Г., Новелла В. Н.** Оценка примеиения методов оптимальной фильтрации в релейной защнте//Электричество. 1988. № 11. С. 51—55.

35. **Clemens H., Rothe K.** Relaisschutztechnik in Electroenergiesystemen. Berlin: Veb Verlag Technik, 1980.

36. **Руководящие** указания по релейной защите. **Токовая защита** нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—500 кВ. Расчеты. М.: Энергия, 1980. Вып. 12.

37. **Элементы** автоматических устройств/В. **Л. Фабрикант,** В. П. Глухов, Л. Б. Паперно и др. М.: Высшаи школа, 1981.

38. **Дорогунцев В. Г., Овчаренко Н. И.** Элементы автоматических устройств энергосистем. М.: Энергня, 1979.

39. **Реализацня** программных защнт на мнкропроцессорной элементной базе/В. П. Морозкнн, А. М. Федосеев, Ю. А. Барабанов, В. Н. Новелла//Электротехника. 1985. № 8. С. 55—59.

40. **Лейтес Л. В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.

41. **Трансформаторы** тока/В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др. Л.: Энергия. Леннигр. отд-нне, 1980.

42. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Расчеты допустнмых нагрузок в токовых цепях релейной защнты. М.: Энергии, 1980.

43. **Михайлов В. В.** Магнитоднэлектрикн в устройствах автоматики и релейной защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986.

44. **Казанский В. Е.** Измерительные преобразователн тока в релейной защите. М.: Энергоатомнздат, 1988.

45. **Лысеико Е. В.** Функцнональные элементы релейных устройств на интегральных мнкросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1983.

46. **Темкнна Р. В.** Измерительные органы релейной защиты на интегральных микросхемах. М.: Энергоатомнздат, 1985.

47. **Электротехнический** справочник. Т. 3. Кн. 1/Пронзводство и распределение электрнческой энергнн; Под общ. ред. проф. МЭИ. В. Г. Гераснмова и др. М.: Энергоатомиздат, 1988.

48. **Гельфанд Я. С.** Релейная защита распределительных сетей. — 2-е изд. М.: Энергоатомнздат, 1987.

49. **Гельфанд Я. С.** Выпрямнтельные блокн питания и зарядные устройства в схемах релейной защиты. М.: Энергоатомнздат, 1983.

50. **Zydanowicz Jozef.** Electroenergetyczna automatyka Zabezpieczeniowa. Warszawa: Naukowo-techniczne, 1966.

51. **Аржанников Е. А.** Дистанцнонный принцип в релейной защите и автоматнке лнний прн замыканнях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985.

52. **Гаевенко Ю. А.** Новые типы дистанцнонных защнт лнний электропередачи. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1955.

53. **Гроднев И. И., Курбатов М. Д.** Лннейные сооруження связи. М.: Связь, 1974.

54. **Левиуш А. И.** Высокочастотная защнта ВЛ 110—330 кВ. М., нзд. ВЗПИ, 1989.

55. **Левиуш А. И.** Высокочастотная защита ВЛ 500—750 кВ типа ПДЭ-2003. М., изд. ВЗПИ, 1986.

56. **Дроздов А. Д., Платонов В. В.** Реле дифференциальных защит элементов энергосистем. М.: Энергия, 1968.

57. **Релейная** защита и автоматика ВЛ сверхвысоких напряжений и мощных генераторов: Сб. научн. трудов/ВНИИЭ. М.: Энергоатомиздат, 1988.

58. **Сиротинский Л. И.** Техника высоких напряжений. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1945. Вып. III.

59. **Попов И. Н., Лачугин В. Ф., Соколова Г. В.** Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

60. **Сирота И. М.** Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. Киев: Наук. думка, 1983.

61. **Шабад М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.

62. **Ермоленко В. М., Козлов В. И., Красева В. Н.** Релейная защита и линейная автоматика линий электропередач высоких напряжений//Электротехника. 1985. № 8. С. 5—8.

63. **Кожин А. Н., Рубинчик В. А.** Релейная защита линий с ответвлениями. М.: Энергия, 1967.

64. **Кужеков С. Л., Синельников В. Я.** Защита шин электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1983.

65. **Вавин В. Н.** Релейная защита блоков турбогенератор — трансформатор. М.: Энергоиздат, 1982.

66. **Беркович М. А., Молчанов В. В., Семенов В. А.** Основы техники релейной защиты. М.: Энергоатомиздат, 1984.

67. **Иванов-Смоленский А. В.** Электрические машины. М.: Энергия, 1980.

68. **Марголин Н. Ф., Чернин А. Б.** Метод расчета токов при внутренних коротких замыканиях в синхронных генераторах. М. — Л., ОНТИ, 1937.

69. **Реле** защиты/В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов и др. М.: Энергия, 1976.

70. **Рубинчик В. А.** Резервирование отключения коротких замыканий в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1985.

71. **Засыпкин А. С.** Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

72. **Атабеков Г. И., Федосеев А. М.** Современная релейная защита. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1948.

73. **Павликов С. А., Поляков В. Е., Чечушков Г. А.** Релейная защита трансформаторов: Выбор и расчет газовой защиты (учебное пособие). Челябинск, изд. Челяб. политехн. ин-та, 1983.

74. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л. Г. Мамиконянца. М.: Энергоатомиздат, 1984.

75. **Корогодский В. И., Кужеков С. Л., Паперио Л. Б.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.

76. **Федосеев М. А.** Исследование и разработка защиты мощных синхронных генераторов от перегрузок токами обратной последовательности (Тр. ВНИИЭ). М.: Энергия, 1973. Вып. 42. С. 39—55.

77. **Гимоян Г. Г.** Релейная защита горных электроустановок. М.: Недра, 1978.

78. **Мамиконянц Л. Г.** Специальные вопросы электрических станций. М., изд. МЭИ, 1954.

79. **Слодарж М. И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М.: Энергия, 1977.

80. **Быстров В. П., Кимельман Л. Б.** О разработке комплекса программ расчета токов короткого замыкания//Электричество. 1988. № 8. С. 52—55.

81. **Электрические** цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите/А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужеков и др. М.: Энергоатомиздат, 1986.

82. **Федосеев М. А.** Технические требования и способ выполнения защиты мощных турбогенераторов от снижения изоляции цепи возбуждения: Снижение потерь электрической энергии в энергосистемах. М., изд. ВЗПИ, 1988.

83. **Шнеерсон Э. М., Федоров Э. К.** Дистанционный принцип защиты синхронных генераторов от асинхронных режимов//Электричество. 1989. № 6. С. 58—63.

84. **Смирнов Э. П.** Учет фактора надежности при определении приведенных затрат на электроэнергетический объект//Электричество. 1991. № 2. С. 16—22.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютно селективная защита 28, 35, 42—43
Аварийный режим 56
Аварийные слагающие напряжений и токов 56, 257, 264
— — электрических величин (принцип выделения) 180—181
Авария 9
Автономная защита 507—508
Алгебра логики 39, 41, 119—120
Апериодическая слагающая тока КЗ, влияние на ТА 154—158

Б

Безотказность 30
Ближнее резервирование 23, 496—500
Блокировка при качаниях 261, 263—268
Блокирующий сигнал 277
Броски намагничивающего тока трансформаторов и автотрансформаторов 105—107
Быстродействие 24
Быстрота срабатывания 27, 28

В

Виды каналов связи 46—48
Виды повреждений 59—60
двойное КЗ на землю 75—77
двухфазное КЗ на землю в сети с глухозаземленными нейтралями 70
— — — — — — — — изолированными нейтралями 70
КЗ между двумя фазами 67—70
однофазное замыкание на землю 87—89
— КЗ в сети с глухозаземленными нейтралями 71—75
разрыв двух фаз 83—84
— одной фазы 78—80
сложно несимметричные режимы 84—85
трехфазное КЗ в одной точке 65—67
Воздействующая величина 109
Время разброса 51
Выдержка времени ступени защиты 38, 39, 40
Высокочастотный канал связи 46—48, 277—279, 285
Вычислительная техника в релейной защите 135—142, 509—510

Г

Газовая защита 451—452
Газовое реле 453

Д

Дальнее резервирование 23, 496—500
Дискретные ТА 159, 162
Дистанционные защиты линий 232
выбор параметров 235—238
органы сопротивления 232
поведение при качаниях и асинхронных режимах работы 260—263
предотвращение ложного действия защит при нарушениях цепей напряжения 270—272
пусковые органы 269—270
устройства блокировки при качаниях 261, 263—268
— памяти 259
Дифференциальная токовая защита линий:
направленная 293, 320—325
поперечная 293, 320
продольная 293
— с ВЧ каналом или радиоканалом 313—314
— — проводным каналом 294—313
Дифференциально-фазная токовая защита с ВЧ блокировкой 314—320
Допущенные несрабатывания 23
— срабатывания 23
Дуговые защиты в КРУ 504—505
Защита асинхронных и синхронных двигателей:
виды повреждений и ненормальных режимов работы 477—480
дифференциальная токовая 489
минимальная напряжения (для асинхронных двигателей) 490
от асинхронного хода (для синхронных двигателей) 494—495
сверхтоки перегрузки 480—482
— при пониженных и последующих восстановленных напряжениях 482—486
— — разрыве фазы 489
токовая максимальная 488
— от симметричных перегрузок 492
Защита генераторов:
виды повреждений и ненормальных режимов работы 376—384
использующая соотношение токов неосиовных частот в фазах генератора 408—413
односистемная поперечная дифференциальная токовая 393—394
основанная на использовании гармоник, обусловленных несинусоидальностью ЭДС (для блочных генераторов) 401
от $K_3^{(1)}$ в одной точке цепи возбуждения 414, 415
— $K_3^{(1)}$ во второй точке цепи возбуждения 416
— однофазных замыканий на землю в обмотке статора 397—399
— перегрузок в цепи возбуждения 424
— потери возбуждения с использованием органа сопротивления 425—427
продольная дифференциальная токовая 385—390
— — — с включением ИО только на токи дифференциальной цепи и применением *TALT* усиленного действия 386—387
— — — — торможением от токов плеч 385—387
токовая от $K_3^{(1)}$ для генераторов, работающих на шины с *ТА* нулевой последовательности 403—404
— — несимметричных сверхтоков 420
— — симметричных сверхтоков 422
Защита линий:
6—10 кВ 343—344
20—35 кВ 344—345
110—220 кВ 345—346
от однофазных замыканий на землю 326—342
с ответвлениями, особенности 350—353
сверхвысоких напряжений 347—348
Защита трансформаторов (автотрансформаторов) и блоков:
без выключателей со стороны высшего напряжения 467—469
виды повреждений и ненормальные режимы работы 430—432
дифференциальная токовая 436
— — полупроводниковая с время-импульсной отстройкой и торможением 446
максимальная напряжения нулевой последовательности 472
токовая направленная нулевой последовательности 462—463
— нулевой последовательности с заземляющим проводом 456—457

— от внешних замыканий на землю с разземленной нейтралью 465
— — перегрузок 464
— с включением ИО на полные токи фаз 461
пуск устройства пожаротушения 471
Защита шин 354
дистанционная 360—362
дифференциальная токовая 362—372
направленная 359
токовая 357—359
Защитоспособность 26, 27
Защиты на обходных, шиносоединительных и секционных выключателях шин 505—506
Защищаемая зона 38
Зона каскадного действия 323

И

Излишние срабатываиия 24
Измерительная часть защиты 14, 109
Измерительные органы 14, 109
алгоритм срабатывания 111
анализ работы 112—118
максимальные 110
минимальные 110
область срабатывания 111
параметр срабатывания 110
схема сравнения 110
— формирования 110
характеристика 111
Изображения схем защит 107—108
Интегральные микросхемы 129—134
Источники оперативного тока 182—192

К

Каналы связи защиты:
высокочастотные 46—48
оптико-волоконные 45—46
радиоканалы 48—49
с вспомогательными проводами 44—45
Каскадное действие защит 205, 289
Качания 102
Классификация реле 12
Комбинированные отсечки по току и напряжению 214—215
Короткое замыкание 9
Коэффициент возврата 121, 198
— запуска 198
— компенсации 249
— неготовности несрабатывания 31
— — срабатывания 31
— отстройки 198
— полноты замыкания на землю 88
— схемы 198
— токораспределения 213
— торможеиия 304
— трансформации комплексный 65
— — трансформаторов напряжения 164
— — — тока 148
— чувствительности 29, 199
— — относительный 200

Л

Логическая часть защиты 14, 109
Логические интегральные схемы 133
— органы 14, 118
Ложные срабатывания 24

М

Магнитные зоиды 161
— измерительные преобразователи тока 161
Максимальные токовые защиты 195—201
— — — направленные 195, 202—207
Междуфазные напряжения 54—55
Метод ПХН 151
Микропроцессор 12, 120, 135, 137—138
Микропроцессориые защиты 12
МикроЭВМ 135
запоминающие устройства 138—140
представление информации 136—137
структурная схема 136
устройства ввода/вывода 140
Многопроцессорная вычислительная система 141
Мертвая зона 258, 259

Метод описания и анализа работы ИО:
аналитический 112—113
использования векторной алгебры 116—117
— комплексной плоскости 113—116
— плоскости U, I (ВАХ) 118
статистических испытаний (моделирования) 117

Н

Надежность 24, 26—27, 30—35
безотказность 30
долговечность 30
коэффициенты иеготовности 31
отказы работоспособности 31
— функционирования 31
параметр потока ложных срабатываний 31
ремонтопригодность 30
Намагничивающий ток трансформаторов тока 148
Направленные защиты:
с ВЧ блокировкой 278—286
— — — — схема с пуском от ненаправленного ПО 280—283
— — — — — — — — ОН М 283—285
— косвенным сравнеинем электрических величнн поперечные 288—292
— — — — — — продольные 277—288
сочетание с дистанционной защитой 286—287
Ненормальные режимы работы 9, 101—107
Неселективиая защита 35, 43—44
— — в сочетании с устройством АПВ 35, 44

О

Область несрабатывания 111
— срабатывания 111
Оперативный переменный ток 185—191
схема с дешунтированием катушки отключения 186—187
— — блоками питания 187—190
— — предварительно заряженными конденсаторами 190—191
— — реле прямого действия 191
Оперативный постоянный ток 183—185
Операционные усилители 129—133
Определенне электрических величин при повреждениях 55
Оптико-волоконный канал 45—46
Оптико-электрониые ТА 159—160
Орган направления мощности 193, 223—231
полярность обмоток 228
принципы включения 228—231
характеристики 225—228
Органы защиты 109
измерительные 14, 109
логические 118
Органы сопротивления:
воздействующие напряжения и токи 247—253
компенсированные напряжения 251
мертвая зона 244
— — устранение 244, 500—504
многофазные для работы при всех $K^{(1)}$ 253—254
— — — — многофазных КЗ 256—257
— и пофазные, построенные на использовании только аварийных слагающих напряжений и токов 257—258
односистемные (многофазные) 258
пофазные для работы при КЗ на землю 254—256
Особенности защиты блоков генератор — трансформатор (автотрансформатор) 473—474
Отказ работоспособности 31
Отказы функционирования
излишние срабатывания 24
ложные срабатывания 24
Отключающий сигнал 348—350
Относительно селективная защита 28, 35, 30—42

П

Параметр срабатывания 110
Первичные измерительные преобразователи:
напряжения см. Трансформа-

торы напряжения тока 143—162
электромагнитные см. Трансформаторы тока
Перегрузки 9
Переходные сопротивления 59—63
Положительные направления 51—54
Поперечная дифференциальная токовая направленная защита линий 293, 320—325
Принцип наложения 55
Программные защиты 12, 136
Процент правильных действий 34
Пусковой ток электродвигателя 488
Пусковые органы дистанционной защиты 269—270

Р

Работоспособность 31
Разрешающий сигнал 277
Резервирование 23, 496—500
Реле 11
Релейная защита:
классификация свойств 24—25
назначение дополнительное 10
— основное 10
основная 23
резервная 23
с абсолютной селективностью 28, 35, 42—43
— относительной селективностью 28, 35, 30—42

С

Сверхтоки 101
Селективность 24, 25, 26—28
абсолютная 28, 42
относительная 28, 36
Сигналы блокирующие 277, 288, 313, 352
— отключающие 353
— разрешающие 277, 278, 313
Симметричные составляющие 57
Совершенный трансформатор 144—145
Схемы сравнения 110
— формирования 110

Т

Телеотключение 348—350
Техника релейной защиты 12
Техническое совершенство 25, 26, 33
Ток возврата 196
— компенсации 249
— небаланса 172
— срабатывания 194, 195
Токи самозапуска 107
Токовые отсечки 208, 209, 210, 211
Токовые и токовые направленные защиты линий, включаемые на полные токи и напряжения фаз 193—216
вторая ступень 208, 212—214
первая ступень 208—211
дополнительные органы напряжения 214—215
Токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности сетей с глухозаземленными нейтралями 216—223
выбор параметров срабатывания 218
вторая ступень 218
первая ступень 218
последняя 218
Токовые защиты обратной последовательности:
генераторов 381, 418—422
трансформаторов 461—462
Трансреакторы 159, 160—161
Трансформаторы напряжения:
емкостные 162—165
ПИН 162
погрешности 164, 165
схемы соединений с цепями напряжения ИО 171—175
электромагнитные 162—165
Трансформаторы тока 143, 162—167
векторная диаграмма 147—148
допустимые нагрузки дискретные 159—162
коэффициент приведения 145
— трансформации 145
кратность первичного тока 149
— — — предельная 150
магнитные зонды 159, 161
магнитный ИП тока 161
оптико-электронные 159, 160
работа в переходных режимах 154—158
— при глубоких насыщениях 151—154
схемы соединений с цепями тока ИО 168—173
трансреакторы 159—161
условные положительные направления токов 147
электромагнитные 158—159

У

Уравнительные токи при качаниях 102
Устойчивость функционирования 25, 28—29
Устройство ввода — вывода 140
— памяти 244, 259
— резервирования при отказе выключателей (УРОВ) 36, 500—504

Ф

Фазные напряжения 55
Фильтры напряжений нулевой последовательности 177, 337
— — обратной последовательности 177—179
— токов нулевой последовательности 177, 335—337
— — обратной последовательности 179—180
Функционирование релейной защиты 23—35
надежность 25, 26—27, 30—35
отказы 23—24
устойчивость 25, 26—27, 28—30

Х

Характеристики органов:
направления мощности 225—228
сопротивления 239—247
Характеристическая величина 109

Ц

Централизованная защита 507—508

Ч

Чувствительность 24, 26, 29

Э

Элементная база органов защиты 12, 109, 120
микропроцессорная 12, 16, 109, 135—142
полупроводниковая 16, 109, 128—134
электромеханическая 16, 109, 120—128
Эффективность функционирования 24—27
быстрота срабатывания 27, 28
защитоспособность 26, 27
коэффициент чувствительности 29
надежность 24—27, 30—35
селективность 24, 25, 26—28
техническое совершенство 25, 26, 33
устойчивость функционирования 25—27, 28—30

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму издаиию 5

Основные принятые сокращения 7

Введение 9

В.1. Назначение релейной защиты 9
В.2. Развитие техники релейиой защиты 15

Глава первая. **Общие вопросы релейной защиты** . . . 22

1.1. Функции релейной защиты от коротких замыканий и основные требования, предъявляемые к ее свойствам 22
1.2. Принципы выполнения релейной защиты и некоторые общие положения и соотношеиия, используемые при ее осуществлении 35
1.3. Виды каналов связи 44
1.4. Методы и подходы, применяемые к анализу, синтезу защит и выбору их параметров срабатывания . . . 49
1.5. Некоторые общие соотношения электрических величин, используемые в защите 51
1.6. Виды повреждений и требоваиия, предъявляемые к релейной защите от этих повреждений 59
1.7. Виды ненормальных режимов работы и требования к защите, на них реагирующей 101
1.8. Описание и изображение схем защит 107

Глава вторая. **Органы защиты и их элементные базы** . . 109

2.1. Органы защиты и их свойства 109
2.2. Методы описаиия и анализа работы ИО 112
2.3. Свойства логических органов 118
2.4. Особеииости использоваиия электромеханической элементной базы 120
2.5. Особеииости использования полупроводниковой (микроэлектронной) элемеитной базы 128
2.6. Особеииости использоваиия микропроцессорной элементной базы 135

Глава третья. **Первичные измерительные преобразователи и их схемы соединений с нагрузкой** 143

3.1. Назначение и общие принципы работы 143
3.2. Измерительные преобразователи тока и их работа в установившихся режимах 146
3.3. Работа ИП тока в переходиых режимах 154
3.4. Особеииости выполнения ИП тока 158
3.5. Измерительные преобразователи напряжения и их работа в установившихся режимах 162
3.6. Работа ИП напряжения в переходных режимах . . 165
3.7. Схемы соединиений ИП и цепей устройств защиты . . 167
3.8. Схемы соединений *ТА* и цепей тока измерительных органов, включаемых на полные токи фаз 168
3.9. Схемы соединеиий *ТА* и цепей тока измерительных органов для включения на составляющие токов нулевой последовательности 171
3.10. Определение допустимых нагрузок на ИП тока . . 173
3.11. Схемы соединеиий ИП напряжения и цепей напряжения измерительных органов 175
3.12. Осуществление фильтров напряжения и тока разных последовательиостей 177
3.13. Принцип выделения аварийных слагающих . . . 180
3.14. Места включения ИП тока и напряжения иа электроустаиовках 181

Глава четвертая. **Источники оперативного тока** . . . 182

4.1. Осиовиые определения 182
4.2. Оперативиый постоянный ток 183
4.3. Оперативный переменный ток 185
4.4. Источники оперативиого тока защит, использующих полупроводииковую (интегральной микроэлектроники) элемеитиую базу 191
4.5. Управление приводами отключения выключателей . . 192

Глава пятая. **Токовые и токовые направленные защиты** . 193

5.1. Общие соображения по токовым и токовым направленным защитам 193
5.2. Максимальные токовые защиты 195
5.3. Максимальные токовые направлеиные защиты . . . 201
5.4. Первые и вторые ступени токовых и токовых направленных защит, включаемых на полные токи и напряжения фаз 208
5.5. Выбор параметров первой ступени защиты, ее защитоспособность и чувствительность 208
5.6. Выбор параметров второй ступеии защиты, ее защитоспособность и чувствительность 212
5.7. Введение в токовые и токовые иаправленные защиты дополнительных органов напряжения 214
5.8. Общая оценка токовых и токовых направлениых защит, включаемых на полные токи и напряжения фаз 216
5.9. Токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности сетей с глухозаземленными нейтралями 216
5.10. Органы направления мощности и схемы их включения иа напряжения и токи 223

Глава шестая. **Дистанционные защиты** 232

6.1. Общие вопросы по дистанциониым защитам . . . 232
6.2. Выбор параметров защиты 235
6.3. Характеристики органов сопротивления 239
6.4. Характеристики $Z_{с,р}=f(\varphi_р)$ органов сопротивления с двумя воздействующими величинами 242

6.5. Воздействующие напряжения и токи измерительных органов сопротивления 247
6.6. Принципы выполнения органов сопротивления . . . 253
6.7. Мероприятия по устранению мертвых зон у органов сопротивления 258
6.8. Поведение дистанционных защит при качаниях и асинхронных режимах работы 260
6.9. Использование комплексной плоскости для анализа поведения органов сопротивления при качаниях . . . 261
6.10. Принципы выполнения устройств, предотвращающих ложные и излишние срабатывания защит при качаниях 263
6.11. Устройства, включающие защиту при появлении аварийных слагающих на время, достаточное для ее срабатывания 264
6.12. Устройства, отключающие защиту при качаниях, с двумя ПО разной чувствительности 268
6.13. Пусковые органы дистанционных защит 269
6.14. Предотвращение ложного действия защит при нарушениях их цепей напряжения 270
6.15. Общая оценка и области применения дистанционных защит 273

Глава седьмая. **Токовые и направленные защиты с косвенным сравнением электрических величин** 275

7.1. Способы выполнения защит 275
7.2. Токовые продольные защиты с блокировкой . . . 275
7.3. Принципы выполнения направленных продольных защит 277
7.4. Направленные защиты с ВЧ блокировкой 278
7.5. Принципы действия схем направленных защит с ВЧ блокировкой 280
7.6. Сочетание дистанционных защит с направленными продольными 286
7.7. Выполнение новой направленной защиты с ВЧ блокировкой, выпускаемой промышленностью 287
7.8. Принцип работы направленных поперечных защит . 288
7.9. Направленная поперечная защита нулевой последовательности двух параллельных цепей 289

Глава восьмая. **Дифференциальные токовые и токовые направленные защиты** 293

8.1. Способы выполнения защит 293
8.2. Принцип действия продольной дифференциальной токовой защиты с проводным каналом 294
8.3. Ток небаланса, ток срабатывания и чувствительность продольной защиты с проводным каналом 297
8.4. Способы повышения чувствительности и отстроенности продольной защиты с проводным каналом 301
8.5. Выполнение продольных дифференциальных токовых защит с проводным каналом 308
8.6. Продольные дифференциальные токовые защиты с ВЧ каналами и радиоканалами 313
8.7. Дифференциально-фазная токовая защита с ВЧ блокировкой, разработанная ВНИИЭ 314

8.8. Применение поперечных дифференциальных токовых и токовых направлениных защит 320
8.9. Поперечные дифференциальные токовые направленные защиты 320
8.10. Общая оценка использования дифференциальных защит для линий 325

Глава девятая. **Защита линий от однофазных замыканий на землю** 326

9.1. Требования к защите 326
9.2. Электрические величины, используемые для действия защиты 328
9.3. Фильтры токов и напряжений нулевой последовательности 335
9.4. Используемые принципы выполнения защит от $K_3^{(1)}$ . . 338

Глава десятая. **Выбор принципов защит линий** . . . 342

10.1. Общие вопросы выполнения защит 342
10.2. Защиты линий 6—10 кВ 343
10.3. Защиты линий 20 и 35 кВ 344
10.4. Защита линий 110—220 кВ 345
10.5. Защита линий сверхвысоких напряжений 347
10.6. Использование телеотключений 348
10.7. Особенности защит линий с ответвлениями . . . 350

Глава одиннадцатая. **Защита шин станций и подстанций** 354

11.1. Виды повреждений и требования к защите . . . 354
11.2. Способы осуществления и виды защит 355
11.3. Токовые защиты 357
11.4. Направленные защиты 359
11.5. Дистанционные защиты 360
11.6. Общие вопросы осуществления дифференциальных токовых защит 362
11.7. Защита одиночной системы шин с торможением на выпрямленных токах 364
11.8. Особенности выполнения дифференциальной токовой защиты шин, работающих с фиксированным присоединением элементов с одним выключателем 368
11.9. Неполные дифференциальные защиты 371

Глава двенадцатая. **Защита синхронных генераторов** 373

12.1. Общие положения 373
12.2. Основные виды повреждений и ненормальных режимов работы генераторов и требования к защитам . . . 376
12.3. Типы применяемых защит 384
12.4. Продольные дифференциальные токовые защиты . . 385
12.5. **Способы выполнения защиты от витковых КЗ** . . . 391
12.6. Односистемная поперечная дифференциальная токовая защита 393
12.7. Защиты от однофазных замыканий на землю . . . 395
12.8. Максимальная защита напряжения нулевой последовательности промышленной частоты 397
12.9. Защиты от $K_3^{(1)}$, основанные на сравнении гармоник нулевой последовательности, определяемых несинусоидальностью ЭДС генераторов 399

12.10. Защита от $K_з^{(1)}$ блочных генераторов, использующая несинусоидальность ЭДС генераторов и выполнеиная по разработке ВНИИЭ 401
12.11. Способ выполнения защит от $K_з^{(1)}$ генераторов, работающих на шины 402
12.12. Токовая защита с *ТА* нулевой последовательности, имеющим подмагничивание 402
12.13. Защита от $K_з^{(1)}$, исподьзующая соотношение токов неосновных частот в фазах генератора 408
12.14. Защиты от повреждеиий в цепях возбуждения . . 414
12.15. Токовые защиты от несимметричных сверхтоков . . 418
12.16. Защиты от симметричных сверхтоков 422
12.17. Защиты от перегрузок, осуществляемые в цепи возбуждения 424
12.18. Защита от потери возбуждения 425
12.19. Способы гашения магнитного поля генераторов . . 427
12.20. Особенности защиты синхронных компенсаторов . . 428

Глава тринадцатая. **Защита трансформаторов, автотрансформаторов и блоков** 429
13.1. Общие положения 429
13.2. Внутренние КЗ и требования к защнтам 431
13.3. Ненормальные режимы работы и требования к защите 432
13.4. Основные тнпы применяемых защит 434
13.5. Дифференциальные токовые защиты 435
13.6. Дифференциальиая токовая защита с комплексной отстройкой от токов небаланса 446
13.7. Особенности дифференциальных токовых защит с числом групп *ТА* больше двух 448
13.8. Газовая защита 451
13.9. Токовая защита нулевой последовательности с заземляющим проводом 456
13.10. Комплексные защиты трансформаторов иебольшой мощности 457
13.11. Защиты от внешних КЗ 459
13.12. Токовые защиты от перегрузок 464
13.13. Резервные защиты трансформаторов от внешних замыканий иа землю в аварийном режиме с разземленной нейтралью 465
13.14. Особеиности защит при наличии устройств для продольного регулирования напряжения под иагрузкой 466
13.15. Особенности защиты трансформаторов (автотрансформаторов) без выключателей со стороны высшего напряжения 467
13.16. Дополнительные устройства 470
13.17. Особенности защит блоков генератор — траисформатор (автотрансформатор) 473

Глава четырнадцатая. **Защита асинхроиных и синхроиных двигателей** 476
14.1. Общие соображения о повышении эффективиости противоаварийной автоматики потребителей 476
14.2. Виды повреждений и ненормальных режимов работы н требования, предъявляемые к защите 477
14.3. Типы защит двигателей 487
14.4. Примеры выполнения защит 487

Глава пятнадцатая. **Специальные вопросы защиты электрических систем** 496
15.1. Резервирование 496
15.2. Устройства резервирования при отказе выключателей (УРОВ) 500
15.3. Дуговые защиты в КРУ 504
15.4. Защиты на обходных, шиносоединительных и секционных выключателях шин 505
15.5. Контроль работоспособности, фуикциоиальиого состояния устройств защит и их обслуживание 506
15.6. Автоиомные и централизованные защиты 507
15.7. Автоматизация выбора параметров защит 509

Список литературы 511

Предметный указатель 516

Учебное издание

Федосеев Алексей Михайлович
Федосеев Михаил Алексеевич

Релейная защита электроэнергетических систем

Редактор *Л. Л. Жданова*
Художественные редакторы *В. А. Гозак-Хозак, Т. Н. Хромова*
Техинческий редактор *Г. С. Соловьева*
Корректор *Л. А. Гладкова*
ИБ № 1972

Сдано в набор 20.09.91. Подписано в печать 15.01.92. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературиая. Печать высокая. Усл. печ. л. 27,72. Усл. кр.-отт. 27,93. Уч.-изд. л. 29,72. Тираж 3500 экз. Заказ № 855. С 081

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Изготовлено в книжной типографии Министерства печати и информацни России.
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7