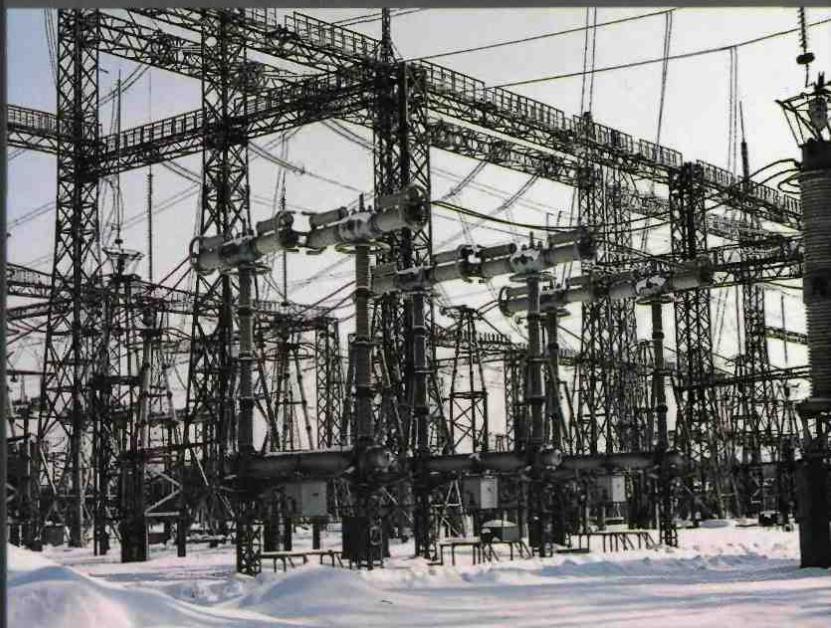


Э.М. ШНЕЕРСОН

---

# Цифровая релейная защита



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

Ш76

**Шнеерсон Э.М.**

**Ш76** Цифровая релейная защита. — М.: Энергоатомиздат, 2007.  
549 с.: ил.

ISBN 978-5-283-03256-6

Описаны и систематизированы основные элементы, связанные с построением ЦРЗ и особенностями ее применения. Рассматриваются основные структуры ЦРЗ; алгоритмы и свойства цифровых измерительных органов; построение основных функций ЦРЗ (токовые, токовые направленные, дифференциальные, дистанционные и др.); особенности выполнения ЦРЗ отдельных объектов энергосистем (ВЛ, трансформаторов, генераторов, электродвигателей); вопросы интеграции ЦРЗ в общую структуру управления энергосистемой, а также вопросы обеспечения эксплуатационной эффективности ЦРЗ, связанные с ее применением, проектированием и эксплуатацией.

Для инженерно-технического персонала, связанного как с проектированием и обслуживанием, так и с разработкой устройств ЦРЗ.

ISBN 978-5-283-03256-6

© Автор, 2007

## Предисловие

В релейной защите в последнее десятилетие произошли качественные изменения, вызванные широким использованием цифровой (микропроцессорной) техники. Указанное обусловлено, в первую очередь, существенными преимуществами релейной защиты на микропроцессорной основе по сравнению с электро-механической и электронной релейной защитой. Эти преимущества заключаются, прежде всего, в следующем:

- повышении аппаратной надежности, уменьшении массы и габаритов устройств, благодаря существенному уменьшению числа используемых блоков и соединений (одно микропроцессорное устройство выполняет обычно различные защитные функции, для реализации которых ранее требовалось несколько устройств);
- существенном повышении удобства обслуживания и возможности сокращения обслуживающего персонала;
- расширении и улучшении качества защитных функций (чувствительности, селективности, статической и динамической устойчивости функционирования);
- возможности непосредственной регистрации процессов и событий и анализа возникших в энергосистеме повреждений;
- принципиально новых возможностях управления защитой и передачи от нее информации на географически удаленные уровни управления;
- технологичности производства.

Принципы построения и алгоритмы, используемые в цифровой релейной защите (ЦРЗ), во многом отличаются от применяемых в электро-механических и электронных релейных защитах, ввиду существенно различающихся технической основы и способов обработки информации. Новые возможности цифровой обработки сигналов и обмена информацией, позволяют реализовать целый ряд защитных функций, которые невозможно было осуществить ранее.

Все это делает возможным повышение эффективности релейной защиты при применении цифровых устройств, благодаря более полному учету повреждений в энергосистеме, большей долговечности и меньшим затратам на обслуживание, прежде всего периодическое, вследствие возможности увеличения сроков между проверками и отсутствия необходимости ревизии каких-либо механических элементов.

Однако указанное повышение эффективности может быть достигнуто лишь при правильном понимании и применении функций цифровой релейной защиты, и в первую очередь функций сложных защит. Это обусловлено тем, что ЦРЗ обладает рядом существенных особенностей по сравнению с предыдущими поколениями устройств релейной защиты. Указанное относится, прежде всего, к самой структуре построения ЦРЗ, где не существует физических блоков, соответствующих отдельным защитным функциям. Это определяет необходимость изменения подхода и к проверке ЦРЗ: подведением определенных комбинаций входных величин следует убедиться не только в действии проверяемых функций, но и в недействии других функций.

Другим моментом является существенное увеличение в цифровых защитах числа параметров, установка которых производится пользователем, и наличие в сложных защитах большого числа сообщений различного вида.

Это в определенной степени усложняет обслуживание и требует наличия квалифицированного персонала.

Как показывает статистика, общий процент неправильных действий ЦРЗ особенно сложных устройств в начальный период эксплуатации не снижается по сравнению с электромеханическими и статическими устройствами защитами, а в некоторых случаях даже возрастает. Это определяется не отказами аппаратуры, а, в первую очередь, ошибками при проектировании и обслуживании, связанными с неправильным использованием отдельных функций защит, ошибками при выборе и установке их параметров и уставок. Эффективным средством снижения ошибок является использование программ расчета уставок и автоматизированных средств проверки. Важным также является обеспечение допустимой электромагнитной обстановки на объекте для снижения влияния помех и исключения возможности повреждения ЦРЗ. Таким образом, реальная эксплуатационная эффективность ЦРЗ (см. гл. 11), может быть до-

стигнута лишь при правильном использовании ее функций и грамотной эксплуатации, что обуславливает необходимость соответствующей подготовки проектирующего и эксплуатационного персонала энергосистем.

Цель данной книги — систематизировать основные вопросы построения современных цифровых релейных защит, описать их основные функции и характеристики, а также рассмотреть вопросы, затрагивающие их проектирование и эксплуатацию.

Практически невозможно в одной книге охватить многообразие возможных реализаций функций цифровой релейной защиты. С учетом этого, для иллюстрации рассматриваемых принципов в данной книге во многих случаях используются решения фирмы «Siemens», где в последнее время работал автор.

В книге уделено также внимание описанию «классических» принципов релейной защиты (токовой, токовой направленной, дистанционной и др.), которые в полном объеме и с определенными расширениями используются и в ЦРЗ. Это позволило в необходимых случаях иметь полноценное описание функций цифровых устройств.

Автор признателен своей жене Тамаре за понимание и поддержку при написании этой книги. С благодарностью будут приняты замечания и пожелания, которые следует направлять по адресу: 107031, Москва, ул. Рождественка, д. 5/7, ОАО издательство «Энергоатомиздат»

*Автор*

## Список сокращений

АПВ	— автоматическое повторное включение
АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
ДЗ	— дистанционная защита
ДО	— дистанционный измерительный орган
ЕТН	— емкостной трансформатор напряжения
КЗ	— короткое замыкание
МП	— микропроцессор
МТЗ	— максимальная токовая защита
ПК	— персональный компьютер
ПО	— пусковой орган
РЗ	— релейная защита
ТН	— измерительный трансформатор напряжения
ТТ	— измерительный трансформатор тока
УРЗ	— устройство релейной защиты
УРОВ	— устройство резервирования отката выключателя
ФМП	— фиксация места повреждения
ХС	— характеристика срабатывания
ЦИО	— цифровой измерительный орган
ЦРЗ	— цифровая релейная защита
ЦФ	— цифровой фильтр
ЭМС	— электромагнитная совместимость
ЭС	— электроэнергетическая система

## Глава 1

# Принципы построения релейной защиты

### 1.1. Назначение релейной защиты

Производство, распределение и потребление электрической энергии обеспечивается совокупностью элементов — генераторов, трансформаторов, воздушных линий электропередачи, кабелей, электрических двигателей, нагревательных приборов и т. д., называемых электроэнергетической системой (ЭС).

В процессе функционирования ЭС могут возникать повреждения, чаще всего короткие замыкания (КЗ), сопровождаемые увеличением токов через отдельные элементы ЭС. Без принятия специальных мер эти режимы могут привести к повреждению элементов ЭС и нарушению электроснабжения. В соответствии с Международным стандартом «Защита энергетических систем» IEC 50 (448) [1] «защитой является совокупность устройств, предназначенных для обнаружения повреждений или других аномальных режимов в энергосистеме, отключения повреждения, прекращения аномальных режимов и подачи команд или сигналов». Одним из важнейших элементов защиты являются *измерительные реле*, которые реагируют на значения контролируемых (измеряемых) параметров ЭС. *Устройством защиты* является устройство, состоящее в общем случае из совокупности отдельных измерительных реле и логических элементов, предназначенных для выполнения предусмотренных функций при возникновении повреждений в ЭС.

### 1.2. Структура РЗ и используемая информация

Релейную защиту можно рассматривать как управляющую систему, которая в общем случае получает информацию о токах, напряжениях и состоянии коммутационных элементов в отдельных пунктах ЭС. В результате обработки этой информации РЗ вырабатывает управляющие сигналы для выключателей (команды отключения или включения), а также различные сообщения,

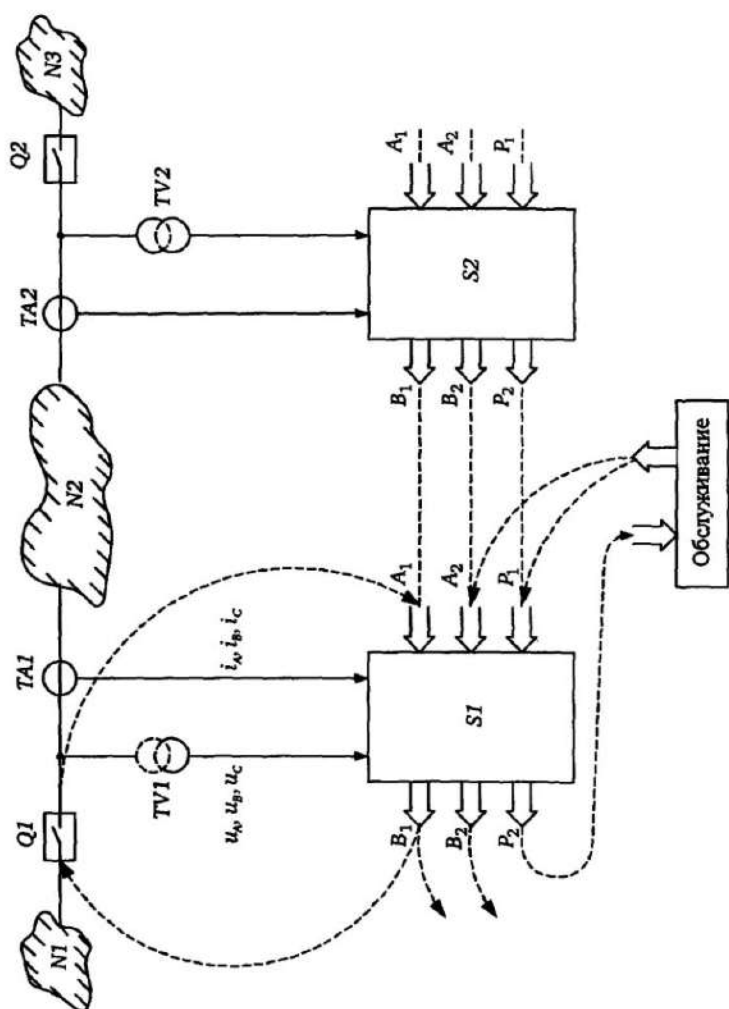


Рис. 1.1. Потоки информации, используемые в ЦРЗ



позволяющие фиксировать или анализировать процессы, протекающие в ЭС, и функционирование самой РЗ.

Потоки информации, используемые в общем случае в ЦРЗ, показаны на рис. 1.1, где  $N1, N2, N3$  — части электрической системы;  $Q1, Q2$  — силовые выключатели;  $TA1, TA2$  — высоковольтные измерительные трансформаторы тока;  $TV1, TV2$  — высоковольтные измерительные трансформаторы напряжения;  $S1, S2$  — устройства релейной защиты.

*Входная информация*, которую получает ЦРЗ, может в общем случае содержать следующие составляющие:

- аналоговые сигналы, характеризующие контролируемые величины ЭС. К ним, в частности, могут относиться:

токи  $i_A, i_B, i_C$ , напряжения  $u_A, u_B, u_C$  и зависящие от них величины в месте установки защиты и, в общем случае, в других местах ЭС, например, на другом конце линии;

непрерывные (аналоговые) величины, пропорциональные температуре объекта или окружающей среды, давлению и т.п.;

- $A_1$  — входная дискретная (бинарная) информация (0/1), в том числе сигналы от коммутационных аппаратов, других устройств РЗ и от обслуживающего персонала;

- $A_2$  — цифровая информация от других устройств РЗ, характеризующая как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы, получаемые посредством цифровых коммуникационных интерфейсов;

- $P_1$  — управление уставками и параметрами ЦРЗ, осуществляемое обслуживающим персоналом или системами управления через коммуникационный интерфейс.

*Выходная информация* ЦРЗ может быть представлена следующим образом:

- $B_1$  — выходная дискретная информация (логические сигналы к другим защитам и на отключение выключателей);

- $B_2$  — цифровая информация к другим устройствам (характеризующая в общем случае как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы), получаемая посредством цифровых коммуникационных интерфейсов;

- $P_2$  — сообщения различных видов, в том числе логические выходные сигналы и цифровые данные:

визуальное наблюдение, запись измеряемых защитой аналоговых величин (токов, напряжений, мощности и т.п.) в нормальном и аварийном режимах;

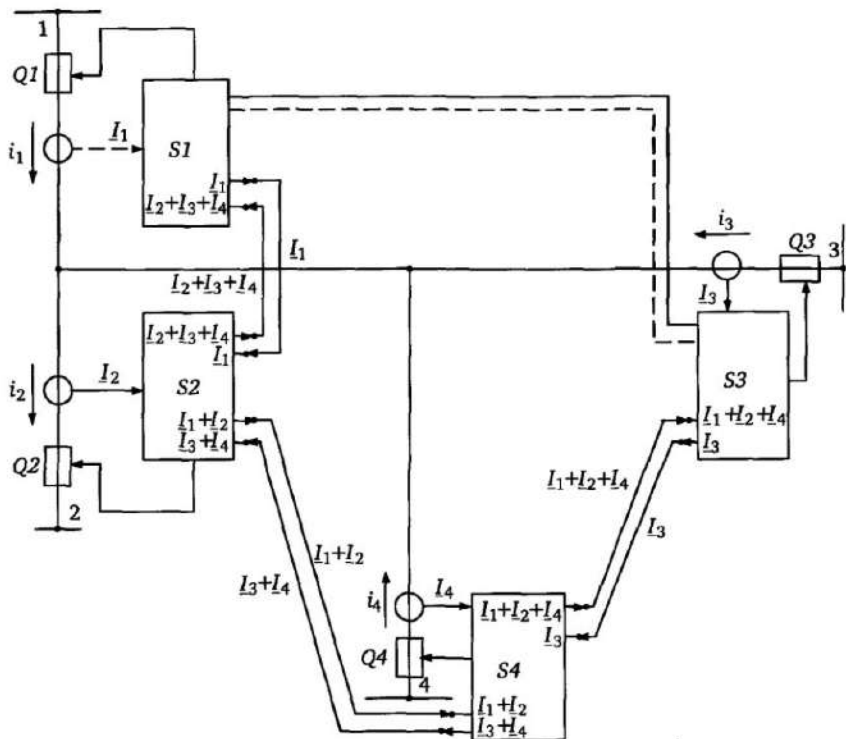


Рис. 1.2. Принцип функционирования цифровой дифференциальной защиты линий фирмы «Siemens»

фиксация текущего состояния защиты, параметров и уставок, в том числе готовности защиты к действию; запись и передача сообщений (протоколов) в аварийных режимах.

В качестве примера ЦРЗ с использованием обмена цифровой информацией о контролируемых аналоговых величинах на рис. 1.2 показан принцип функционирования цифровой дифференциальной защиты линий фирмы «Siemens» [9].

К защитам  $S1$ — $S4$ , установленным по концам защищаемой линии, подводятся соответственно четыре трехфазных тока  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ . Принцип действия дифференциальной защиты основан на том, что при КЗ вне защищаемой линии геометрическая сумма токов  $\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$  равна нулю, а при КЗ внутри защищаемой зоны  $\Sigma I$  существенно больше нуля. С учетом этого каждая защита  $S1$ — $S4$  должна контролировать значение  $\Sigma I$ . Это

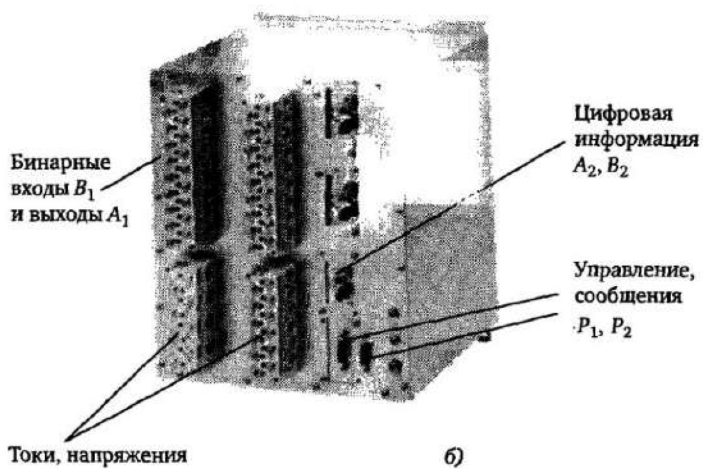
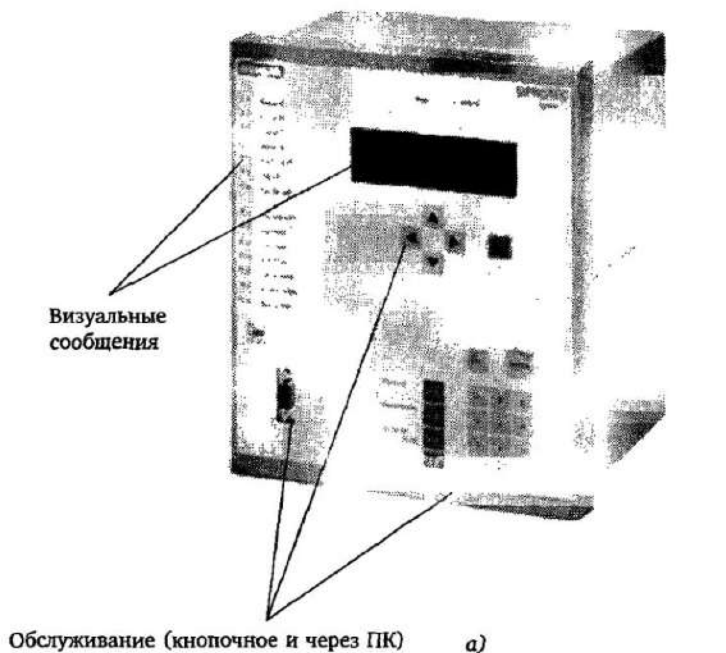


Рис. 1.3. Защита типа 7SD5:  
а — вид спереди; б — вид сзади

достигается тем, что каждая защита, например  $S1$ , не только измеряет ток в месте своей установки ( $I_1$ ), но и передает эту информацию в непрерывной цифровой форме по волоконно-оптическим каналам связи к другим, смежным с ней защитами. При этом передаваться могут и одиночные, и суммарные значения токов. В результате каждая защита  $S1—S4$  контролирует параметр  $\Sigma I$ , что обеспечивает правильное функционирование всей системы РЗ. На рис. 1.3 приведены фотографии защиты 7SD5 и отмечены места ввода (вывода) информации в соответствии с рис. 1.1.

Входная аналоговая информация от измерительных трансформаторов тока и напряжения подводится к клеммам на задней стороне устройства (рис. 1.3,б). Через специальные разъемы для подсоединения волоконно-оптических кабелей происходит обмен непрерывной цифровой информацией  $A_2, B_2$  между устройствами о текущих значениях векторов токов и суммы токов. Соединения на задней стороне устройства обеспечивают также обмен информацией с пользователем и другими объектами (логические сигналы  $A_1, B_1$ , сообщения, параметры и уставки).

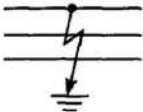
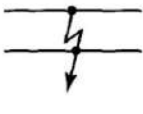
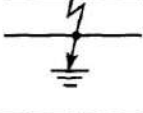


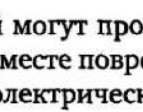
На лицевой плате устройства установлены элементы визуальной сигнализации (светодиоды и дисплей) и различные кнопки для ввода параметров и уставок. Тут же располагается и разъем для подключения персонального компьютера (ПК) для ввода параметров и уставок и вывода сообщений различного вида.

### 1.3. Виды повреждений

Основным видом повреждений в ЭС являются повреждения изоляции — короткие замыкания и замыкания на землю (в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью) — табл. 1.1.

Однофазные КЗ и замыкания на землю составляют 80—90% всех повреждений. Возможны и более сложные повреждения. Например, при обрыве одной фазы линии упавший конец провода вызывает появление однофазного КЗ или замыкания на землю одновременно с разрывом фазы. Частота возникновения повреждений зависит от уровня номинального напряжения сети, способа прокладки линии и состава грунта, наличия грозозащитных тросов и разрядников, а также от погодных условий.

Таблица 1.1. Основные виды повреждений в трехфазных сетях

Однофазное КЗ	$K^{(1)}$	
Однофазное замыкание на землю	$K_E^{(1)}$	
Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$	
Двухфазное КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	
Трехфазное КЗ с замыканием и без замыкания на землю	$K^{(3)}$	
Двойное замыкание на землю	$K_D^{(1,1)}$	

Все приведенные в табл. 1.1 виды повреждений могут происходить при наличии переходного сопротивления в месте повреждения, прежде всего сопротивления, вносимого электрической дугой или посторонними предметами. При замыканиях на землю важной составляющей переходного сопротивления является сопротивление опоры  $R_{оп}$ , несущей провод (рис. 1.4,а), и сопротивление земли, зависящее от вида почвы, значения и длительности протекания тока.

Общий случай, учитывающий все возможные виды переходных сопротивлений в месте КЗ, показан на рис. 1.4,б. Обычно переходное сопротивление при замыканиях на землю находится в пределах 5—20 Ом. В особых случаях (при малом числе заземлений в сети и скалистом грунте) оно может достигать сотен ом [10].

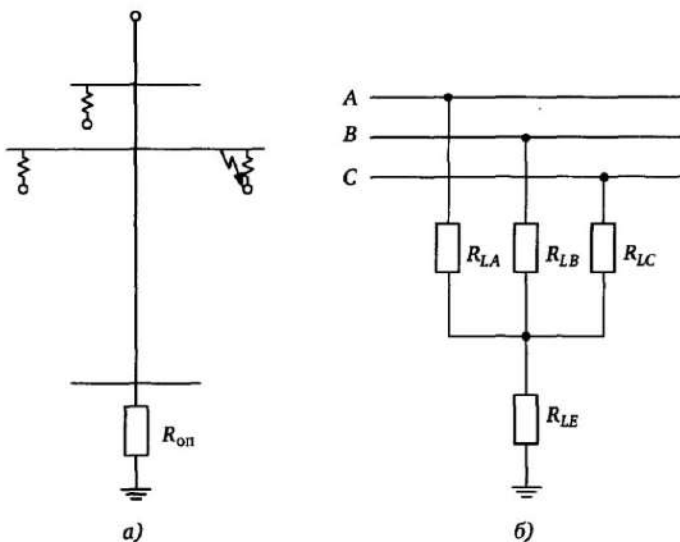


Рис. 1.4. КЗ на землю (а) и общий случай замыкания в ЭС (б)

## 1.4. Основные требования к защитным функциям

### 1.4.1. Чувствительность

Как указывалось, одной из основных задач РЗ является защита элементов энергосистемы от повреждений, обусловленных КЗ и аномальными режимами, и выдача команд и сигналов, способствующих восстановлению электроснабжения.

На рис. 1.5 показана электрическая сеть, в которой в точке  $K_1$  происходит КЗ на линии  $W1$ . При этом токи КЗ протекают не только по линии  $W1$ , но и по другим элементам ЭС. Одной из основных задач РЗ (защит  $S1—S11$ ) является по возможности быстрое отключение поврежденного элемента (линии  $W1$ ), что обеспечивает как сохранность элементов ЭС, так и быстрое восстановление электроснабжения.

В рассматриваемом случае это обеспечивается отключением защитами  $S6$  и  $S7$  выключателей  $Q6$  и  $Q7$  по концам линии  $W1$ . При этом место КЗ изолируется от источников напряжения (генератор  $G1$ , эквивалентная система  $N1$ ), и тем самым прекращается протекание токов КЗ по поврежденным и ряду неповрежденных элементов сети.

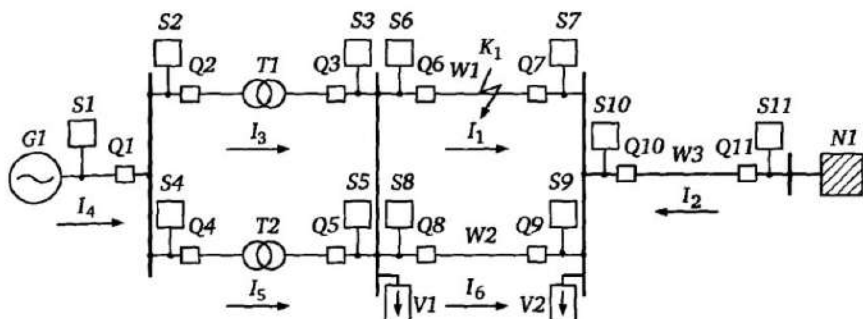


Рис. 1.5. Схема сети с КЗ на линии W1

*Чувствительность есть свойство релейной защиты реагировать на возможные повреждения на защищаемом участке и достаточно быстро их отключать, с тем чтобы сохранялась работоспособность как отключенных, так и оставшихся в работе элементов сети.*

Условия для оценки чувствительности РЗ можно сформулировать следующим образом.

Релейная защита удовлетворяет требованиям чувствительности, если при повреждении на защищаемом участке сети, могущем привести к повреждению элементов ЭС или нарушению энергоснабжения, ее время реакции  $\Delta t_k$  не превышает допустимого времени  $t_E$ , при котором сохраняется работоспособность элементов ЭС и устойчивость функционирования ЭС. Значение допустимого времени  $t_E$  зависит от типа элементов и свойств самой ЭС. Сохранность одних элементов определяется длительностью протекания тока КЗ и его значением, т.е. зависимостью  $t_E = f(I)$ ; для других элементов важно значение возможных перенапряжений; в определенных случаях для обеспечения устойчивости ЭС критическим параметром является продолжительность существования КЗ, определяющая значение  $t_E$ , и т.п.

Таким образом, защиты S6 и S7 на рис. 1.5, обеспечивающие отключение КЗ  $K_1$ , должны удовлетворять необходимым требованиям чувствительности при всех возможных повреждениях в любой точке защищаемой линии W1.

### 1.4.2. Селективность

*Селективность есть свойство релейной защиты формировать команды отключения только поврежденного участка или минимального числа участков электрической сети вблизи места повреждения, с тем чтобы свести к минимуму недоотпуск энергии потребителям.*

Так, селективность релейной защиты означает, что устройства защиты  $S_6$  и  $S_7$  должны при КЗ  $K_1$  действовать соответственно на выключатели  $Q_6$  и  $Q_7$  раньше, чем устройства защиты  $S_1—S_5$  и  $S_8—S_{11}$ , которые также измеряют токи КЗ. Только при этих условиях в данной ЭС с двусторонним питанием электроснабжение потребителей  $V_1$  и  $V_2$  будет сохранено. Обеспечение селективности является достаточно сложной задачей вследствие того, что токи КЗ протекают как по поврежденным, так и по неповрежденным элементам.

Существуют два принципиально отличающихся способа обеспечения селективности, в соответствии с которыми классифицируются релейные защиты — защиты с относительной селективностью и защиты с абсолютной селективностью.

### 1.5. Релейная защита с относительной селективностью

Если релейная защита не может обеспечить отключение 100% защищаемого объекта без введения замедления при КЗ в конце защищаемой зоны для отстройки от внешних КЗ, то такая защита обладает *относительной селективностью*. Защиты, использующие данные о токах и напряжениях только в месте своей установки, обладают относительной селективностью. Поясним сказанное на примере участка сети с односторонним питанием, состоящего из линий  $W_1—W_3$  (рис. 1.6).

В данном случае достаточно отключение лишь одного выключателя на каждой из линий для отделения места повреждения при КЗ от источника энергии. Если точка  $K_1$  в конце линии  $W_1$  расположена достаточно близко к шинам подстанции  $B$ , а точка  $K_2$  в начале линии  $W_2$  расположена также достаточно близко к шинам  $B$ , то токи и напряжения, подводимые к защите  $S_1$  при КЗ в точках  $K_1$  и  $K_2$ , практически одинаковы. Это означает, что если защита  $S_1$  охватывает КЗ  $K_1$  в конце линии  $W_1$  и срабатывает при этом без замедления, то с большой вероятностью она сработает без замедления и при замыкании



$K_2$  в начале линии  $W2$ , т.е. селективность защиты  $S1$  не будет обеспечена.

Для обеспечения селективности необходимо, чтобы защита  $S1$  с наименьшим временем  $t_{1S1}$  охватила не всю линию  $W1$ , а ее часть  $l_{1S1}$  (ступень 1), а остальная часть линии  $W1$  и часть линии  $W2$  охватывалась защитой  $S1$  с замедлением  $t_{2S1}$  (ступень 2). Защита  $S2$  на линии  $W2$  также должна с учетом таких же соображений иметь ступень 1, охватывающую лишь часть линии  $W2$ , с временем  $t_{1S2}$ , а при КЗ  $K_3$  в конце линии  $W2$  срабатывать с большим временем  $t_{2S2}$  и т.д. При таком выполнении релейной защиты селективность обеспечивается, так как при замыкании  $K_2$  защита  $S1$  не успеет сработать с временем  $t_{2S1}$  ввиду того, что раньше срабатывает защита  $S2$  с меньшим временем  $t_{1S2}$ . При этом место повреждения будет отделено от источника энергии отключением выключателя  $Q2$ , т.е. ток КЗ прекратится.

Если же по каким-либо причинам повреждение  $K_2$  не отклю-

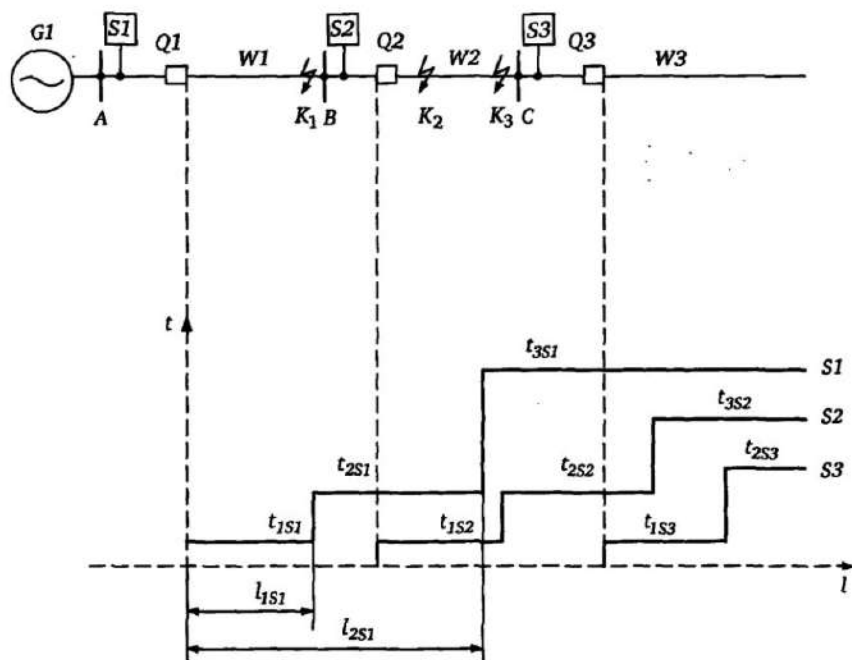


Рис. 1.6. Ступенчатые характеристики защит в сети с односторонним питанием

чится выключателем  $Q2$  (вследствие неисправности выключателя  $Q2$  или защиты  $S2$ ), то с выдержкой времени  $t_{2S1}$  сработает защита  $S1$  и отключит выключатель  $Q1$ .

Таким образом, одновременно обеспечивается резервная функция защит с относительной селективностью, содержащих несколько ступеней выдержки времени. Длина  $l_{2S1}$  второй ступени защиты  $S1$  выбирается по аналогичному принципу — чтобы быть отстроеной от срабатывания второй ступени  $S2$  и т.д. Для осуществления защиты с относительной селективностью вместо ступенчатых функций могут использоваться защитные функции с плавно-зависимой от тока выдержкой времени (рис. 1.7,а). Это не меняет описанного выше принципа согласования, так

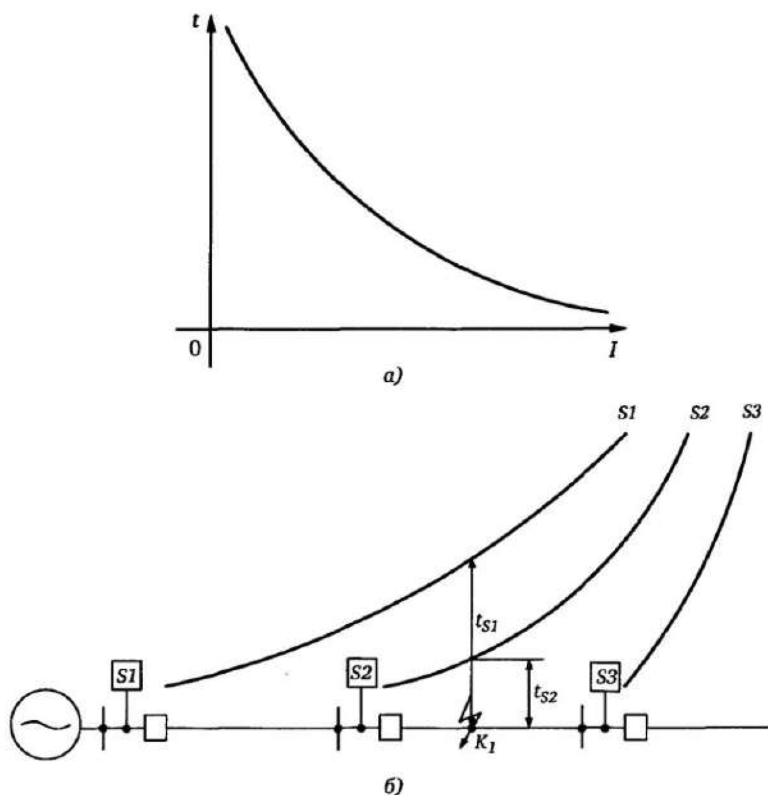


Рис. 1.7. Плавно-зависимая от тока выдержка времени (а) и характеристики защит в сети с односторонним питанием и плавно-зависимой от тока выдержкой времени (б)

как с увеличением расстояния от места установки защиты до места КЗ ток КЗ уменьшается и время срабатывания соответственно увеличивается (рис. 1.7,б).

В сетях с двусторонним и многосторонним питанием для обеспечения относительной селективности используется также принцип, иллюстрируемый рис. 1.6 и 1.7,б, однако устройства релейной защиты имеют в своем составе дополнительные реле, контролируемые угол между током и напряжением при КЗ (см. гл. 4).

Таким образом, РЗ с относительной селективностью характеризуется двумя основными свойствами:

- содержит ступени выдержки времени или имеет характеристики измерительных реле с замедлением в действии, позволяющие охватить 100% защищаемого участка;
- обеспечивает резервные функции при отказе выключателя или защит на соседних участках.

## 1.6. Релейная защита с абсолютной селективностью

Релейная защита обладает *абсолютной селективностью*, если она охватывает полностью защищаемый объект (участок) и не срабатывает при КЗ вне защищаемого объекта. Это может быть обеспечено только в случае, если для измерения или принятия решения об отключении используется дополнительная информация с противоположного конца (или концов) защищаемого объекта.

Возможны два принципа построения защит абсолютной селективности [3] — с непосредственным (рис. 1.8,а) и косвенным (рис. 1.8,б) сравнением сигналов:

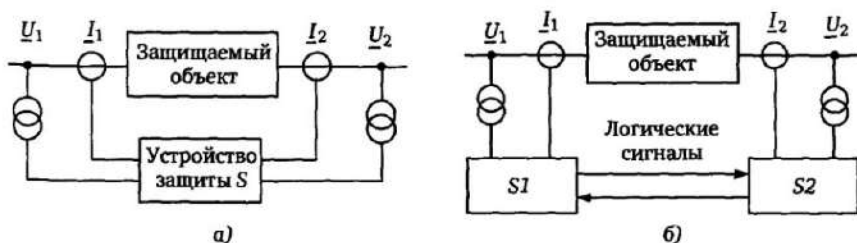


Рис. 1.8. Принципы построения защит абсолютной селективности с непосредственным (а) и косвенным (б) сравнением сигналов

При непосредственном сравнении сигналов измеряемыми величинами РЗ являются сигналы с различных сторон объекта. При косвенном сравнении сигналов защиты обмениваются логической информацией о действии измерительных органов, установленных по концам объекта.

Использование для измерительных органов информации с различных концов защищаемого объекта (в защите с непосредственным сравнением сигналов) позволяет обеспечить принципиально новое качество РЗ (абсолютную селективность), которого нельзя достигнуть при использовании только информации с одного из концов защищаемого объекта. В качестве примера на рис. 1.9 проиллюстрирован принцип дифференциальной защиты объекта (воздушная или кабельная линия, трансформатор и т.п.), обладающей абсолютной селективностью.

При КЗ  $K_1$  внутри объекта направления токов  $i_a$  и  $i_b$  одинаковы относительно концов объекта (полярности трансформаторов тока ТА1 и ТА2 всегда одинаково ориентированы относительно шин А и В). Поэтому дифференциальный ток  $i_d = i_a + i_b$  является относительно большим. При внешнем КЗ, например  $K_2$ , токи  $i_a$  и  $i_b$  равны по значению, но имеют раз-

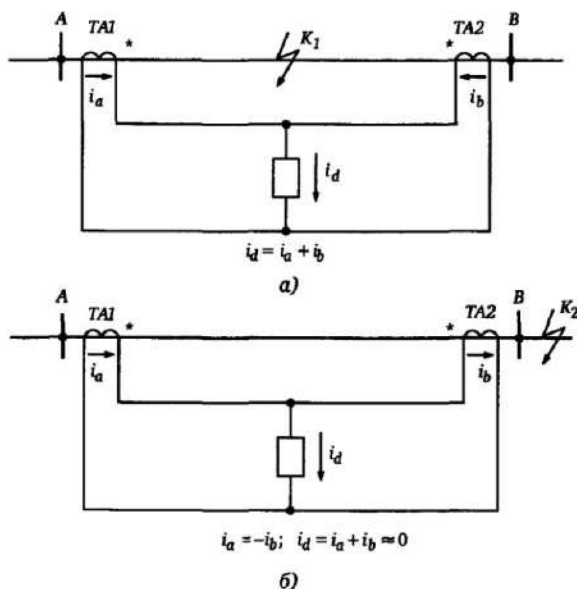


Рис. 1.9. Принцип действия дифференциальной защиты объекта, обладающей абсолютной селективностью, при внутреннем (а) и внешнем (б) КЗ

личные направления по отношению шин, т.е.  $i_a \approx -i_b$ . Поэтому дифференциальный ток  $i_d = i_a + i_b = 0$ . Как видно из рис. 1.9, в данном случае для обеспечения абсолютной селективности используется информация о токах  $i_a$  и  $i_b$  с обоих концов защищаемого объекта.

В качестве информации с противоположного конца объекта могут использоваться не аналоговые величины, а дискрет-

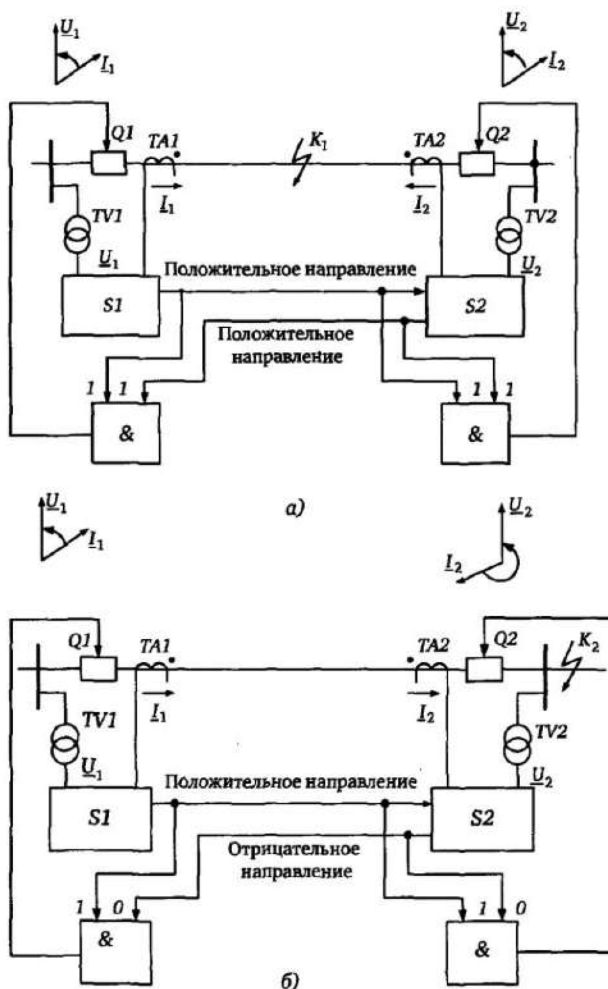


Рис. 1.10. Принцип выполнения релейной защиты абсолютной селективности на основе косвенного сравнения электрических величин при внутреннем (а) и при внешнем (б) КЗ

ные сигналы, например сообщения о срабатывании измерительных реле на противоположном конце линии. На рис. 1.10, в качестве примера, показан принцип выполнения релейной защиты абсолютной селективности на основе косвенного сравнения электрических величин.

Реле  $S1$  и  $S2$  по концам объекта контролируют направление мощности (угол между напряжением  $\underline{U}$  и током  $\underline{I}$ ). Отключение выключателей  $Q1$  и  $Q2$  происходит только в том случае, если на обоих концах линии направление мощности положительно (от шин к месту КЗ). Информация о знаке направления мощности  $(1, 0)$  передается каждой защитой на противоположный конец линии. При внутреннем КЗ  $K_1$  знаки мощностей положительны на обоих концах линии (рис. 1.10,а), в результате чего происходит отключение обоих выключателей  $Q1$  и  $Q2$ . При внешнем КЗ  $K_2$  (рис. 1.10,б) положителен лишь знак мощности на конце линии с выключателем  $Q1$ . Поэтому отключение выключателей  $Q1$  и  $Q2$  не происходит.

### 1.7. Измеряемые величины и критерии измерения, используемые в релейной защите

Измерительные органы релейной защиты используют в основном только две физические величины — токи  $i$  и напряжения  $u$ , характеризующие состояние сети и подводимые соответственно от измерительных трансформаторов тока и напряжения. Однако лишь в простейших случаях для выявления аварийного режима с учетом необходимости обеспечения селективности и чувствительности достаточно фиксации превышения тока или снижения напряжения относительно заданных значений.

Важную информацию несут некоторые другие измерительные параметры, характеризующие дополнительно токи и напряжения и соответствующие им векторы  $\underline{I}$  и  $\underline{U}$ , например, измерения приращений вектора тока  $\Delta \underline{I}$  или вектора напряжения  $\Delta \underline{U}$ . Для обеспечения селективности и чувствительности РЗ широко используются параметры, зависящие одновременно от тока и напряжения, например, сопротивление  $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ , направление мощности, характеризующее угол между векторами тока и напряжения, и т. п.

### 1.7.1. Критерии, зависящие от одной величины (ток или напряжение)

Структуру измерения одного параметра (тока, напряжения) можно представить в виде двух последовательных блоков (рис. 1.11,а).

Блок  $F_i$  осуществляет в общем случае линейное преобразование входных токов  $i_A, i_B, i_C$  в одну или несколько цифровых величин. Эти величины могут быть пропорциональны:

фазным токам  $I_A, I_B, I_C$ ;

симметричным составляющим трехфазной системы  $I_1, I_2, I_0$ ;

максимальному или минимальному из токов  $I_{\max}, I_{\min}$ .

При этом в общем случае выходные величины блока  $F_i$  являются комплексными числами, т.е. отображаются двумя цифровыми последовательностями.

Блок  $F_t$  реализует требуемую зависимость времени срабатывания от величины тока — ступенчатую (рис. 1.11,б) или более сложную (рис. 1.11,в). С помощью измерения тока возможен также косвенный контроль нагрева защищаемого объекта, когда

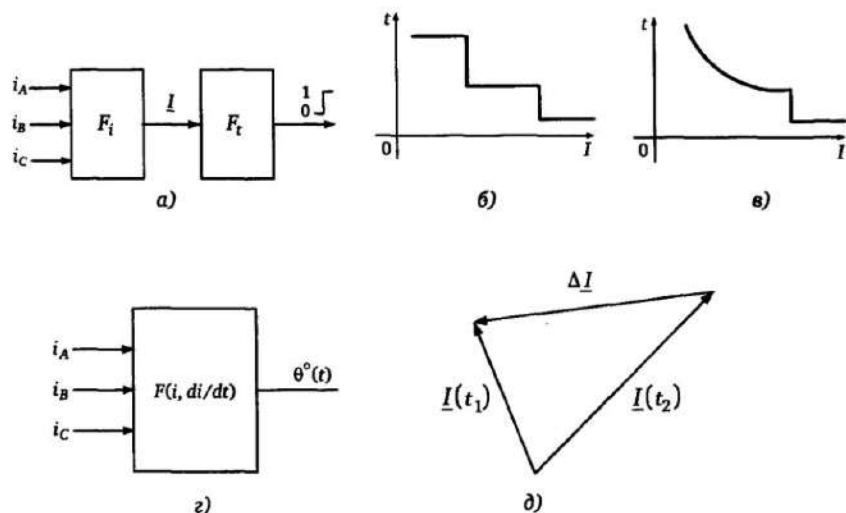


Рис. 1.11. Структура преобразования входных величин (а), ступенчатая зависимость времени срабатывания от величины тока (б), комбинированная характеристика время — ток (в), косвенный контроль нагрева защищаемого объекта (з), контроль векторного приращения тока (д)

да решается дифференциальное уравнение  $\theta^\circ(t) = F(i, di/dt)$ , где  $\theta^\circ(t)$  — температурный перегрев объекта в момент времени  $t$  (рис. 1.11,з).

Структуры, аналогичные рис. 1.11,а (исключая измерение перегрева), используются и при контроле напряжения в энергосистеме. Кроме основных защитных критериев, связанных с контролем тока или напряжения, существует ряд вспомогательных критериев, используемых при реализации цифровой релейной защиты, например:

- абсолютное  $\Delta I = I(t_2) - I(t_1)$  или векторное  $\Delta \underline{I} = \underline{I}(t_2) - \underline{I}(t_1)$  приращение тока (рис. 1.11,д) или симметричных составляющих тока (аналогично и для напряжений). Эти критерии используются обычно в быстродействующих пусковых органах, позволяя отличить режим КЗ от режима нагрузки с большими токами путем измерения приращений тока (напряжения);

- соотношение между амплитудами симметричных составляющих, например  $I_2/I_0$ ,  $U_2/U_0$  и т.п.;

- угловые соотношения между токами отдельных фаз или симметричными составляющими трехфазной системы токов (напряжений), например  $\arg(U_B/U_C)$ ,  $\arg(U_B/U_C)$ ,  $\arg(I_2/I_0)$  и т.п. Критерии, использующие соотношения между симметричными составляющими применяются для идентификации вида повреждений в защитах нагруженных высоковольтных линий.

### 1.7.2. Критерии, зависящие от двух величин

Полное сопротивление  $Z = \underline{U}/\underline{I}$  является более информативным параметром, чем ток или напряжение. В простейшем случае (рис. 1.12), измеряемое защитой  $S$  сопротивление  $Z_k = \underline{U}/\underline{I} =$

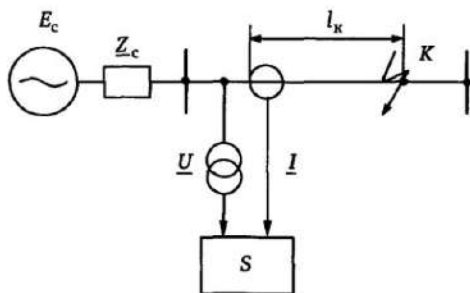


Рис. 1.12. Измерение полного сопротивления линии до места КЗ



$= Z_{уд} l_k$ , где  $Z_{уд}$  — удельное сопротивление линии,  $l_k$  — расстояние между местом установки защиты и местом КЗ.

Таким образом, измеряемое значение  $Z_k$  пропорционально удаленности места КЗ и не зависит от режима ЭС, характеризуемого в данном случае значением напряжения эквивалентной системы  $E_c$  и сопротивления системы  $Z_c$ . В более сложных случаях (при КЗ, сопровождаемых электрической дугой или в зонах резервирования в сетях с многосторонним питанием) определенная зависимость результата измерения  $Z$  от режима ЭС имеется (см. гл. 7), однако влияние этих факторов на измерение  $Z$  существенно меньше, чем при измерении тока или напряжения. Поэтому измерения, основанные на замере полного сопротивления, обеспечивающие большую селективность и чувствительность, являются предпочтительными при построении релейной защиты сетей высоких напряжений ввиду меньшей подверженности влиянию изменения режимов сети. Характеристики срабатывания измерительных органов дистанционных защит ограничивают область срабатывания в плоскости измеряемого полного сопротивления  $Z$ , (рис. 1.13).

Точка  $Z_k$  пересечения характеристики реле 1 с характеристикой линии 2 определяет защищаемую реле зону. Дистанционные защиты обычно имеют несколько различных зон — основную (быстродействующую) и резервные с различными выдерж-

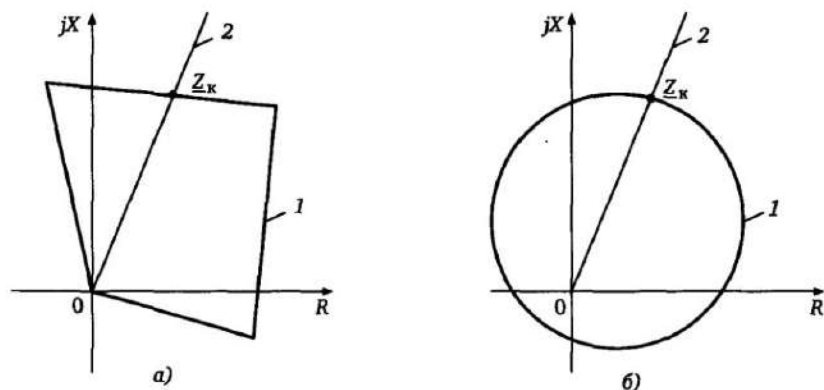


Рис. 1.13. Характеристики срабатывания измерительных органов дистанционных защит (пример)

Таблица 1.2. Основные параметры и критерии измерения

Параметр	Критерии измерения	Область применения
Амплитуда тока $I$	$I > A; I < A$	Пусковые и измерительные органы РЗ
Симметричные составляющие трехфазной системы токов $I_1, I_2, I_0$	$I_{1,2,0} > A;$ $I_1/I_2 > K;$ $I_2/I_0 > K$	То же
Скорость изменения тока (мгновенные значения) $di/dt$	$\Delta i/\Delta t > A$	Пусковые органы РЗ; алгоритмы измерения
Скорость изменения амплитуды тока $dI/dt$	$\Delta I/\Delta t > A$	То же
Скорость изменения вектора тока $dI/dt$	$ \Delta I /\Delta t > A$	То же
Времятоковая функция $F(I, t)$	$F(I, t) > 0$	Защиты с зависимой выдержкой времени
Косвенный контроль температуры $\theta^\circ = F(I, di/dt)$	$F(I, di/dt, \theta^\circ) > 0$	Защиты от перегрузки
Геометрическая сумма токов $\sum_1^m I_n$	$\sum_1^m I_n > A; \left  \sum_1^m I_n \right  > A(I)$	Дифференциальные защиты объектов
Амплитуда напряжения $U$	$U < A; U > A$	Пусковые и измерительные органы РЗ
Симметричные составляющие трехфазной системы напряжений $U_1, U_2, U_0$	$U_{1,2,0} > A$	То же
Скорость изменения напряжения (мгновенные значения) $du/dt$	$\Delta u/\Delta t > A$	Пусковые органы РЗ; алгоритмы измерения
Скорость изменения вектора напряжения $dU/dt$	$ \Delta U /\Delta t > A$	То же
Угол между токами $\varphi(I_A, I_B)$	$\varphi_1 \leq \varphi(I_A, I_B) \leq \varphi_2$	Пусковые и измерительные органы РЗ
Угол между симметричными составляющими системы токов $\varphi(I_{1,2,0})$	$\varphi_1 \leq \varphi(I_{1,2,0}) \leq \varphi_2$	То же
Угол между напряжением и током $\varphi(U, I)$	$\varphi_1 \leq \varphi(U, I) \leq \varphi_2$	Реле направления мощности
Угол между симметричными составляющими напряжения и тока отдельных последовательностей $\varphi(U_{1,2,0}, I_{1,2,0})$	$\varphi_1 \leq \varphi(U_{1,2,0}, I_{1,2,0}) \leq \varphi_2$	Реле направления мощности отдельных последовательностей
Дистанционные реле $Z$	$Z = U/I \in \{Z_{уст}\}$	Пусковые и измерительные органы защит
Направление активной мощности $\varphi(P)$	$\varphi(P) \geq 0; P > A$	Дополнительный критерий

Параметр	Критерии измерения	Область применения
Направление реактивной мощности $\varphi(Q)$	$\varphi(Q) \geq 0; Q > A$	То же
Повышение (понижение) частоты $f$	$f > A; f < A$	Реле повышения (понижения) частоты
Контроль содержания высших гармоник $A_f$	$A_{\text{высш}}/A_{f0} > 0$	Защита от замыканий на землю; блокировки при включении силовых трансформаторов

Примечание.  $A$  — уставка.

ками времени (см. рис. 1.6), т.е. обладают относительной селективностью.

Большое распространение получили реле направления мощности, реагирующие на угол между напряжением и током  $\varphi = \arg(U/I)$ , а также на различные виды мощности — полную  $S = UI = P + jQ$ , активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности. Токковые дифференциальные защиты двухконцевых (см. рис. 1.9) и многоконцевых объектов, в том числе и дифференциальные защиты шин, используют в качестве параметра измерения геометрическую сумму двух или более токов  $\Sigma I_n$ , что обеспечивает абсолютную селективность (см. § 1.6).

Основные применяемые в релейной защите критерии измерения приведены в табл. 1.2.

## 1.8. Классификация защитных функций

Специальный стандарт ANSI/IEEE\* [2] определяет обозначения и нумерацию функций отдельных элементов электрической сети, в том числе и основных функций релейной защиты. Назначение и обозначения отдельных распространенных функций приведены в табл. 1.3.

На рис. 1.14, в качестве примера, показаны основные функции цифровой дистанционной защиты с использованием стандарта ANSI/IEEE.

\* ANSI — American National Standards Institute, New York, USA.

IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

Таблица 1.3. Классификация защитных функций

Защитная функция	№ ANSI	Обозначение	Измерительный параметр (принцип действия)
Токовая защита без выдержки времени (токовая отсечка)	50	$I \gg$	Контроль значения тока
Токовая защита с выдержкой времени (ступенчатой или зависимой от тока)	51	$I >, t$	Контроль значения и длительности тока
Токовая защита от замыканий на землю без выдержки времени	50N	$I_E \gg$	Контроль значения тока замыкания на землю $I_E = -3I_0$
Токовая защита от замыканий на землю с выдержкой времени (ступенчатой или зависимой от тока)	51N	$I_E >, t$	Контроль значения и длительности тока замыкания на землю $I_E = -3I_0$
Направленная токовая защита (ступенчатая или с зависимой выдержкой времени)	67	$I_{dir} \gg$ $I_{dir} >, t$	Контроль значения тока, длительности тока и направления мощности
Направленная токовая защита от замыканий на землю (ступенчатая или с выдержкой времени)	67N	$I_{E dir} \gg$ $I_{E dir} >, t$	Контроль значения тока замыкания на землю, длительности тока и направления мощности
Тепловая (температурная) защита	49	$\theta >$	Непосредственный или косвенный контроль температуры объекта
Защита минимального тока	37	$I <$ $I <, t$	Контроль значения и длительности протекания тока
Защита по току обратной последовательности	46	$I_2 >$ $I_2 >, t$	Контроль значения и длительности протекания тока обратной последовательности
Устройство резервирования отказа выключателя	50BF	$I >, t$	Контроль значения и длительности протекания тока
Защита минимального напряжения	27	$U <, t$	Контроль значения напряжения
Контроль исправности цепей	47	—	Контроль соотношений между несколькими напряжениями
Защита максимального напряжения	59 59N	$U >, t$ $U_E >, t$	Контроль значения и длительности напряжения
Защита от замыканий на землю с контролем по напряжению	64	$U_E >, t$	Контроль значения и длительности напряжения
Токовая защита с пуском по напряжению	51V	$I >, U <, t$	Контроль значения и длительности тока и напряжения
Защита от перевозбуждения	40	—	Контроль тока в цепи возбуждения
Защита двигателя в режиме пуска	48	—	Контроль значения и длительности протекания тока

Защита, реагирующая на направление мощности	32	$\varphi(U, I)$	Контроль направления мощности
Дистанционная защита	21	$Z <$	Контроль комплексного сопротивления $Z$
Дистанционная защита от замыканий на землю	21N	$Z_E <$	То же
Определитель места повреждения	21FL	—	Измерения расстояния до места повреждения
Защита по частоте	81	$f \gtrsim$	Контроль частоты
Защита по показателю мощности	55	$\cos\varphi$	Контроль показателя мощности
Контроль синхронизма	25	—	Контроль разности амплитуд, частот и фазового сдвига двух напряжений
Блокировка при качаниях	78	—	Контроль развития качаний в энергосистеме
Автоматическое повторное включение	79	—	Серия циклов «отключить-выключить» с контролем действия релейной защиты
Контроль цепей отключения выключателей	74 TC	—	Контроль исправности цепи отключения
Фиксация отключения	86	—	Запоминание действия выходного реле на отключение выключателя
Дифференциальная защита генератора	87 G	—	Контроль геометрической суммы токов по концам объекта
Дифференциальная защита трансформатора	87 T	—	То же
Дифференциальная защита шин	87 BB	—	То же
Дифференциальная защита двигателя	87 M	—	То же
Дифференциальная защита линии	87 L	—	То же
Защиты абсолютной селективности с косвенным сравнением сигналов	85	—	Использование сигналов для отключения с другой стороны объекта
Ограничение числа пусков двигателя	66	—	Контроль числа пусков двигателя в течение заданного промежутка времени
Защита от перевозбуждения	24	$U/f >$	Контроль параметра $U/f$
Защита от затормаживания ротора	51LR	—	Контроль длительности протекания тока
Фиксация заторможенного ротора электрической машины	14	—	Контроль состояния ротора

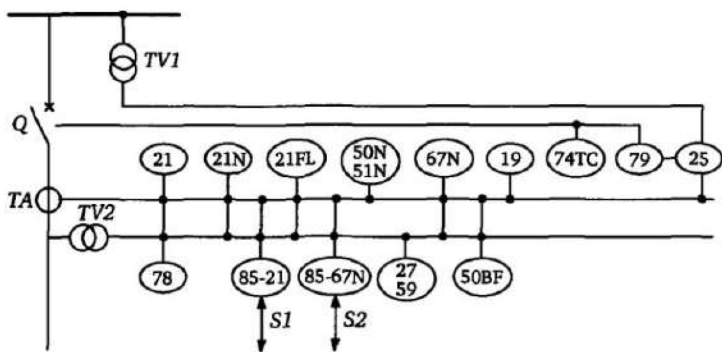


Рис. 1.14. Основные функции цифровой дистанционной защиты

При этом возможно определенное комбинирование номеров для описания новых функций. Например, на рис. 1.14 номер 85-21 означает функцию защиты абсолютной селективности (85) на основе обмена сигналами от дистанционных защит (21) по концам линии; номер 85-67N — функцию защиты абсолютной селективности на основе обмена сигналами направленных земляных защит (67N) по концам линии; S1 — сигнал срабатывания от дистанционной защиты с противоположной стороны; S2 — сигнал от направленной земляной защиты с противоположной стороны. Другой пример комбинирования: 67-46 — направленная защита по току обратной последовательности.

## 1.9. Основные требования, предъявляемые к устройствам релейной защиты

### 1.9.1. Общие требования

Чувствительность и селективность (см. § 1.4) являются основными показателями релейной защиты, характеризующими ее функции в энергетической системе. Реализация этих функций осуществляется устройствами релейной защиты, которые должны удовлетворять ряду требований по обеспечению их правильного функционирования в реальных режимах работы ЭС. В соответствии со стандартом МЭК [1] неправильное функционирование защиты может выражаться в виде отказа защиты в функционировании или в непредусмотренном функционировании (излишнее действие). Ниже рассматриваются основные требо-

вания к устройствам РЗ с точки зрения их правильного функционирования.

### **1.9.2. Статическая устойчивость функционирования**

Входные величины, подводимые к устройствам релейной защиты, зависят от режимов и конфигурации ЭС и могут изменяться в достаточно широких диапазонах с учетом места и вида КЗ, например, токи  $I$  — в диапазоне  $(0—40) I_{ном}$ .

*Статическая устойчивость функционирования* характеризует способность УРЗ сохранять стабильность измерения и обеспечивать точность измерения, характеристики, параметры и уставки, при условии, что эти входные величины являются установившимися. Статическая устойчивость функционирования определяется в основном выполнением требований по точности параметров, характеристик, уставок в заданных диапазонах входных сигналов. Так, в современных цифровых защитах отклонения величин срабатывания по току, напряжению, сопротивлению от установленных значений обычно не превышают  $\pm 5\%$ ; от уставок по времени —  $1\%$ ; от уставок по углу —  $\pm 3^\circ$  при синусоидальной форме входных сигналов.

### **1.9.3. Динамическая устойчивость функционирования**

Энергетическая система является сложной динамической системой, в которой при возмущениях, в частности при КЗ, возникают переходные процессы, приводящие в ряде случаев к появлению апериодических и высокочастотных составляющих в токе и напряжении. Переходные процессы возникают и в измерительных трансформаторах тока и напряжения, что приводит к возникновению дополнительных переходных составляющих и в ряде случаев и к насыщению измерительных трансформаторов тока, что существенно искажает форму сигналов, подводимых к УРЗ. Следует считаться также и с возможностью насыщения силовых трансформаторов ЭС при их включении, что также искажает форму тока. Все указанное означает, что форма входных сигналов УРЗ при возникновении возмущения, прежде всего при КЗ в ЭС, может определенное время существенно отличаться от синусоидальной. Указанное может привести к неправильному функционированию релейной защиты —

недопустимому замедлению при срабатывании, отказу в срабатывании или к излишнему срабатыванию, т.е. к нарушению динамической устойчивости функционирования РЗ.

Динамическая устойчивость функционирования характеризует способность УРЗ обеспечивать свои функции с учетом переходных процессов, возникающих при КЗ и коммутациях в ЭС и самом УРЗ. С учетом этого, требование динамической устойчивости функционирования должно учитываться при разработке алгоритмов и конструкции устройств РЗ.

#### 1.9.4. Устойчивость к влиянию внешней среды

В процессе эксплуатации устройства РЗ могут подвергаться различного вида воздействиям внешней среды — электрическим, механическим, климатическим. Многочисленные международные и национальные стандарты определяют нормы на предельные значения указанных воздействий, которые должны выдерживать устройства РЗ, чтобы обеспечить правильное функционирование в реальных условиях.

Таблица 1.4. Факторы внешней среды и определяющие их стандарты

№	Влияющий фактор (проверяемый параметр)	Стандарт	Типичные значения
1	<b>Электрические (электромагнитные) воздействия</b>		
1.1	Электрическая прочность изоляции		
1.1.1	Высокое напряжение переменного тока	МЭК 60255-5	2—2,5 кВ (действующее значение) — I <sub>мин</sub>
1.1.2	Высокое напряжение постоянного тока	МЭК 60255-5	3,5 кВ — 1 мин
1.1.3	Импульсное напряжение	МЭК 60255-5	5 кВ (пик); 1,2/50 мкс
1.2	Электромагнитная совместимость (помехоустойчивость)		
1.2.1	Быстрые переходные процессы	МЭК 60255-22-4 МЭК 61000-4-4	4 кВ; 5/50 нс; 5 кГц — 1 мин
1.2.2	Затухающий колебательный импульс 1 МГц	МЭК 60255-22-1	2,5 кВ; 1 МГц; $\tau = 15$ мкс 400 импульсов в 1 с
1.2.3	Устойчивость к электромагнитным полям	МЭК 6100-4-3 МЭК 60255-22-3	10 В/м; от 27 до 1000 МГц
1.2.4	Устойчивость к наведенным помехам	МЭК 61000-4-6 МЭК 61000-4-8 МЭК 60255-6	10 В; от 150 кГц до 80 МГц 30 А/м
1.2.5	Электростатический разряд	МЭК 60255-22-2	8 кВ контактный разряд; 15 кВ воздушный разряд



1.3	Кратковременное исчезновение напряжения питания	МЭК 60255-11	20—200 мс
2	<b>Механические нагрузки</b>		
2.1	Вибрация	МЭК 60255-21-1	$f = 10 \sum 60$ Гц
2.2	Механические удары	МЭК 60255-21-2	—
2.3	Землетрясения	МЭК 60255-21-3	—
2.4	Пожароустойчивость	МЭК 60695-2-1	—
3	<b>Климатические условия</b>	МЭК 60255-6	—
3.1	Работа	МЭК 60068-2-1, 2-2	От -5 до +55°
3.2	Хранение	МЭК 60068-2-1, 2-2	От -25 до +70°
3.3	Влажность	МЭК 60068-2-3	От 75% до 90%

В табл. 1.4 приведены основные влияющие факторы внешней среды, определяющие их стандарты и типичные значения влияющих факторов при проверке устойчивости УРЗ.

### 1.9.5. Надежность

Под надежностью релейной защиты понимается вероятность выполнения ею требуемых функций при заданных условиях в течение заданного промежутка времени (стандарт МЭК 50(448)-1995). Невыполнение защитой требуемых функций может заключаться в непредусмотренном функционировании (например, в излишнем срабатывании), либо в отказе в функционировании (рис. 1.15).

В соответствии с этим стандартом МЭК определяются понятия *надежности несрабатывания* и *надежности срабатывания* [1].

Неправильное функционирование может быть обусловлено либо *аппаратным отказом* (отказом элемента или конструкции УРЗ), либо *принципиальным отказом* (отказом, вызванным ошибкой при проектировании или применении устройства, например, отсутствием статической или динамической устойчивости функционирования (см. выше).

Мероприятия по обеспечению чувствительности, селективности, статической и динамической устойчивости функционирования (см. §1.4, п. 1.9.1—1.9.3) уменьшают вероятность принципиального отказа устройств РЗ. Качественное выполнение устройств защи-



Рис. 1.15. Отказ защиты как следствие неправильного функционирования

ты, обеспечивающее, в том числе и устойчивость к влияющим факторам внешней среды, уменьшает вероятность возникновения аппаратного отказа.

Современные микропроцессорные устройства защиты обладают дополнительными возможностями повышения надежности. Это обусловлено тем, что расширение функциональных возможностей в части защитных функций и их характеристик уменьшает вероятность принципиального отказа, а использование интегрированной микропроцессорной элементной базы существенно уменьшает число конструктивных элементов и снижает вероятность аппаратного отказа.

Дополнительным средством повышения надежности УРЗ является возможность введения функции наблюдения и автоматического контроля в цифровые устройства релейной защиты (решается в основном на уровне программного обеспечения). Непрерывный автоматический контроль исправности внутренних элементов защиты, а также частично внешних входных цепей переменного тока и напряжения и выходных отключающих цепей, обеспечивает своевременное выявление неисправности и существенно снижает вероятность аппаратного отказа.

Другим средством снижения вероятности аппаратного отказа являются плановые проверки устройств РЗ. Проверка цифровых устройств защиты существенно упрощается ввиду сравнительно малого потребления входных цепей и возможности быстрого вывода достаточно большой информации из устройств. Существенно упрощает проверку устройств РЗ и повышает ее достоверность применения современных компьютерно-управляемых проверочных автоматизированных устройств и программ проверки (см. гл. 11).

### 1.10. Основные элементы цифровой релейной защиты

Основные элементы структуры ЦРЗ показаны на примере дифференциальной и дистанционной защиты 7SD5 фирмы «Siemens» (рис. 1.3, 1.16).

В ней можно выделить следующие функциональные блоки (обозначение потоков информации приняты в соответствии с рис. 1.1).

*Аналоговые входы переменного тока* служат для ввода сигналов от измерительных трансформаторов тока (входы  $i$ ) и напряжения (входы  $u$ ). При этом в цепях тока три входа используются для ввода фазных токов, а четвертый вход в зависимости от выбранного решения, может быть использован для ввода тока нулевой последовательности защищаемой линии, либо тока нулевой последовательности параллельной линии, либо для других целей. Аналогично в цепях напряжения три входа используются для ввода фазных напряжений, а четвертый вход — для ввода дополнительного напряжения в зависимости от выбранного функционального признака, например, напряжение разомкнутого треугольника  $3U_0$  или напряжение от системы шин для цепей синхронизации.

Промежуточные трансформаторы  $T$  используются для гальванического разделения цепей.

*Элементы для цифровой обработки сигналов:*

$EV$  — преобразователи и усилители, обеспечивающие аналоговую фильтрацию, нормирование и усиление входных сигналов переменного тока;

$AD$  — аналого-цифровые преобразователи;

$\mu C$  — микропроцессорный блок;

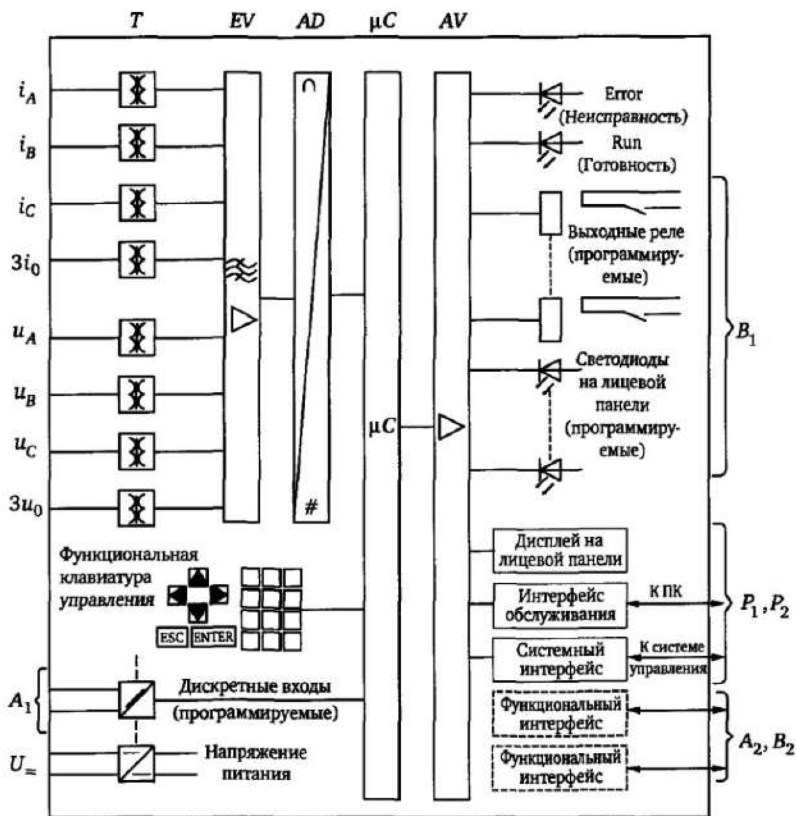


Рис. 1.16. Обобщенная структурная схема дифференциальной и дистанционной защиты 7SD6

AV — выходные усилители, обеспечивающие функционирование, прежде всего, выходных реле и светодиодов.

В микропроцессорном блоке, наряду с обработкой измеряемых величин, реализуются защитные функции, функции управления и дополнительные функции, среди которых можно выделить следующие:

- фильтрация и первичная обработка измеряемых величин;
- непрерывный контроль достоверности измеряемых величин;
- проверка граничных условий;
- обработка сигналов логических функций;
- формирование команд на отключение/включение;
- регистрация текущих и аварийных событий/регистрация мгновенных данных повреждения;

- обеспечение функционирования операционной системы, например, хранение данных, часы реального времени, коммуникации, интерфейсы и т.д.

Важной функцией блока аналоговых входов является обеспечение достаточной изоляционной прочности измерительных цепей устройства относительно вторичных цепей высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения.

*Дискретные входы*  $A_1$  предназначены для ввода логической информации (0/1), которая в дальнейшем используется в программной части для принятия решения. Для ввода информации используют, как правило, оптоэлектронные преобразователи. Эта информация обычно включает в себя:

- сигналы о состоянии элементов электрической системы (например, вспомогательных контактов выключателей);

- сигналы от других устройств РЗ, передаваемые, например, с помощью средств телемеханики;

- сигналы пуска (запрета) от устройств автоматического повторного включения (АПВ);

- сигналы ускорения защит при включении линии;

- сигналы для разрешения или запрета отдельных функций защиты;

- сигналы управления, изменяющие логику защиты.

Каждый дискретный вход определенным образом программируется. Поэтому появление или исчезновение напряжения на запрограммированном входе оптрона соответствует появлению определенной команды в программном блоке защиты.

*Дискретные выходы* — выходные реле  $B_1$  и светодиоды — служат для целей управления и сигнализации. Эти элементы также программируются, т.е. срабатывание (несрабатывание) одного из реле соответствует выполнению устройством защиты определенной функции. Через дискретные выходы выдаются команды включения (отключения) выключателей и различные сигналы и сообщения для других устройств защиты и систем сигнализации.

*Функциональная клавиатура управления* предназначена для ввода управляющей информации, такой как:

- изменение уставок и параметров защиты;

- ввод (вывод из действия) отдельных функций;

- ввод команд для управления коммутационными элементами присоединения;

программирование дискретных входов и выходов;

проведение контрольных проверок исправности устройства.

*Дисплей* предназначен для чтения сообщений защиты, а также используется как вспомогательное средство при всех операциях, выполняемых с помощью клавиатуры.

*Интерфейс обслуживания* представляет собой обычно последовательный порт на лицевой панели защиты и обеспечивает связь между защитой и персональным компьютером. В целом современная цифровая защита представляет собой достаточно сложное устройство, выполняющее большое количество различных функций и требующее ввода и вывода значительного числа данных и сообщений. Поэтому наиболее эффективное обслуживание защиты, прежде всего ввод данных и вывод сообщений, может быть проведено с помощью персонального компьютера. Для этого используются специальные обслуживающие программы, учитывающие особенности конкретной защиты. Специальный интерфейс позволяет также производить централизованную настройку и обслуживание устройства на удалении (через модем).

*Системный интерфейс* обеспечивает связь защиты с системой контроля и управления. Посредством этого интерфейса в систему управления передаются различные сообщения, в том числе о состоянии защиты и действии отдельных функций на уровень управления и архивирования данных. В другом направлении (к защите) передаются управляющие сигналы, позволяющие изменять определенные параметры или группы параметров защиты. Связь с системой управления может осуществляться по электрическим или оптическим каналам и использовать различные протоколы передачи данных.

*Функциональный интерфейс* обеспечивает быстрый обмен информацией в общем случае о действиях отдельных функций защиты, сообщениях и состоянии контактов коммутирующих аппаратов с устройством защиты на другом конце защищаемого объекта. Это позволяет повысить эффективность защитных функций и в ряде случаев ускорить отключение повреждений в объекте, (например, на линии). Функциональный интерфейс используется также для обеспечения функции дифференциальной защиты. В этом случае происходит обмен информацией с другими УРЗ об аналоговых входных сигналах переменного тока (см. рис. 1.2).

## Глава 2

# Измерительные органы цифровой релейной защиты

### 2.1. Общие положения

#### 2.1.1. Структура цифровых измерительных органов

По аналогии с электромеханическими и электронными измерительными органами, в ЦРЗ можно также выделить цифровые измерительные органы (ЦИО).

*Измерительные органы релейной защиты, в которых при обработке информации выполняются операции с последовательностями чисел, зависящими от текущих значений входных сигналов тока  $i$  и напряжения  $u$ , подводимых к УРЗ, называют цифровыми измерительными органами.*

Цифровые измерительные органы строятся на основе общей конструктивной базы микропроцессорной системы и общей программы, управляющей этой системой, путем применения специально разработанных подпрограмм, реализующих заложенные в них алгоритмы.

Таким образом, ЦИО являются в определенном смысле «виртуальными» органами, так как физически (конструктивно) выделить каждый из них из ЦРЗ в большинстве случаев невозможно в силу общей конструктивной базы и общих программных средств МП-системы.

Основой ЦИО является преобразование непрерывного входного сигнала в последовательность чисел, называемых *отсчетами*, которые отображают его мгновенное значение, измеряемое через равные промежутки времени. Такая процедура называется *аналого-цифровым преобразованием*, а устройство для её реализации — аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Числа, полученные в результате аналого-цифрового преобразования, выражаются в двоичной системе счисления, т.е. в виде комбинаций двух цифр — «нулей» (0) и «единиц» (1).

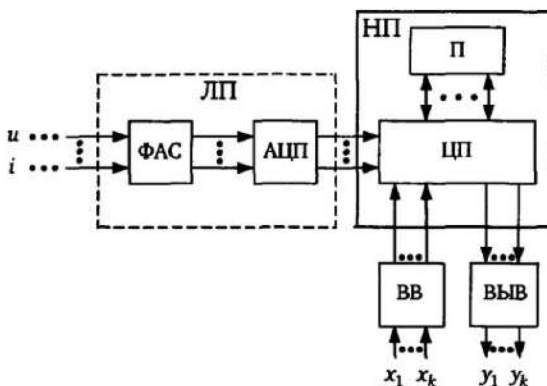


Рис. 2.1. Структурная схема ЦИО

Преобразование непрерывного аналогового сигнала в последовательность его равноотстоящих мгновенных значений является частью цифрового измерения и называется дискретизацией.

Обобщенная структурная схема ЦИО приведена на рис. 2.1. Условно ЦИО можно разбить на две части — линейный ЛП и нелинейный НП преобразователи. Линейный преобразователь преобразует входные измеряемые сигналы в последовательности цифровых сигналов. Для этого используются формирователи аналоговых сигналов ФАС (например, промежуточные трансформаторы, активные или пассивные аналоговые фильтры и АЦП). Нелинейный преобразователь НП служит для обеспечения необходимого алгоритма измерения путем обработки цифровых сигналов и содержит цифровой процессор ЦП; блоки памяти П; интерфейсы входа и выхода ВВ, ВЫВ для ввода дискретной информации ( $x_1—x_k$ ) и вывода информации из ЦИО ( $y_1—y_k$ ).

Структура ЦИО во многом условна, так как в зависимости от применяемых способов и средств обработки и ввода сигналов, методов вычислений могут иметься последовательные или параллельные каналы цифровой обработки и соответствующие коммутаторы сигналов, один или несколько взаимосвязанных микропроцессоров (МП) для обеспечения функций нескольких ЦИО и др. Несмотря на то, что структура ЦИО является в целом более сложной, чем структура традиционных аналоговых органов на основе сравнения величин, и содержит достаточно сложные узлы, такие как АЦП и вычислительные блоки, основные



преимущества такой структуры выявляются при выполнении УРЗ объекта или группы УРЗ. Быстродействие современных МП и возможности их структуры в части решения в процессе реального времени различных легко перепрограммируемых задач позволяют обеспечить одновременно функции многих измерительных органов, различных по принципу действия, и проведение большого числа логических операций. Дополнительно возможно решение задач самоконтроля исправности, регистрации уставок РЗ в текущий момент времени, автоматизации проверок УРЗ, адаптации ЦРЗ к изменяющемуся состоянию ЭС.

Вариант реализации ЦРЗ на основе микропроцессорной системы структурно представлен на рис. 2.2.

Входная информация ЦРЗ определяется аналоговыми сигналами  $u_A—u_0$ ,  $i_A—i_0$ , характеризующими режим ЭС в точке А установки защиты по переменному напряжению и току, и логическими сигналами  $x_1—x_k$ , подводимыми к интерфейсу ввода ВВ.

Сигналы  $x_1—x_k$  разделяются на группы, воздействующие на различные узлы устройства ввода, и вводятся обслуживающим персоналом или автоматически. Взаимодействуя с ЦП и устройствами памяти П, они позволяют: изменять уставки и характеристики срабатывания ЦИО; производить оперативные изменения в логической части; автоматически изменять функциональные связи в логической части в зависимости от появляющихся дискретных сигналов от других УРЗ и автоматики; обеспечивать ввод и вывод всего ЦРЗ и его отдельных функций; тестовые и автоматические проверки; ввод в режим регистрации уставок и характеристик. Сигналы устройства вывода информации ВВВ воздействует на отключающие устройства защитного комплекса, другие УРЗ, сигнализацию, регистратор данных, печатающую аппаратуру.

Аналоговые сигналы от ТА и TV преобразуются промежуточными трансформаторами напряжения и тока ПТН, ПТТ, фильтрами низких частот и подводятся к коммутирующему блоку К, обеспечивающему поочередно выборку мгновенных значений величин с выходов отдельных фильтров и их запоминание на время, необходимое для правильной работы АЦП. В результате выходные сигналы АЦП соответствуют в цифровом виде дискретным сигналам, модулированным по амплитуде синусоидальными функциями. Каждому аналоговому сигналу  $u(t)$  на выходе фильтра ЧФ соответствует дискретный сигнал  $u(nT)$  на входе

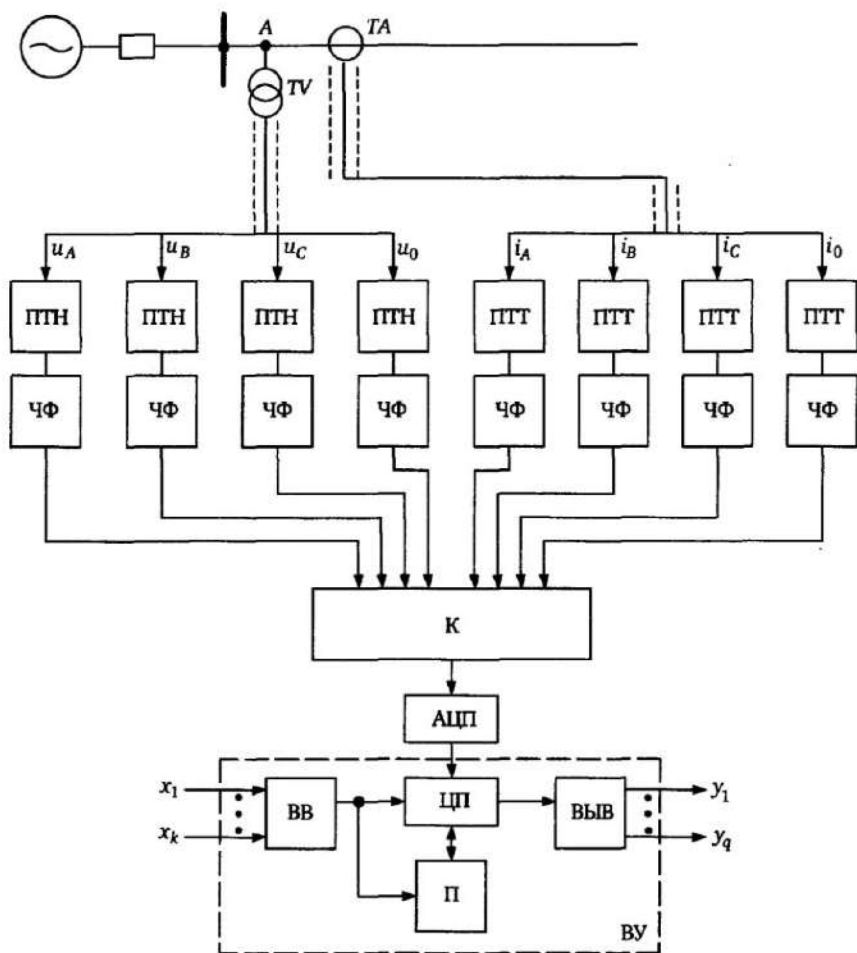


Рис. 2.2. Структурная схема ЦРЗ:

$TA$  — измерительные трансформаторы тока;  $TV$  — измерительные трансформаторы напряжения;  $ПТТ$  — промежуточные трансформаторы тока в ЦРЗ;  $ПТН$  — промежуточные трансформаторы напряжения;  $ЧФ$  — аналоговые фильтры низких частот;  $К$  — коммутатор сигналов;  $ВУ$  — вычислительное устройство. Остальные обозначения соответствуют обозначениям на рис. 2.1

$АЦП$  и цифровой сигнал на выходе  $АЦП$ , вводимый в вычислительное устройство  $ВУ$ , осуществляющее цифровую обработку сигналов. На основе текущей цифровой информации о входных сигналах напряжения и тока и входных логических сигналах  $x_1$ — $x_k$  вычислительное устройство  $ВУ$  вырабатывает необходимые

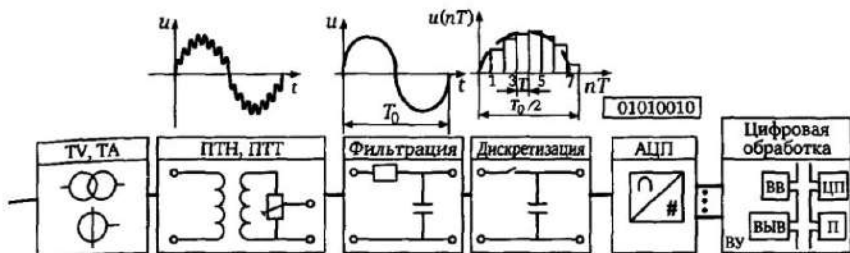


Рис. 2.3. Цифровая обработка сигналов в ЦРЗ

решения, характеризуемые выходными сигналами  $u_1—u_q$ . Процесс цифровой обработки сигналов показан на рис. 2.3.

### 2.1.2. Предварительная обработка аналоговых сигналов

Цифровая дискретизация сигналов с определенным периодом дискретизации  $T$  (рис. 2.3) накладывает определенные требования к форме, а, следовательно, к частотному спектру аналогового сигнала, подлежащего дискретизации.

Очевидно, что при дискретизации сигнала, содержащего быстро изменяющиеся во времени составляющие, может произойти частичная потеря информации, если период дискретизации  $T$  будет слишком большим. Так, информация содержащаяся в цифровых значениях функции  $u(nT)$ , значительно искажена по отношению к дискретизируемой гладкой функции  $u(t)$  при периоде дискретизации  $T = T_1$  (рис. 2.4,а) и значительно меньше

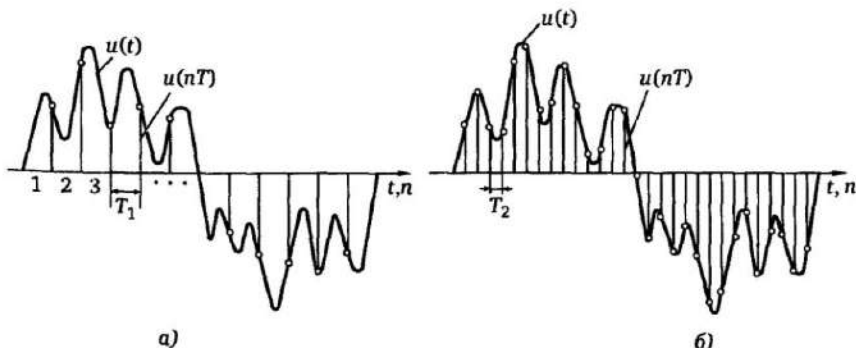


Рис. 2.4. Дискретизация аналогового сигнала

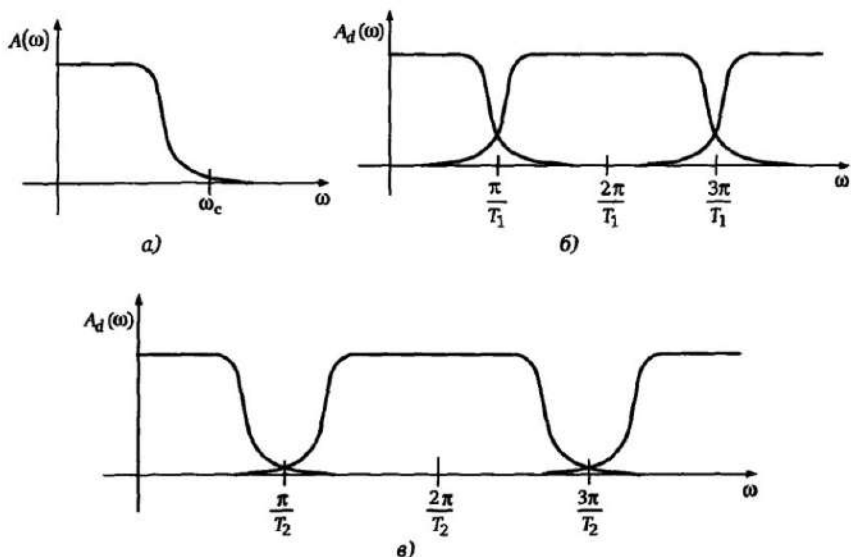


Рис. 2.5. Частотные характеристики аналогового (а) и соответствующего дискретизированного (б и в) сигналов при различных периодах дискретизации

искажена при меньшем периоде дискретизации  $T = T_2$  (рис. 2.4,б).

Каждый аналоговый сигнал характеризуется частотным спектром  $A(\omega)$ , определяющим относительный уровень различных частотных составляющих, входящих в него (рис. 2.5,а).

Так, в сигнале с частотным спектром по рис. 2.5,а все составляющие с частотами, большими частоты среза  $\omega_c = 2\pi f_c$ , практически отсутствуют.

При дискретизации аналогового сигнала в соответствии со свойствами дискретных систем его частотные характеристики  $A_d(\omega)$  являются периодическими (рис. 2.5,б,в), причем характеристика  $A_d(\omega)$  зависит от периода дискретизации  $T$  следующим образом:

$$A_d(\omega) = A(\omega + 2\pi r/T); r = 0, 1, 2, \dots$$

При  $r = 0$  (отсутствие дискретизации) имеем частотную характеристику аналогового сигнала  $A(\omega)$  — рис. 2.5,а.

Критерием отсутствия искажения аналогового сигнала при дискретизации является отсутствие существенного наложения спектров характеристики  $A_d(\omega)$ , что выполняется для случая

$T = T_2$  (рис. 2.5,в) и не выполняется при  $T_1 > T_2$  (рис. 2.5,б).

Таким образом, если  $f_c = \omega_c/2\pi$  — верхняя граница существенного диапазона частот обрабатываемого аналогового сигнала (составляющие с частотами  $f > f_c$  практически отсутствуют),  $f_d = 1/T$  — частота дискретизации, то условие отсутствия наложения спектров имеет вид  $f_c < f_d/2$ , откуда имеем:

$$T < 1/2f_c. \quad (2.1)$$

Физически условие (2.1) означает, что для обеспечения отсутствия существенных искажений в обрабатываемой ЦИО аналоговой информации период дискретизации должен быть, по крайней мере, в 2 раза меньше, чем период максимальной по частоте гармонической составляющей в аналоговом сигнале. Если период дискретизации в ЦИО задан, то параметры аналоговых фильтров (рис. 2.1—2.3) должны быть таковы, чтобы обеспечить существенное подавление сигнала в диапазоне частот  $f > 1/2T$ .

### 2.1.3. Векторное отображение дискретизированных синусоидальных сигналов

Основными объектами, для которых используется релейная защита, являются электроэнергетические системы, содержащие элементы, генерирующие, передающие и потребляющие электрическую энергию в виде синусоидального переменного тока.

Для описания синусоидальных величин, проведения расчетов коротких замыканий, выбора уставок и характеристик релейной защиты в энергетике широко используется векторное отображение синусоидально изменяющихся электрических величин, при котором сигналу  $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$  соответствует вектор  $\underline{X}(t) = A e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$  равномерно вращающийся с угловой частотой  $\omega_0$  против часовой стрелки. Проекция этого вектора в любой момент времени на ось ординат  $j$  соответствует мгновенному значению сигнала  $x(t)$ . Для удобства рассмотрения и вычислений вращающийся вектор «останавливают», умножая его на  $e^{-j\omega_0 t}$ . При этом любому из синусоидальных сигналов  $A \sin(\omega_0 t + \varphi)$  соответствует неизменный во времени вектор

$$\underline{A} = A e^{j\varphi} = A \cos\varphi + jA \sin\varphi = A_x + jA_y.$$

Проекция  $A_y = A \sin\varphi$  этого вектора на мнимую ось равна мгновенному значению  $x(t)$  при  $t = 0$ . С помощью векторного

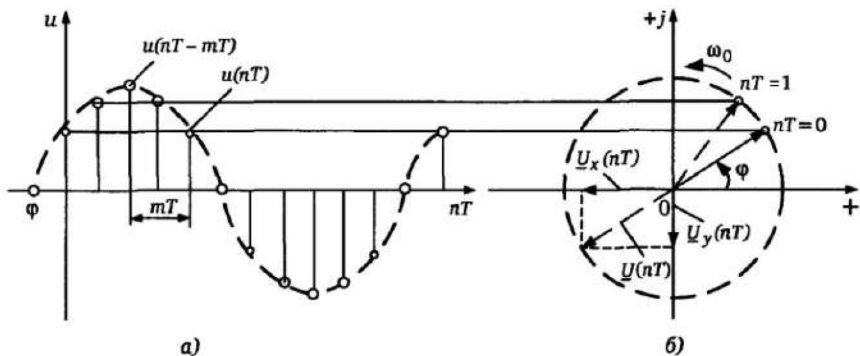


Рис. 2.6. Синусоидальная величина (а) и соответствующий ей вращающийся вектор (б)

отображения удобно рассматривать амплитудные и фазовые соотношения (параметры  $A$ ,  $\varphi$ ) между синусоидальными сигналами переменного тока, ввиду того, что основные операции с этими сигналами (сложение, умножение и т.д.) достаточно просто описываются такими же операциями с векторами, соответствующими этим сигналам.

Указанный метод применим и к дискретизированным цифровым сигналам (рис. 2.6), являющимися цифровыми выборками  $u(nT)$ ,  $i(nT)$  аналоговых синусоидальных сигналов переменного тока  $u(t)$ ,  $i(t)$ :

$$u(nT) = U \sin(\omega_0 nT + \varphi_u); \quad i(nT) = I \sin(\omega_0 nT + \varphi_i). \quad (2.2)$$

Таким образом, дискретизированные синусоидальные сигналы могут быть представлены вращающимися векторами вида:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}(nT) &= U e^{j(\omega_0 nT + \varphi_u)} = U_x(nT) + jU_y(nT); \\ \underline{I}(nT) &= I e^{j(\omega_0 nT + \varphi_i)} = I_x(nT) + jI_y(nT), \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

проекции которых на мнимую ось в моменты  $t = 0, 1, 2, \dots, n$  соответствуют цифровым выборкам величин  $u(t)$  и  $i(t)$ .

При «останове» вращающихся векторов путем умножения на  $e^{-j\omega_0 nT}$  имеем вектора, не зависящие от времени:  $\underline{U} = U_x + jU_y$ ,  $\underline{I} = I_x + jI_y$  для любого дискретного момента времени  $t = 0, T, 2T, \dots, nT$ .

В реальных условиях в силу специфических свойств цифрового

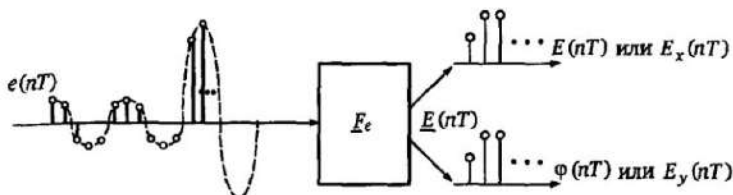


Рис. 2.7. Функционирование алгоритма вычисления вектора  $\underline{E}(nT)$ , соответствующего величине  $e(nT)$

преобразования сигналов, как будет показано ниже, измеряемые цифровые значения «остановленных» векторов могут также в определенной степени зависеть от моментов времени. Поэтому в общем случае сигналы переменного тока в дальнейшем отображаются векторами:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}(nT) &= U_x(nT) + jU_y(nT) = U(nT)e^{j\varphi_u(nT)}; \\ \underline{I}(nT) &= I_x(nT) + jI_y(nT) = I(nT)e^{j\varphi_i(nT)}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Вычисление текущего вектора  $\underline{E}(nT)$ , соответствующего дискретизированной величине  $e(nT) = E \sin(\omega_0 nT + \varphi)$  поясняет рис. 2.7. При этом в общем случае

$$\underline{E}(nT) = E(nT)e^{j\varphi(nT)} = E_x(nT) + jE_y(nT),$$

где  $E_x(nT)$  и  $E_y(nT)$  — текущие ортогональные составляющие вектора  $\underline{E}(nT)$ .

Следует отметить, что векторное преобразование дискретизированных сигналов является основным, но не единственным возможным способом цифрового измерения величин, используемых в релейной защите. Существуют алгоритмы преобразования, использующие непосредственно мгновенные значения величин тока и напряжения, например быстродействующие амплитудные реле, вывигатели приращения величин и т.д.

## 2.2. Алгоритмы цифрового преобразования сигналов релейной защиты

### 2.2.1. Общие сведения

В аналоговых устройствах защиты различных принципов выполнения измерение параметров контролируемых синусоидальных величин ЭС (амплитуд токов и напряжений, сдвига фаз) осуществляется путем воздействия непрерывных аналоговых сигналов, зависящих от входных токов и напряжений, на физическую систему (индукционную, электромагнитную, полупроводниковую и т. д.). По результату этого воздействия оценивается нахождение контролируемых параметров сигналов ЭС в заданной области (в частности, замыкание контакта электромагнитного реле тока, обусловленное поворотом якоря, соответствует при синусоидальном токе превышению его действующим значением заданного значения уставки).

В ЦИО основные операции производятся не с аналоговыми сигналами, а с временными последовательностями чисел, соответствующими дискретным сигналам (см. рис. 2.3), полученным при цифровой обработке входных аналоговых сигналов.

*Алгоритмом ЦИО является последовательность операций с цифровыми сигналами, зависящими от входных аналоговых сигналов, обеспечивающая измерение контролируемых параметров электрической системы или оценку их нахождения в заданной области.*

Алгоритм ЦИО может описываться операциями с цифровыми или дискретизированными аналоговыми сигналами. В дальнейшем, рассматривая аналоговые сигналы и цифровые последовательности, примем следующие обозначения:

$u(t)$  — обобщенный аналоговый сигнал;

$u(nT)$  — последовательность чисел, возникающих в моменты времени  $t = nT$  ( $-\infty < n < \infty$ ), где  $n$  — целое число;

$T$  — период дискретизации (время между двумя соседними выборками);

$f_0$  — основная (промышленная) частота синусоидальных сигналов в ЭС;

$\omega_0 = 2\pi f_0$  — угловая основная частота;

$T_0 = 2\pi/\omega_0$  — период основной частоты;

$N = T_0/T$  — число выборок за период основной частоты.

При графическом изображении алгоритмов будем использовать



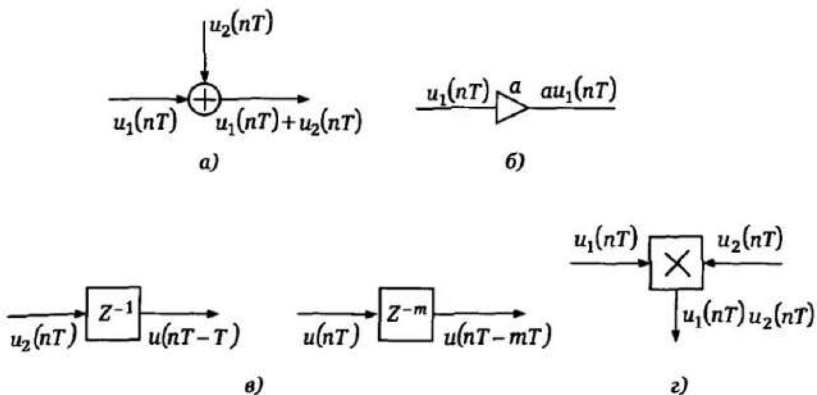


Рис. 2.8. Обозначение основных операций в цифровых цепях

обозначения, приведенные на рис. 2.8, где представлены операции: суммирования двух цифровых последовательностей (рис. 2.8,а); умножения последовательности на постоянный коэффициент  $a$  (рис. 2.8,б); запоминания предшествующих величин последовательности, т.е. задержка последовательности на один или на  $n$  периодов дискретизации  $T$  (рис. 2.8,в); умножения последовательностей (рис. 2.8,г).

### 2.2.2. Вычисление средних и действующих значений сигналов

Текущее среднее значение модуля  $U_{\text{cp}}(t)$  функции  $u(t)$  и действующее значение  $U(t)$  за период времени  $T_0$  определяются соответственно по известным формулам:

$$U_{\text{cp}}(t) = \frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t |u(t)| dt; \quad (2.5)$$

$$U(t) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t u^2(t) dt}. \quad (2.6)$$

С учетом (2.5) и (2.6) и принятых выше обозначений для дискретизированных цифровых сигналов  $u(nT)$  имеем:

$$U_{\text{ср}}(nT) = \frac{1}{T_0} \sum_{n-T_0+1}^n |u(nT)|T = \frac{1}{N} \sum_{n-T_0+1}^n |u(nT)|; \quad (2.7)$$

$$U(nT) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{n-T_0+1}^n u^2(nT)T} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n-T_0+1}^n u^2(nT)}. \quad (2.8)$$

### 2.2.3. Вычисление векторов на основе мгновенных значений величин и их производных

В основу рассматриваемых алгоритмов положена возможность определения амплитуды  $U$  и фазы  $\varphi$  вектора, соответствующего синусоидальному сигналу  $u(t) = U \sin(\omega_0 t + \varphi)$  известной частоты  $\omega_0$  по известному в произвольный момент времени  $t$  мгновенному значению сигнала  $u(t)$  и его производных  $u'(t)$  и  $u''(t)$ .

Решая совместно уравнения для  $u(t)$  и  $u'(t) = \omega_0 U \cos(\omega_0 t + \varphi)$ , содержащих два неизвестных:  $U$  и  $\varphi$ , получим для любого момента:

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{u^2(t) + \left[ \frac{u'(t)}{\omega_0} \right]^2}; \\ \omega_0 t + \varphi &= \arctg \frac{\omega_0 u(t)}{u'(t)}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

На основе соотношений (2.9) можно теоретически мгновенно определить в любой момент времени  $t$  амплитуду и фазу синусоидального сигнала частоты  $\omega_0$ . Практически такой алгоритм в чистом виде не применяется, ввиду больших погрешностей, вносимых неточностью измерения производной сигнала и наличием сигналов помех. Однако усреднение измерения благодаря использованию нескольких выборок делает алгоритм работоспособным. Решая систему уравнений (2.9), получим значения  $U$  и  $\varphi$ , соответствующие вращающемуся с угловой частотой  $\omega_0$  вектору, имеющему амплитуду  $U$  и начальный угол  $\varphi$  (рис. 2.6) с вещественной частью  $u'(t)/\omega_0$  и мнимой частью  $u(t)$ , который можно представить в виде

$$\underline{U}(t) = Ue^{j\varphi}e^{j\omega_0 t} = \underline{U}e^{j\omega_0 t} = \frac{u'(t)}{\omega_0} + ju(t). \quad (2.10)$$

На основе выражения (2.10) возможно получение ряда алгоритмов, определяющих вектор  $\underline{U}(nT) = U(nT)e^{j\varphi(nT)}$ , соответствующий дискретизированному сигналу  $u(nT) = U(\sin\omega_0 nT + \varphi)$ .

**Алгоритм А1.** Используя  $n$ -ю  $u(nT)$  и предыдущую  $u(nT - T)$  выборку, принимаем в первом приближении:

$$u(t) = u(nT); \quad u'(t) = \frac{1}{T}[u(nT) - u(nT - T)]. \quad (2.11)$$

В этом случае, учитывая, что  $\omega_0 T = \omega_0 T_0 / N = 2\pi / N$ , подставляя значения  $u(t)$  и из (2.11) в (2.10) получим:

$$\underline{U}(nT) = \left( \frac{N}{2\pi} + j \right) u(nT) - \frac{N}{2\pi} u(nT - T). \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) определяет алгоритм вычисления вектора  $\underline{U}(nT) = U_x(nT) + U_y(nT)$  по текущим мгновенным значениям  $u(nT)$ . Отметим, что даже при синусоидальном сигнале данный алгоритм не является точным, вследствие приближенного вычисления производной сигнала в выражении (2.11) по двум выборкам при промежутке времени  $T$ .

**Алгоритм А2.** Используя, например, три текущих выборки

$$u(nT) = u(nT - T); \quad u'(t) = \frac{u(nT) - u(nT - 2T)}{2T}, \quad (2.13)$$

с учетом (2.10) можно получить уточненный алгоритм А2:

$$\underline{U}(nT) = \frac{N}{4\pi} u(nT) + ju(nT - T) - \frac{N}{4\pi} (nT - 2T). \quad (2.14)$$

Порядком алгоритма назовем число используемых в нем сдвигов последовательностей. В частности, соотношение (2.12) определяет алгоритм первого порядка, так как при вычислениях используется последовательность  $u(nT - T)$ , являющаяся сдвигом  $u(nT)$  на один период дискретизации  $T$ . Выражение (2.14) определяет с учетом этого алгоритм второго порядка. С учетом обозначений рис. 2.8 алгоритм первого порядка по выражению

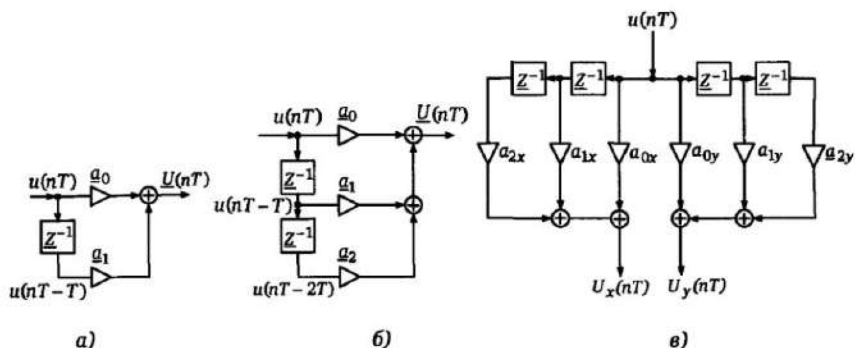


Рис. 2.9. Структурные схемы алгоритмов при операциях с комплексными (а, б) и действительными (в) последовательностями

(2.12) представляется структурной схемой (рис. 2.9,а), где в общем случае комплексные коэффициенты равны:

$$\underline{a}_0 = \frac{N}{2\pi} + j; \quad \underline{a}_1 = -\frac{N}{2\pi}.$$

Для алгоритма второго порядка по выражению (2.14) имеем структурную схему на рис. 2.9,б, где

$$\underline{a}_0 = \frac{N}{2\pi}; \quad \underline{a}_1 = j; \quad \underline{a}_2 = -\frac{N}{4\pi}.$$

При использовании последовательностей действительных чисел, соответствующих ортогональным составляющим векторов  $U_x(nT)$  и  $U_y(nT)$ , структурная схема алгоритма второго порядка, например по выражению (2.14), имеет вид рис. 2.9,в, где:

$$a_{0x} = \frac{N}{4\pi}; \quad a_{1x} = 0; \quad a_{2x} = -\frac{N}{4\pi}; \quad a_{0y} = 0; \quad a_{1y} = 1; \quad a_{2y} = 0.$$

#### 2.2.4. Алгоритм двух выборов

Рассмотренные выше алгоритмы вследствие приближенного вычисления производных не обеспечивают точного измерения векторов даже при  $\omega = \omega_0$ . Алгоритм, обеспечивающий точное измерение вращающегося вектора  $\underline{U}(t) = Ue^{j(\varphi_0 + \varphi)}$  на основе двух

выборки  $u(nT - mT)$ ,  $u(nT)$  синусоидального сигнала известной частоты  $\omega_0$ , взятых через время  $mT$ , определится совместным решением двух уравнений, составленных для этих выборок (см. рис. 2.6,а):

$$\left. \begin{aligned} u(nT - mT) &= U \sin(\omega_0 nT + \varphi - \omega_0 mT); \\ u(nT) &= U \sin(\omega_0 nT + \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Из (2.15) получим точное значение амплитуды  $U$  измеряемого сигнала по известным двум выборкам:

$$U = \frac{1}{|\sin \omega_0 nT|} \sqrt{[u(nT - mT)]^2 - 2[u(nT - mT)][u(nT)] \cos \omega_0 mT + [u(nT)]^2}.$$

Цифровое преобразование, обеспечивающее получение вектора по двум выборкам синусоидальной величины  $U \sin(\omega_0 t + \varphi)$ , взятым через  $m$  циклов, имеет вид:

$$\underline{U}(nT) = \frac{1}{|\sin \omega_0 mT|} [u(nT)e^{j\omega_0 mT} - u(nT - mT)] = U_x(nT) + jU_y(nT). \quad (2.16)$$

Указанное легко проверить подстановкой в (2.16)  $u(nT) = U \sin(\omega_0 nT + \varphi)$  и  $u(nT - mT) = U \sin[\omega_0(nT - mT) + \varphi]$ , дающей  $\underline{U}(nT) = U e^{j(\omega_0 nT + \varphi)} = U_x(nT) + jU_y(nT)$  — вектор с начальным углом  $\varphi$  (при  $nT = 0$ ) постоянной амплитуды  $U$ , вращающийся относительно начала координат с угловой скоростью  $\omega_0$  (см. рис. 2.6,б). Для вычисления амплитуды произвольного вектора  $\underline{U}(nT)$  и фазового сдвига между векторами  $\underline{U}_1(nT)$  и  $\underline{U}_2(nT)$ , соответствующими синусоидальным сигналам частоты  $\omega_0$ , достаточно в любой момент  $nT$  выполнить преобразования:

$$\begin{aligned} U(nT) &= \sqrt{[U_x(nT)]^2 + [U_y(nT)]^2}; \\ \Delta\varphi &= \arctg \frac{U_{2y}}{U_{2x}} - \arctg \frac{U_{1y}}{U_{1x}}. \end{aligned}$$

В наиболее распространенном частном случае при  $\omega_0 mT = \pi/2$ , т.е. при  $m = N/4$ , из (2.16) имеем  $\underline{U}(nT) = ju(nT) - u(nT - NT/4)$ , откуда:

$$U(nT) = u^2(nT) + u^2(nT - NT/4), \quad (2.17)$$

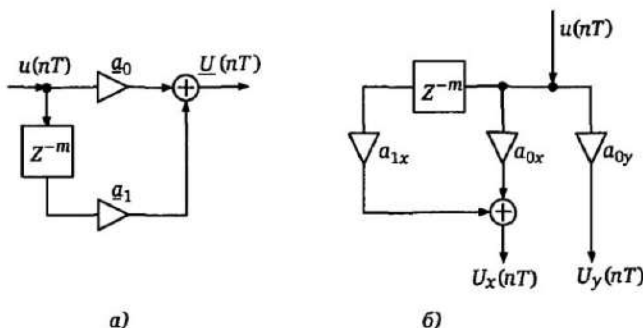


Рис. 2.10. Структура алгоритма двух выборок для последовательностей комплексных (а) и действительных (б) чисел

т.е. для определения квадрата амплитуды синусоидального сигнала достаточно сложения квадратов двух выборок, взятых через  $N/4$  циклов. Структура алгоритма (2.16) для последовательности комплексных чисел приведена на рис. 2.10,а, а для двух последовательностей действительных чисел — на рис. 2.10,б, где при  $\beta = \omega_0 mT$  имеем  $a_0 = a_{0x} + ja_{0y} = e^{j\beta}/\sin\beta = \text{ctg}\beta + j$ ;  $a_1 = a_{1x} = -1/\sin\beta$ ;  $Z^{-m}$  — блок задержки последовательностей на  $m$  циклов дискретизации.

Отметим, что при периоде дискретизации  $T \rightarrow 0$  ( $N \rightarrow \infty$ ) алгоритм двух выборок переходит в алгоритм (2.10) выборки и производной.

Другим практически важным применением алгоритма двух выборок является расчет вектора сопротивления  $Z$ . Выражения для входного сопротивления на основе алгоритма двух выборок, взятых через  $m$  циклов, аналогичны (2.16). Обозначив  $u(nT - mT) = u_1$ ;  $u(nT) = u_2$ ;  $i(nT - mT) = i_1$ ;  $i(nT) = i_2$ , из (2.16) получим:

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{U(nT)}{I(nT)} = \frac{u_2 e^{j\beta} - u_1}{i_2 e^{j\beta} - i_1} = R + jX; \\ \beta &= \omega_0 mT; \\ R &= \frac{u_1 i_1 - (u_1 i_2 + u_2 i_1) \cos\beta + u_2 i_2}{i_1^2 - 2i_1 i_2 \cos\beta + i_2^2}; \\ X &= \frac{(u_1 i_2 - u_2 i_1) \sin\beta}{i_1^2 - 2i_1 i_2 \cos\beta + i_2^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

В частном случае при  $m = N/4$  ( $\beta = \pi/2$ ) имеем из (2.18):

$$R = \frac{u_1 i_1 + u_2 i_2}{i_1^2 + i_2^2}; \quad X = \frac{u_1 i_2 - u_2 i_1}{i_1^2 + i_2^2}.$$

Алгоритмы по выражениям (2.12), (2.14), (2.16) являются наиболее распространенными примерами класса алгоритмов, позволяющего на основе выборок сигналов  $u(t)$ ,  $i(t)$  определить параметры соответствующих векторов тока  $\underline{I}(nT)$  и напряжения  $\underline{U}(nT)$ . Рассмотренные алгоритмы являются быстродействующими (теоретически результат может быть получен за время периода дискретизации  $T$  между двумя выборками). Однако при отличии сигналов от синусоидальных эти алгоритмы имеют низкую точность. Поэтому при их практическом применении целесообразна предварительная цифровая фильтрация сигналов. Частотные характеристики данных алгоритмов рассмотрены в гл. 3.

### 2.2.5. Алгоритмы на основе дифференциального уравнения линии

Для любой  $R, L$ -цепи, в том числе и воздушной линии, в общем случае для любого момента времени справедливо дифференциальное уравнение

$$u = Ri + \frac{X}{\omega_0} i', \quad (2.19)$$

где  $u$ ,  $i$  — мгновенные значения тока и напряжения;  $X/\omega_0$  — индуктивность линии;  $i'$  — производная тока.

Если  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $i_1'$  и  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $i_2'$  — значения величин на входе ЦИО соответственно в любые два момента времени, то, решив на основе (2.19) систему двух уравнений, имеем составляющие сопротивления  $\underline{Z} = R + jX$  на входе ЦИО:

$$R = \frac{u_1 i_2' + u_2 i_1'}{i_1 i_2' - i_2 i_1'}; \quad \frac{X}{\omega_0} = \frac{i_1 u_2 - i_2 u_1}{i_1 i_2' - i_2 i_1'}. \quad (2.20)$$

Достоинством данного алгоритма является независимость результатов от формы сигнала, т.е. от аperiodических составляющих в токе и напряжении, возникающих при КЗ на воздушной

линии, описываемой уравнением (2.19), недостатками — малая точность вследствие использования только двух выборок сигнала, неправильное измерение при наличии дуги в месте повреждения, подверженность влиянию помех.

Для практического применения данного алгоритма необходима предварительная цифровая фильтрация сигналов  $u$  и  $i$  (см. гл.3). При этом операции цифровой фильтрации могут производиться непосредственно с составляющими уравнений. В частности, почленное интегрирование уравнения (2.19) в пределах от  $t_1$  до  $t_1 + \Delta t_1$  и от  $t_2$  до  $t_2 + \Delta t_2$  соответствует следующей системе с двумя неизвестными [11]:

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} u dt = R \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i dt + \frac{X}{\omega_0} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} di; \\ \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} u dt = R \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i dt + \frac{X}{\omega_0} \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} di, \end{aligned} \right\}$$

которая может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} S_{1u} = RS_{1i} + \frac{X}{\omega_0} S'_{1i}; \\ S_{2u} = RS_{2i} + \frac{X}{\omega_0} S'_{2i}. \end{aligned} \right\}$$

Решение этой системы имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} R = \frac{S_{1u}S'_{2i} - S_{2u}S'_{1i}}{S_{1i}S'_{2i} - S_{2i}S'_{1i}}; \\ \frac{X}{\omega_0} = \frac{S_{1i}S_{2u} - S_{1u}S_{2i}}{S_{1i}S'_{2i} - S_{2i}S'_{1i}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

### 2.2.6. Алгоритмы ЦИО на основе выделения составляющих ортогональных функций

Данную группу алгоритмов ЦИО характеризует наличие фильтрующих свойств в самих преобразованиях, заключающихся в выделении из сигналов составляющих взаимно ортогональных функций (тригонометрических с разложением в ряд Фурье, прямоугольных Уолша, трапецидальных и т.д.).



В частности для выделения коэффициентов  $a$  и  $b$  первой гармонической ряда Фурье  $u_0(t) = a\cos\omega_0 t + b\sin\omega_0 t$  функции  $u(t)$  цифровой преобразователь должен реализовать к моменту времени  $t$  алгоритм:

$$a = \frac{2}{T} \int_{t-T_0}^t f(t) \cos\omega_0 t dt; \quad b = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \sin\omega_0 t dt,$$

где  $a$  и  $b$  — ортогональные составляющие вектора  $\underline{F}(t) = F_x(t) + jF_y(t)$ , характеризующего синусоидальную составляющую  $u_0(t)$  с частотой  $\omega_0$ :

$$\underline{F}(t) = j(a - jb) = \frac{2j}{T_0} \int_{t-T_0}^t u(t) e^{-j\omega_0 t} dt. \quad (2.22)$$

Выражение (2.22) характеризует алгоритм Фурье для идеального случая «гладкой» функции  $u(t)$  ( $N = \infty$ ), сопоставляющий несинусоидальный сигнал  $u(t)$  с вектором  $\underline{F}(t)$ , соответствующим гармонической составляющей частоты  $\omega_0$  в сигнале  $u(t)$ .

При наличии на входе цифрового преобразователя синусоидального сигнала  $u_0(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$  частоты  $\omega_0$  из (2.22) после преобразований имеем:

$$\underline{F}(t) = \frac{2j}{T_0} \int_{t-T_0}^t U_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0) e^{-j\omega_0 t} dt = U_0 e^{j\psi_0},$$

т.е. синусоидальный сигнал частоты  $\omega_0$  алгоритм Фурье сопоставляет с постоянным во времени вектором. Для дискретизированных сигналов с числом выборок  $N$  за период в простейшем случае ступенчатой интерполяции значения функции  $u(nT)$  принимаются постоянными в течение периода дискретизации  $T$ . В этом случае с учетом (2.22) к моменту времени  $t = nT$  при  $T_0/T = N$  имеем:

$$\underline{F}(nT) = \frac{2j}{NT} \sum_{n-N+1}^n u(nT) e^{-j\omega_0 nT} T = \frac{2j}{N} \sum_{n-N+1}^n u(nT) e^{-j\omega_0 nT}. \quad (2.23)$$

В выражении (2.23) на любом шаге расчета используется  $N$  выборок величины  $u(nT)$  — от  $u(nT - NT + T)$  до  $u(nT)$ . Подстановка в (2.23) значения

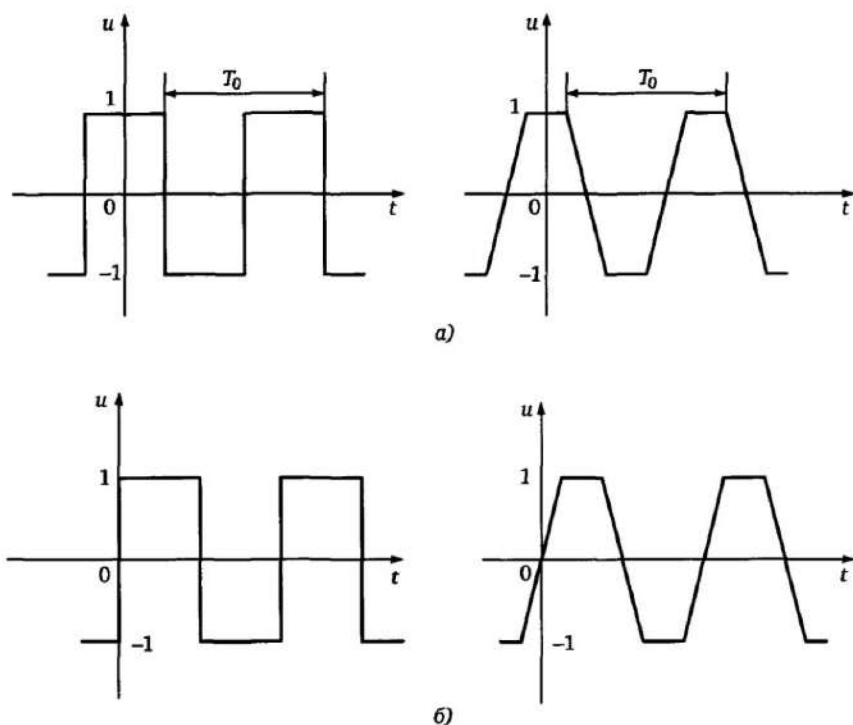


Рис. 2.11. Ортогональные прямоугольные (а) и трапецеидальные (б) четная и нечетная функции

$$u(nT) = \sin(\omega_0 nT + \psi) = \frac{1}{2j} \left[ e^{j(\omega_0 nT + \psi)} - e^{-j(\omega_0 nT + \psi)} \right]$$

при любых  $N \geq 2$  дает  $F(nT) = e^{j\psi}$ , т.е. и в этом случае синусоидальному дискретизированному сигналу соответствует постоянный во времени вектор.

Так же, как и при использовании алгоритма Фурье, при других возможных разложениях на ортогональные функции происходит фильтрация входного сигнала, обеспечивающая выделение из входных сигналов ортогональных составляющих, но уже не синусоидальных, а прямоугольных или трапецеидальных (рис. 2.11).

Алгоритм фильтрации обеспечивается методом свертки на интервале  $T_0 = NT$  входного сигнала  $u(t)$  с четными и нечетными ортогональными функциями.

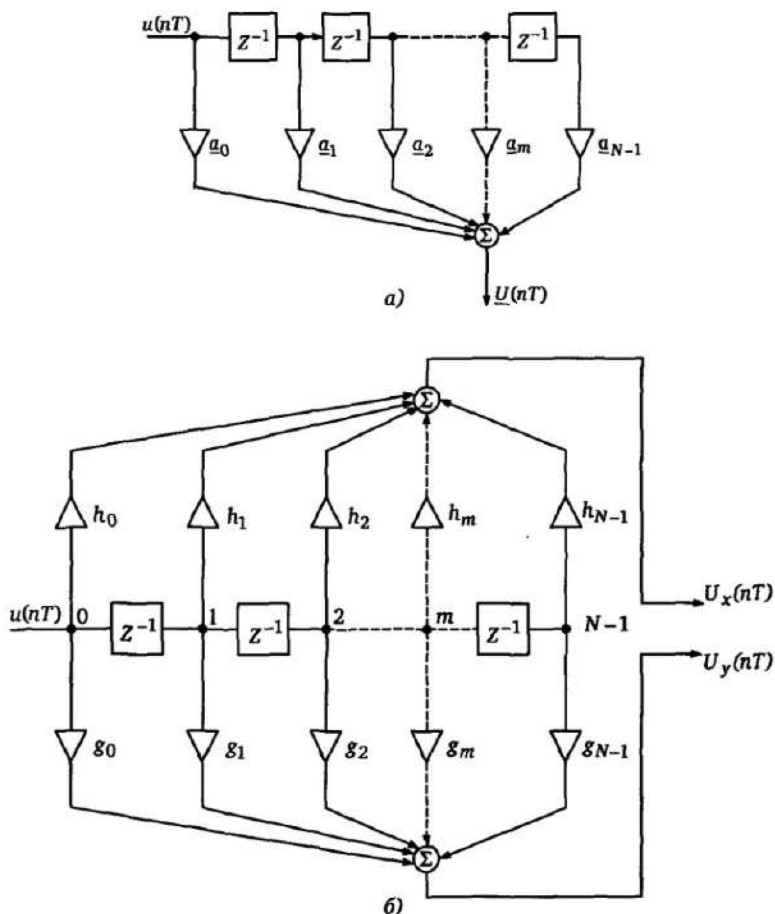


Рис. 2.12. Структура алгоритма Фурье с комплексными (а) и действительными (б) коэффициентами

Структура алгоритма Фурье с комплексными коэффициентами приведена на рис. 2.12,а. При этом комплексные коэффициенты  $a_0$ — $a_{N-1}$  равны:

$$\underline{a}_0 = e^{-j\omega_0(N-1)T}; \quad \underline{a}_1 = e^{-j\omega_0(N-2)T}; \quad \dots; \quad \underline{a}_{N-2} = e^{-j\omega_0 T}; \quad \underline{a}_{N-1} = e^0 = 1.$$

Обычно используются отдельные фильтры для выявления ортогональных составляющих измеряемого вектора  $\underline{F}(nT) = F_x(nT) + jF_y(nT)$ , тогда, с учетом выражения (2.23), имеем

$$\underline{F}(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=N+1}^n u(nT) \sin \omega_0 nT + j \frac{2}{N} \sum_{n=N+1}^n u(nT) \cos \omega_0 nT. \quad (2.24)$$

В этом случае для выявления ортогональных составляющих вектора используются два отдельных алгоритма с действительными коэффициентами  $h_n, g_n$  (рис. 2.12,б):

$$h_0 = \sin \omega_0(n-1)T; h_1 = \sin \omega_0(n-2)T; \dots; h_{N-1} = 0; \\ g_0 = \cos \omega_0(n-1)T; g_1 = \cos \omega_0(n-2)T; \dots; g_{N-1} = 1.$$

Выше в качестве примера были рассмотрены простейшие алгоритмы цифровой обработки сигналов для релейной защиты. Существует значительное разнообразие алгоритмов цифровой обработки сигналов. Их общие свойства и характеристики рассматриваются в гл. 3.

### 2.3. Измерительные органы одной электрической величины

Цифровые измерительные органы тока и напряжения выполняются на основе сравнения вычисленного цифровым измерителем тока  $F_i$  или напряжения  $F_u$  текущего значения контролируемой величины (амплитуды или действующего значения) со значением уставки, задаваемой компаратором  $K$  (рис. 2.13,а). Органы с зависимой от тока выдержкой времени строятся с использованием блока формирования времятоковой характеристики БФХ (рис. 2.13,б).

Как известно, любую несимметричную систему, состоящую из трех векторов, например токов  $I_A, I_B, I_C$ , можно представить как совокупность трех симметричных систем прямой (индекс 1), об-

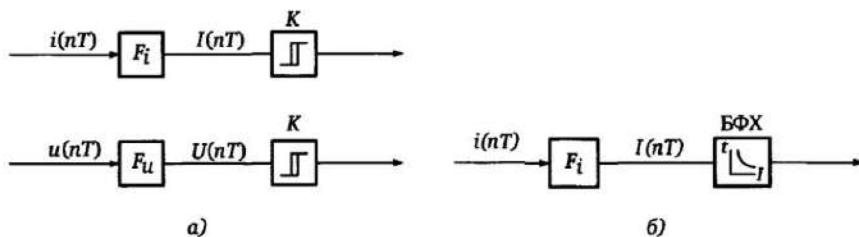


Рис. 2.13. Структура ЦИО, реагирующих на значение тока и напряжения

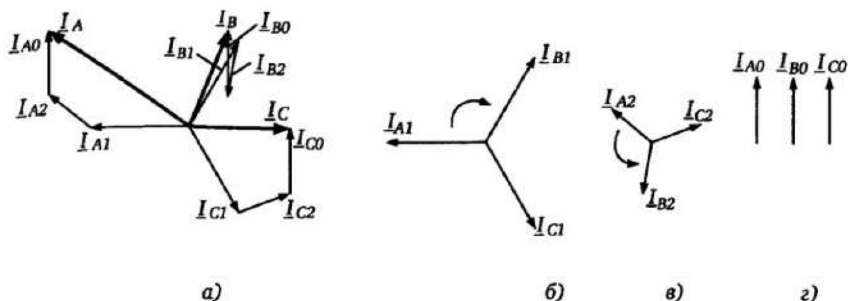


Рис. 2.14. Трехфазная система токов (а) и её симметричные составляющие систем прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей

ратной (индекс 2) и нулевой (индекс 0) последовательностей (рис. 2.14).

Указанное соответствует соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0} = a^2 \underline{I}_{A1} + a \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0} = a \underline{I}_{A1} + a^2 \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}; \\ a &= e^{j120^\circ} = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Системы прямой и обратной последовательностей образуются тремя векторами с одинаковыми амплитудами, сдвинутыми на  $120^\circ$  соответственно с прямым (вектор  $\underline{I}_{B1}$  отстает от вектора  $\underline{I}_{A1}$  на  $120^\circ$ ) и обратным (вектор  $\underline{I}_{B2}$  опережает вектор  $\underline{I}_{A2}$  на  $120^\circ$ ) чередованием фаз. Векторы нулевой последовательности имеют одинаковые фазы.

Составляющие отдельных последовательностей можно легко вычислять на основе соотношений, получаемых из (2.25):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{A1} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a \underline{I}_B + a^2 \underline{I}_C); \\ \underline{I}_{A2} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C); \\ \underline{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C). \end{aligned} \right\} \quad (2.25 a)$$

Измерительные органы симметричных составляющих тока  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  и напряжения  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{U}_0$  фазы А с учетом (2.25а) строятся путем дополнительных вычислительных операций с полученными текущими цифровыми значениями фазных токов  $I_A(nT)$ ,  $I_B(nT)$ ,  $I_C(nT)$  или фазных напряжений  $\underline{U}_A(nT)$ ,  $\underline{U}_B(nT)$ ,  $\underline{U}_C(nT)$ . В частности, для симметричных составляющих тока отдельных последовательностей фазы А из (2.25 а) имеем (индекс А опущен):

$$\left. \begin{aligned} I_1(nT) &= \frac{1}{3} [I_A(nT) + aI_B(nT) + a^2I_C(nT)] = I_{1x}(nT) + jI_{1y}(nT); \\ I_2(nT) &= \frac{1}{3} [I_A(nT) + a^2I_B(nT) + aI_C(nT)] = I_{2x}(nT) + jI_{2y}(nT); \\ I_0(nT) &= \frac{1}{3} [I_A(nT) + I_B(nT) + aI_C(nT)] = I_{0x}(nT) + jI_{0y}(nT). \end{aligned} \right\} (2.25 б)$$

Структура ЦИО, измеряющего ток обратной последовательности и реализующего условия  $|I_2(nT)| \geq C$ , приведена на рис. 2.15,а, где  $C$  — порог компаратора  $K$ .

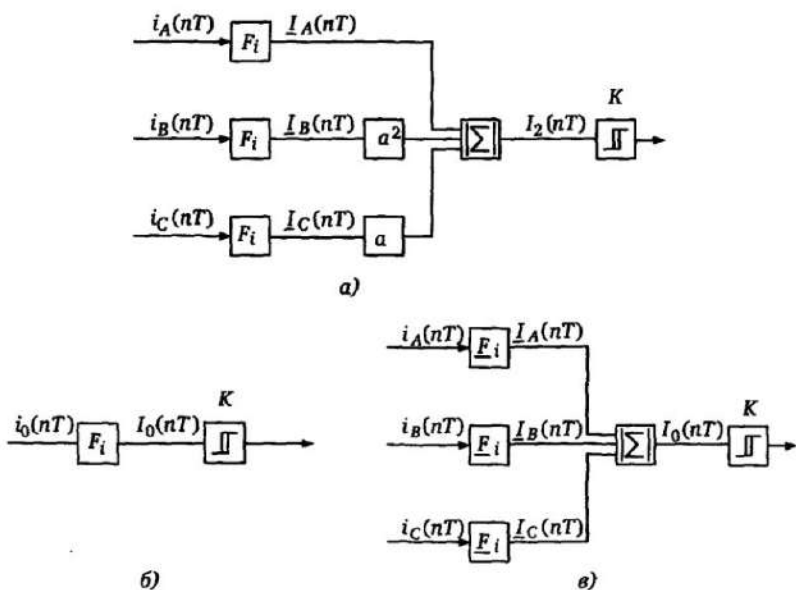


Рис. 2.15. Структуры ЦИО на основе измерения симметричных составляющих тока

Для ЦИО, измеряющих ток нулевой последовательности  $i_0$ , возможно непосредственное измерение тока нулевой последовательности, протекающего в нулевом проводе звезды вторичных токов или в цепи трансформатора тока нулевой последовательности (см. рис. 4.1). Для этого защита должна иметь отдельные вход и канал измерения  $i_0$  (рис. 2.15,б). Во многих случаях используется более простое решение, когда вектор  $I_0(nT)$  измеряется косвенным путем (рис. 2.15,в) — суммированием вычисленных значений векторов разных токов на основе выражения (2.25 б).

Аналогичные структуры используются для вычисления симметричных составляющих напряжения.

Принципиальным отличием фильтровых ЦИО прямой и обратной последовательностей от аналоговых фильтровых измерительных органов является отсутствие фазосдвигающих элементов, так как используются только математические вычисления на основе соотношений (2.25 б).

## 2.4. Цифровые измерительные органы направления мощности

### 2.4.1. Характеристики срабатывания

Направление мощности определяется углом  $\varphi$  между векторами напряжения  $\underline{U}$  и тока  $\underline{I}$ . Этот угол характеризует направление мощности при КЗ и зависит от расположения места КЗ относительно места установки защиты. Указанное поясняет рис. 2.16, где показаны участки двух отходящих от шин А линий W1, W2 с установленными на них защитами S1 и S2.

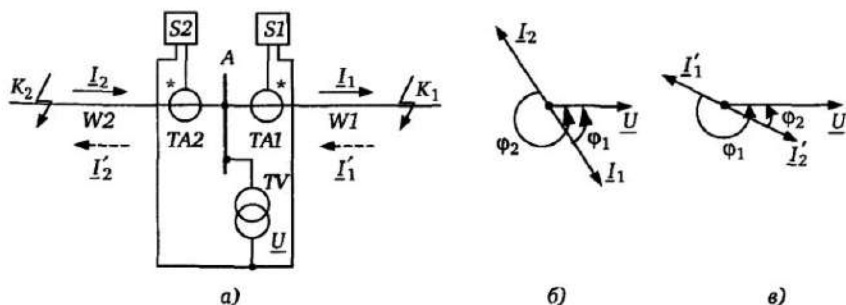


Рис. 2.16. Фазовые соотношения между токами и напряжениями при КЗ в ЭС

К защита́м  $S1, S2$  подводятся токи  $I_1$  и  $I_2$  соответственно от трансформаторов тока  $TA1, TA2$ , подключенных началами обмотки (помечены\*) по направлению к линии. К обеим защита́м подводится одинаковое напряжение  $\underline{U}$  от измерительного трансформатора  $TV$ , подключенного к шинам. В дальнейшем будем отсчитывать угол  $\varphi_1$  между током и напряжением от вектора тока против часовой стрелки к вектору напряжения. При КЗ  $K_1$  на линии  $W1$  угол  $\varphi_1$  между током  $I_1$  и напряжением  $\underline{U}$ , подводимыми к защите  $S1$  равен углу линии  $W1$ , а угол  $\varphi_2$  между током  $I_2$  и напряжением  $U$ , подводимыми к защите  $S2$ , больше угла  $\varphi_1$  на угол  $\pi$ , так как ток  $I_2$  имеет противоположное направление по отношению к шинам по сравнению с током  $I_1$  (рис. 2.16,б). При КЗ  $K_2$  через защиты  $S1$  и  $S2$  протекают токи  $I'_1$  и  $I'_2$  (изображены на рис. 2.15,а пунктиром). В этом случае угол между током  $I'_2$  и напряжением  $\underline{U}$ , подводимыми к защите  $S2$  равен углу линии (рис. 2.16,в), а угол между током  $I'_1$  и напряжением  $\underline{U}$  больше угла  $\varphi_2$  на угол  $\pi$ . Таким образом, по углу между током и напряжением, подводимыми к защите, можно судить о расположении места КЗ относительно шин А и производить при нахождении угла в заданном диапазоне соответствующие отключения. Измерительные органы, выполняющие данные функции, называются органами направления мощности. Угол между током и напряжением соответствует аргументу комплексного сопротивления  $\varphi = \arg(\underline{U}/I) = \arg Z$ .

Характеристика срабатывания (ХС) ЦИО направления мощности с учетом изложенного представляет в плоскости  $Z$  заштрихованную область, ограниченную лучами 1, 2 с углами  $\alpha_1, \alpha_2$  (рис. 2.17,а):

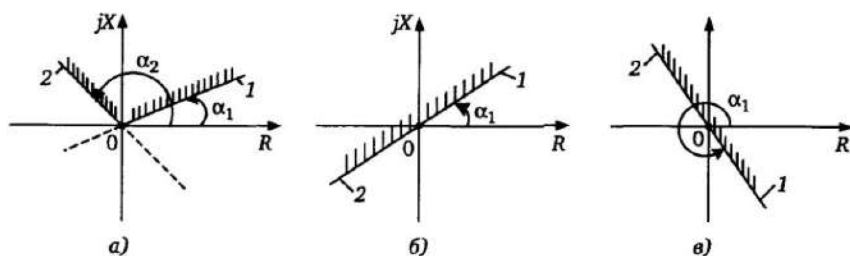


Рис. 2.17. Угловые характеристики ЦИО направления мощности



$$\alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_2. \quad (2.26)$$

Из двух лучей 1 и 2, ограничивающих характеристику срабатывания ЦИО, назовем «начальным» лучом 1 луч, при движении от которого в направлении против часовой стрелки угол  $\varphi$  находится в области срабатывания ЦИО.

### 2.4.3. ЦИО с использованием ортогональных составляющих векторов

В данном случае цифровые значения векторов тока  $\underline{I}(nT) = I_x(nT) + jI_y(nT)$  и напряжения  $U(nT) = U_x(nT) + jU_y(nT)$  определены цифровым вычислителем (см., например, рис. 2.7). Определим необходимые дальнейшие операции с ортогональными составляющими, обеспечивающие получение заданных характеристик ЦИО напряжения мощности (рис. 2.17). Простейшая прямолинейная характеристика срабатывания ЦИО направления мощности (рис. 2.17, б, в) описывается соотношением

$$\alpha_1 \leq \arg \frac{U(nT)}{\underline{I}(nT)} \leq \alpha_1 + \pi, \quad (2.27)$$

что эквивалентно

$$0 \leq \arg \frac{U(nT)}{\underline{I}(nT)} - \alpha_1 \leq \pi.$$

Учитывая, что  $\underline{U}(nT)/\underline{I}(nT) = \underline{Z}(nT)$ , полученное соотношение запишем в виде

$$0 \leq \arg \left[ \underline{Z}(nT)e^{-j\alpha_1} \right] \leq \pi. \quad (2.28)$$

Условие (2.28) означает, что вектор  $\underline{Z}(nT)e^{-j\alpha_1}$  должен находиться в верхней полуплоскости  $\underline{Z}$  (рис. 2.18), т.е. что его мнимая составляющая должна быть всегда положительна. Таким образом, условие срабатывания ЦИО направления мощности с характеристиками срабатывания на рис. 2.17, б, в имеет вид:

$$\text{Im} \left[ \underline{Z}(nT)e^{-j\alpha_1} \right] \geq 0. \quad (2.29)$$

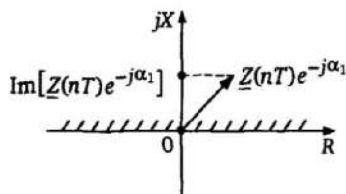


Рис. 2.18. Область срабатывания ЦИО направления мощности

Выразим значение  $\underline{Z}(nT)$  через ортогональные составляющие векторов  $\underline{I}(nT)$  и  $\underline{U}(nT)$ :

$$\underline{Z}(nT) = \frac{\underline{U}(nT)}{\underline{I}(nT)} = \frac{U_x(nT) + jU_y(nT)}{I_x(nT) + jI_y(nT)} = R(nT) + jX(nT), \quad (2.30)$$

где

$$R(nT) = \frac{U_x(nT)I_x(nT) + U_y(nT)I_y(nT)}{I_x^2(nT) + I_y^2(nT)};$$

$$X(nT) = \frac{I_x(nT)U_y(nT) - I_y(nT)U_x(nT)}{I_x^2(nT) + I_y^2(nT)}.$$

Условие срабатывания (2.29) с учетом (2.30) примет вид:

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{U_x(nT) + jU_y(nT)}{I_x(nT) + jI_y(nT)} (\cos \alpha_1 - j \sin \alpha_1) \right] \geq 0. \quad (2.31)$$

Преобразовав (2.31) и выделив мнимую часть, получим окончательно алгоритм реле направления мощности с диапазоном углов срабатывания  $\pi$ , использующего ортогональные составляющие векторов тока и напряжения:

$$\begin{aligned} & \cos \alpha_1 [U_y(nT)I_x(nT) - U_x(nT)I_y(nT)] - \\ & - \sin \alpha_1 [U_x(nT)I_x(nT) + U_y(nT)I_y(nT)] \geq 0. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Более сложная характеристика ЦИО направления мощности, описываемая выражением (2.26), определится как результат одновременного действия (схема И) двух реле с начальными

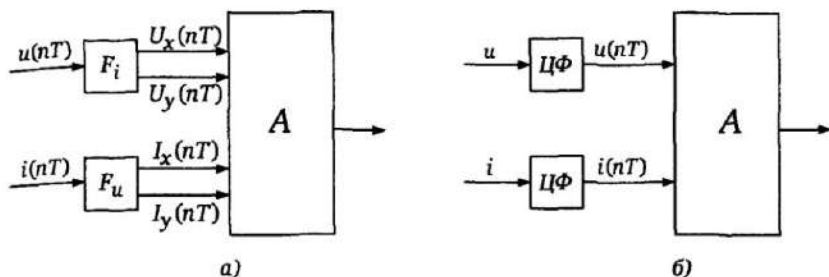


Рис. 2.19. Обобщенные структуры ЦИО направления мощности:  
 а — с использованием ортогональных составляющих векторов;  
 б — с непосредственным использованием мгновенных значений величин

лучами 1 и 2 (рис. 2.17,а). В результате с учетом неравенства (2.32) показанная на рис. 2.17,а область определится как одно-временное выполнение следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} & \cos \alpha_1 [U_y(nT)I_x(nT) - U_x(nT)I_y(nT)] - \\ & \quad - \sin \alpha_1 [U_x(nT)I_x(nT) + U_y(nT)I_y(nT)] \geq 0; \\ & \cos \alpha_2 [U_y(nT)I_x(nT) - U_x(nT)I_y(nT)] + \\ & \quad + \sin \alpha_2 [U_x(nT)I_x(nT) + U_y(nT)I_y(nT)] \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Структура ЦИО направления мощности с использованием ортогональных составляющих векторов приведена на рис. 2.19,а, на котором А — алгоритм вычислений на основе выражений (2.32) или (2.33) в соответствии с требуемой характеристикой срабатывания.

### 2.4.3. Непосредственное использование выборок мгновенных значений величин

Возможно построение ЦИО направления мощности без использования ортогональных составляющих векторов — на основе непосредственных операций с выборками мгновенных значений величины. При этом предполагается, что величины  $u(nT)$  и  $i(nT)$  предварительно отфильтрованы элементами аналоговой и цифровой фильтрации ЦФ (рис. 2.19,б).

Отметим, что сдвиг дискретизированной синусоидальной величины  $u = \sin(\omega_0 nT + \varphi)$  на угол  $\alpha_1$  соответствует замене дис-

кретного момента времени  $nT$  на  $nT - dT$ , где  $d$  — число сдвигаемых периодов дискретизации:

$$d = \alpha_1 / \omega_0 T = \alpha_1 N / 2\pi. \quad (2.34)$$

С учетом изложенного, условие срабатывания ЦИО направления мощности (2.29) примет вид:

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{\underline{U}(nT)e^{-j\alpha_1}}{\underline{I}(nT)} \right] \geq 0,$$

что эквивалентно

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{\underline{U}(nT - dT)}{\underline{I}(nT)} \right] \geq 0, \quad (2.35)$$

где дополнительное число  $d$  сдвиговых выборок напряжения  $u(nT)$  определяется выражением (2.34).

Используя выражение (2.16) алгоритма «двух выборок», разделенных временным промежутком  $mT$ , при  $\beta = \omega_0 mT$  получим:

$$\underline{U}(nT - dT) = \frac{1}{\sin \beta} [u(nT - dT)(\cos \beta + j \sin \beta) - u(nT - mT - dT)];$$

$$\underline{I}(nT) = \frac{1}{\sin \beta} [i(nT)(\cos \beta + j \sin \beta) - i(nT - mT)].$$

Подставляя полученные значения  $\underline{U}(nT - dT)$  и  $\underline{I}(nT)$  в неравенство (2.35) и учитывая, что расстояние  $mT$  между двумя выборками меньше полупериода  $T_0/2$  ( $\beta < \pi$ ,  $\sin \beta > 0$ ), получим преобразованный алгоритм ЦИО направления мощности с характеристикой рис. 2.17,б,в:

$$u(nT - dT - mT)i(nT) - u(nT - dT)i(nT - mT) \geq 0 \quad (2.35a)$$

Данный алгоритм использует по две текущие выборки мгновенных значений напряжения  $u(nT - dT)$ ,  $u(nT - dT - mT)$  и тока  $i(nT)$ ,  $i(nT - mT)$ , отстоящие друг от друга на выбранное число  $m$  периодов дискретизации. При этом напряжение  $u(nT)$ , сдвинуто на число периодов дискретизации  $d$ , пропорциональное углу наклона характеристики срабатывания  $\alpha_1$ .

## 2.4.4. Выбор измеряемых величин в ЦИО направления мощности

Учитывая различные виды возможных КЗ, необходим выбор величин, измеряемых в ЦИО направления мощности для правильной фиксации направления мощности при КЗ. Дополнительным требованием является обеспечение правильного измерения мощности при внешних и внутренних повреждениях вблизи места установки защиты (например, шин подстанции), когда напряжение отдельных или всех фаз (при трехфазных КЗ) снижается до 0.

Из возможных вариантов включения реле направления мощности наиболее распространен вариант 90-градусной схемы включения, когда измеряется угол между током поврежденной фазы и линейным напряжением между двумя другими фазами, сдвинутым на  $90^\circ$ . Рисунок 2.20 поясняет указанное для сочетания фазного тока  $I_A$  и линейного напряжения  $U_{BC}$  в предположении, что ток  $I_A$  и напряжение  $U_A$  совпадают по фазе.

Как видно из рис. 2.20,а, используемое напряжение  $U_{BC}e^{j90^\circ}$  совпадает по фазе с напряжением  $U_A$ . Основным достоинством данного решения является то, что при однофазных и двухфазных КЗ вблизи места установки защиты измеряемое напряжение, подводимое к реле направления мощности, связанное с неповрежденными фазами не падает до нуля, что обеспечивает надежное измерение. Сочетание токов и напряжений, используемых при определении направления мощности, для ЦИО

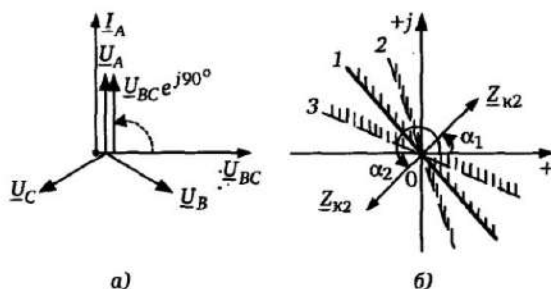


Рис. 2.20. Векторные соотношения (а) при КЗ и характеристики (б) реле направления мощности при 90-градусной схеме включения

Таблица 2.1. Измеряемые токи и напряжения при 90-градусной схеме реле направления мощности

Критерий пуска	ЦИО А		ЦИО В		ЦИО С	
	$I$	$U$	$I$	$U$	$I$	$U$
$I_A$	$I_A$	$U_B - U_C$	—	—	—	—
$I_B$	—	—	$I_B$	$U_C - U_A$	—	—
$I_C$	—	—	—	—	$I_C$	$U_A - U_B$
$I_A, I_B$	$I_A$	$U_B - U_C$	$I_B$	$U_C - U_A$	—	—
$I_B, I_C$	—	—	$I_B$	$U_C - U_A$	$I_C$	$U_A - U_B$
$I_C, I_A$	$I_A$	$U_B - U_C$	—	—	$I_C$	$U_A - U_B$
$I_A, I_B, I_C$	$I_A$	$U_B - U_C$	$I_B$	$U_C - U_A$	$I_C$	$U_A - U_B$

различных фаз приведено в табл. 2.1. В первом столбце таблицы фиксируется пуск токовых органов, установленных в данных фазах.

Важным моментом при анализе реле направления мощности с использованием напряжений неповрежденных фаз является возможное отклонение реальной характеристики  $I$  (рис. 2.20,б) от теоретической характеристики с установленным углом  $\alpha$  (см. рис. 2.17,б,в). Указанное обусловлено тем, что используемое для измерения напряжение, зависящее от напряжений неповрежденных фаз, сдвигаемое на  $90^\circ$ , с учетом влияния нагрузки не совпадает полностью по углу с фазным напряжением поврежденной фазы. Диапазон возможных отклонений от установленной характеристики  $I$  реле ограничен на рис. 2.20,б пунктирными линиями 2, 3. Отклонения характеристик 2, 3 от расчетной характеристики  $I$  на рис. 2.20,б зависят как от вида повреждения, так и от соотношений между сопротивлением линии и эквивалентным сопротивлением ЭС. Однако данные отклонения не являются существенными, так угол между током и напряжением  $\varphi_1$  при КЗ  $K_1$  на защищаемой линии находится с запасом в области действия ЦИО, а угол  $\varphi_2$  при внешнем КЗ  $K_2$  — вне области действия (см. рис. 2.16).

При трехфазных КЗ вблизи места установки защиты снижаются до нуля все три фазные напряжения. Для обеспечения правильного действия ЦИО направления мощности в этом случае используются фазные напряжения режима, предшествующего КЗ, запоминаемые на определенное время (см. §2.6).

### 2.4.5. ЦИО направления мощности симметричных составляющих

Использование симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей в ЦИО направления мощности позволяет, как и в ЦИО с одной электрической величиной, во многих случаях повысить чувствительность и селективность по сравнению с ЦИО, реагирующими на полные токи и напряжения. Указанное вызвано прежде всего существенно большими возможностями отстройки от различных нагрузочных режимов ввиду того, что в этих режимах симметричные составляющие достаточно малы. Возможности использования составляющих обратной и нулевой последовательностей для фиксации направления к месту КЗ поясняет рис. 2.21.

При измерении симметричных составляющих  $\underline{U}_{2к}$  ( $\underline{U}_{0к}$ ) обратной и нулевой последовательностей в месте установки РЗ источник этих составляющих располагается в месте КЗ ( $K_1$  — при КЗ

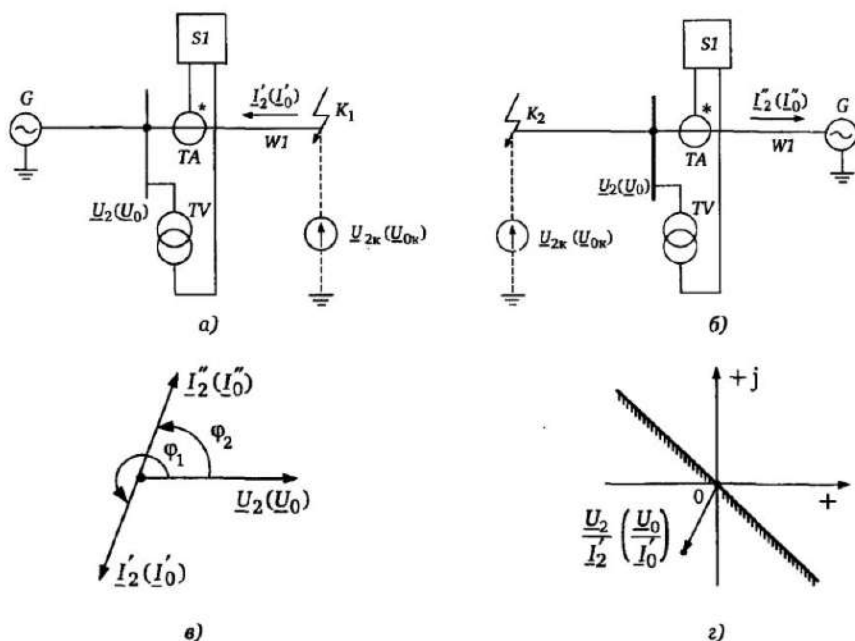


Рис. 2.21. К определению составляющих обратной и нулевой последовательностей при несимметричных КЗ

в зоне действия защиты  $S1$ ;  $K_2$  — при КЗ вне зоны действия защиты  $S1$  (рис. 2.21,а,б). Векторная диаграмма рис. 2.21,в показывает, что при КЗ в зоне действия защиты  $S1$  составляющие  $I'_2$ ,  $I'_0$  подтекают к шинам. При этом угол  $\varphi_1$  между  $\underline{U}_2$  и  $I'_2$  для обратной последовательности и между  $\underline{U}_0$  и  $I'_0$  для нулевой последовательности находится в третьем квадранте, а при КЗ  $K_2$  на соседней линии токи  $I''_2$  ( $I''_0$ ) в защите протекают от шин к линии (угол  $\varphi_2$  находится в первом квадранте). Таким образом, для правильной фиксации направления КЗ на основе измерения угла между симметричными составляющими тока и напряжения обратной (нулевой) последовательностей характеристика ЦИО направления мощности, в отличие от ЦИО, реагирующего на фазные величины (см. рис. 2.17), должна иметь область срабатывания, охватывающую третий квадрант плоскости кажущихся сопротивлений  $Z_2 = \underline{U}_2/I_2$  или  $Z_0 = \underline{U}_0/I_0$  (рис. 2.21,з).

Структура ЦИО направления мощности обратной (нулевой) последовательности приведена на рис. 2.22. Здесь:  $E_i, E_u$  — цифровые измерители векторов токов и напряжений;  $I_2(I_0), \underline{U}_2(\underline{U}_0)$  — блоки вычисления векторов токов и напряжений обратной (нулевой) последовательностей на основе соотношений типа (2.25,б);  $A$  — алгоритм оценки соотношений мощности обратной (нулевой) последовательности на основе соотношений (2.32), (2.33) или (2.35 а). При этом в указанных выражениях вместо фазных величин должны использоваться соответствующие составляющие обратной (нулевой) последовательности.

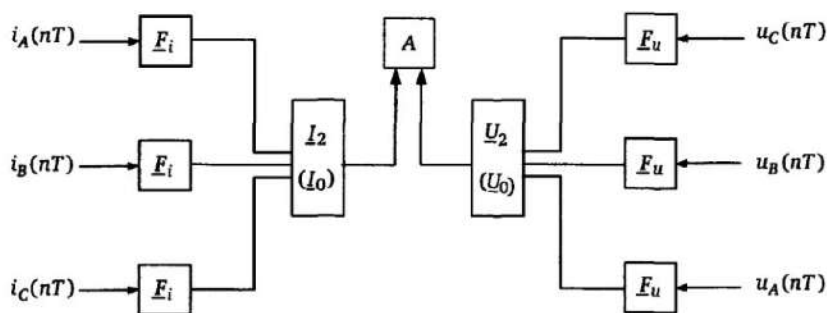


Рис. 2.22. Структура ЦИО направления мощности обратной (нулевой) последовательности



## 2.5 Цифровые дистанционные органы

### 2.5.1. Входные величины и характеристики срабатывания дистанционных органов

Дистанционные органы (ДО) являются основой измерительной части дистанционных защит (ДЗ). Свое название «дистанционная» данный вид защиты получил вследствие того, что контролируемый параметр ЭС — комплексное сопротивление  $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$  во многих случаях пропорционально расстоянию (дистанции) между местом установки защиты и местом КЗ. Информация о состоянии ЭС определяется подводимыми к ДЗ сигналами  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  от измерительных трансформаторов напряжения и  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  от измерительных трансформаторов тока. Пусть  $\underline{U}_p$  — величина, являющаяся линейной функцией фазных напряжений, а  $\underline{I}_p$  — фазных токов. Как показано в гл.7, при  $\underline{U}_p = \underline{U}_A - \underline{U}_B$  и  $\underline{I}_p = \underline{I}_A - \underline{I}_B$ , комплексное сопротивление

$$\underline{Z}_p = \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\underline{I}_A - \underline{I}_B} \quad (2.36)$$

пропорционально сопротивлению прямой последовательности  $\underline{Z}_{1к}$  участка линии между местом КЗ АВ и местом установки защиты, т.е.

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{1к} = \underline{Z}_{1уд} l_k,$$

где  $\underline{Z}_{1уд}$  — удельное сопротивление прямой последовательности линии;  $l_k$  — расстояние между местом установки защиты и местом КЗ.

При  $\underline{U}_p = \underline{U}_A$ ,  $\underline{I}_p = \underline{I}_A + k'_0 \underline{I}_0$ , где  $k'_0 = (\underline{Z}_{0уд} - \underline{Z}_{1уд})/\underline{Z}_{1уд}$ , измеряемое сопротивление

$$\underline{Z}_{A0} = \underline{Z}_p = \underline{U}_p/\underline{I}_p = \underline{U}_A/(\underline{I}_A + k'_0 \underline{I}_0) = \underline{Z}_{1уд} l_k \quad (2.36a)$$

пропорционально расстоянию между местом установки защиты и местом КЗ для случая однофазного КЗ А0.

Таким образом, если построить ДО, фиксирующий нахождение вектора  $\underline{Z}_p$  в определенной области комплексной плоскости  $\underline{Z}$  (внутри характеристики срабатывания ХС), то указанное будет

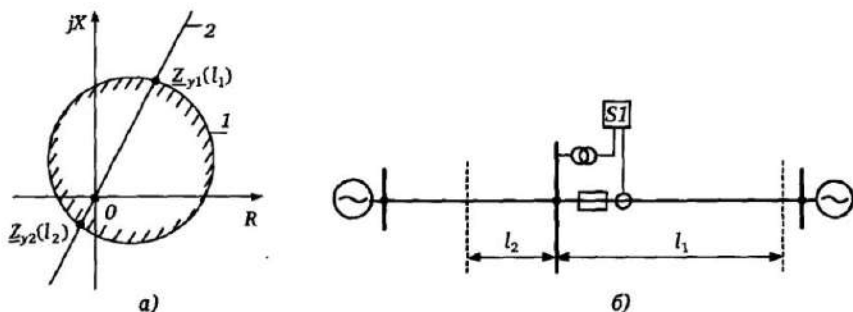


Рис. 2.23. К оценке зон действия дистанционного органа:  
 а — характеристики ДО (1) и защищаемой линии (2);  
 б — участки линий, защищаемые ДО

соответствовать фиксации удаленности места КЗ от места установки защиты.

В качестве упрощенного примера на рис. 2.23,а приведены круговая характеристика ДО (1) и характеристика защищаемой линии (2).

Точки  $Z_{y1}$ ,  $Z_{y2}$  пересечения ХС с характеристикой линии, соответствуют отрезкам линии в обоих направлениях протяженностью  $l_1$  и  $l_2$ , защищаемым ДО.

### 2.5.2. Пофазные и трехфазные дистанционные органы

При междуфазных металлических повреждениях на защищаемой линии одно из сопротивлений  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  (при двухфазных КЗ) или все три сопротивления (при трехфазном КЗ) пропорциональны расстоянию между местом повреждения и местом установки ДЗ. При металлических однофазных и двухфазных замыканиях на землю на защищаемой линии сопротивления  $Z_{A0}$ ,  $Z_{B0}$ ,  $Z_{C0}$  (в зависимости от вида повреждения) также пропорциональны расстоянию до места повреждения (см. гл. 7). В дальнейшем напряжения и комбинации напряжений, участвующие в формировании сопротивления на входе ДЗ, входящие в числители выражений типа (2.36) для вычисления  $Z_p$ , будем обозначать как  $\underline{U}_p$  (напряжения, подводимые к реле), а токи или комбинации токов, входящие в знаменатели выражения (2.36) — как  $I_p$  (токи, подводимые к реле). В табл. 2.2 приведены значения  $\underline{U}_p$  и  $I_p$ , соответствующие

Таблица 2.2. Величины, используемые при построении пофазных ДО

Входные величины			Входные сопротивления	Вид КЗ
Тип ДО	$\underline{U}_p$	$I_p$		
ДО <sub>AB</sub>	$\underline{U}_{AB}$	$I_A - I_B$	$Z_{AB}$	ABC, AB, ABO
ДО <sub>BC</sub>	$\underline{U}_{BC}$	$I_B - I_C$	$Z_{BC}$	ABC, BC, BCO
ДО <sub>CA</sub>	$\underline{U}_{CA}$	$I_C - I_A$	$Z_{CA}$	ABC, AC, ACO
ДО <sub>AO</sub>	$\underline{U}_A$	$I_A + k'_0 I_0$	$Z_{AO}$	AO, ABO, ACO
ДО <sub>BO</sub>	$\underline{U}_B$	$I_B + k'_0 I_0$	$Z_{BO}$	BO, ABO, BCO
ДО <sub>CO</sub>	$\underline{U}_C$	$I_C + k'_0 I_0$	$Z_{CO}$	CO, ACO, BCO

им входные сопротивления и виды повреждения, при которых сопротивления пропорциональны удаленности повреждения.

С учетом табл. 2.2 фиксация сопротивления  $Z_{AB}$  позволит с минимальными погрешностями определить удаленность повреждения при межфазных КЗ ABC, AB, ABO и т.д. Полноценную защиту, реагирующую на все виды повреждений, можно выполнить, фиксируя все шесть входных сопротивлений в соответствии с табл. 2.2 с помощью ДО. При этом возможны выполнения ДО, фиксирующих правильно лишь какое-то одно входное сопротивление, например  $Z_{AB}$  при КЗ между фазами А и В. В этом случае к ДО<sub>AB</sub> подводятся только  $\underline{U}_p = \underline{U}_{AB}$  и  $I_p = I_{AB}$ . Отметим, что и при других видах КЗ, например BC, на входе ДО<sub>AB</sub> будут определенные значения  $\underline{U}_p$  и  $I_p$ , но входное сопротивление  $Z_{AB}$  уже не будет соответствовать расстоянию до места повреждения. Подробнее области замера ДО при различных видах повреждений рассмотрены в гл. 7. Органы, к которым подводится одно сочетание  $\underline{U}_p$ ,  $I_p$  из табл. 2.2 называются пофазными. Пофазные органы могут быть предназначены для действия при однофазных и междуфазных КЗ, что определяется подводимыми к ним величинами. Существуют и трехфазные ДО, действующие правильно при нескольких видах повреждений. К таким ДО подводятся несколько величин  $\underline{U}_p$ ,  $I_p$ , используемых для фиксации входных сопротивлений при различных видах КЗ. На рис. 2.24 в качестве примера показаны некоторые характеристики срабатывания ДО, используемые в цифровых дистанционных защитах.

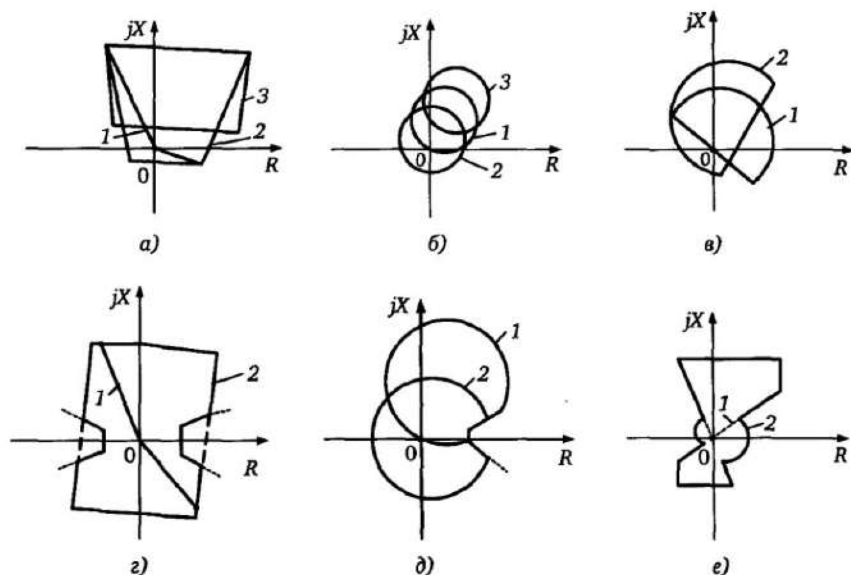


Рис. 2.24. Характеристики срабатывания ДО:

*a* — полигональные; *б* — круговые; *в* — комбинированные круговые; *г* — комбинированные полигональные с отстройкой от нагрузки; *д* — круговые с отстройкой от нагрузки; *е* — комбинированные полигональные и круговые; 1 — направленные; 2 — со смещением в квадрант III; 3 — со смещением в квадрант I

Трёхфазные ДО обладают рядом свойств, принципиально отличающих их от однофазных ДО. Практическое использование они нашли в ряде исполнений электромеханических и статических УРЗ, например [4, 12, 13, 44]. Их основное достоинство — сокращение числа используемых измерительных блоков и, в ряде случаев, большая чувствительность и селективность при КЗ, сопровождающихся электрической дугой. Однако оценка их поведения при различных видах КЗ достаточно сложна, а конструктивные преимущества, даваемые сокращением измерительных элементов, при цифровом исполнении утрачиваются. Анализ и варианты цифровой реализации трёхфазных ДО рассмотрены в [5].

Ниже рассматриваются принципы построения ДО с различными видами характеристик срабатывания по типу рис. 2.24 на основе цифровой обработки сигналов.

### 2.5.3. Цифровые ДО на основе сравнения абсолютных значений электрических величин

Сравнить две синусоидальные электрические величины по абсолютному значению — означает выявить, выполняется или не выполняется условие

$$E_1 \geq E_2, \quad (2.37)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — амплитудные или пропорциональные им значения синусоидальных величин.

Выражение (2.37) определяет алгоритм сравнения абсолютных значений двух величин. В комплексной плоскости  $\underline{w} = E_2/E_1$ , характеризующей соотношения между векторными величинами  $E_1, E_2$ , условие срабатывания (2.37) имеет вид  $|\underline{w}| \leq 1$ , что с учетом приложения П2 соответствует области, ограниченной окружностью единичного радиуса центром в начале координат (см. рис. П2.1). Нахождение точки  $\underline{w}$  внутри этой окружности означает, что независимо от угла между векторами  $E_1$  и  $E_2$   $\varphi = \arg(E_2/E_1)$  условие (2.37) выполняется. Приняв сравниваемые величины

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= k_1 \underline{U}_p + k_2 \underline{I}_p; \\ \underline{E}_2 &= k_3 \underline{U}_p + k_4 \underline{I}_p, \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

где  $\underline{U}_p$  и  $\underline{I}_p$  выбираются в соответствии с табл. 2.2, получим, что условию  $|\underline{w}| \leq 1$ , т.е. срабатыванию ДО, соответствует соотношение

$$\frac{|k_3 \underline{U}_p + k_4 \underline{I}_p|}{|k_1 \underline{U}_p + k_2 \underline{I}_p|} = \frac{|k_3 \underline{Z} + k_4|}{|k_1 \underline{Z} + k_2|} \leq 1. \quad (2.39)$$

Сравнению величин  $E_1$  и  $E_2$  по (2.38) соответствует структура ДО на рис. 2.25.

При оставлении в (2.39) только знака равенства, что соответствует не области, а граничной линии в плоскости  $\underline{Z}$ , это выражение совпадает с (П2.2). Отсюда с учетом приложения П2 следует, что при формировании величин  $E_1$  и  $E_2$  в соответствии с (2.38) область срабатывания ДО в плоскости  $\underline{Z}$  ограничивается окружностью (при  $k = |k_3/k_1| \neq 1$ ) и прямой (при  $k = 1$ ). Центр

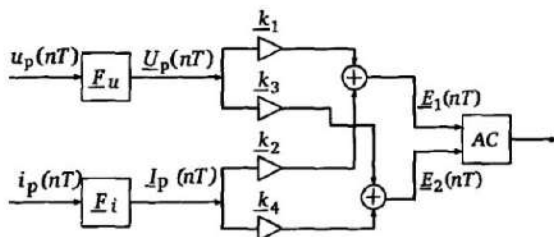


Рис. 2.25. Структура ДО на основе сравнения абсолютных значений двух электрических величин:  
AC — алгоритм сравнения

окружности  $Z_0$  и радиус  $R_0$  (рис. 2.26, характеристика 1) определяется соотношениями:

$$Z_0 = \frac{k^2 \underline{a} - \underline{b}}{k^2 - 1}; R_0 = \frac{k|\underline{a} - \underline{b}|}{|k^2 - 1|}; k = \left| \frac{k_3}{k_1} \right|; \underline{a} = -\frac{k_4}{k_3}; \underline{b} = -\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.40)$$

При  $k = 1$  выражению (2.40) соответствует прямая, располагающаяся в плоскости  $Z$  таким образом, что особые точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  являются симметричными относительно нее (рис. 2.26, характеристика 2). При характеристике срабатывания в виде окружности точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  находятся на одной прямой с центром окружности  $Z_0$ , всегда по одну сторону от него. При этом точка  $\underline{a}$  всегда расположена в области срабатывания, а точка  $\underline{b}$  — вне ее. Это следует из того, что при  $Z = \underline{a}$  из (2.38) имеем  $E_2 = 0$ , т. е. всегда  $E_1 > E_2$ , а при  $Z = \underline{b}$  имеем  $E_1 = 0$ , т. е.  $E_1 < E_2$ . Значения  $Z'_y$  и  $Z''_y$ , принадлежащие ХС и прямой, на которой расположены точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$ , назовем уставками ДО по сопротивлению срабатывания. При этом  $Z'_y$  всегда располагается по ту же сторону от центра  $Z_0$ , что и точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$ .

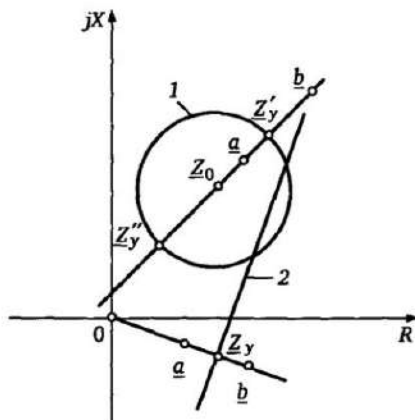


Рис. 2.26. Характеристики срабатывания ДО

Учитывая, что

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{Z}'_y + \underline{Z}''_y}{2}, \quad R_0 = \frac{|\underline{Z}'_y - \underline{Z}''_y|}{2}, \quad (2.41)$$

и решая совместно (2.40) и (2.41), получим

$$\underline{Z}'_y = \frac{k\underline{a} + \underline{b}}{k+1}; \quad \underline{Z}''_y = \frac{k\underline{a} - \underline{b}}{k-1}. \quad (2.42)$$

Для прямой при  $k = 1$  из (2.42) имеем (рис. 2.26, характеристика 2):

$$\underline{Z}''_y = \infty; \quad \underline{Z}'_y = \underline{Z}_y = \frac{\underline{a} + \underline{b}}{2}. \quad (2.43)$$

Некоторые из коэффициентов  $k_1 - k_4$  в выражениях (2.38) можно принять равными нулю. При требуемой ХС в виде окружности, учитывая, что точка  $\underline{Z} = \underline{a}$  ( $E_2 = 0$ ) всегда находится внутри ХС, а точка  $\underline{Z} = \underline{b}$  ( $E_1 = 0$ ) всегда вне ее, можно принять следующие упрощения [6]:

1) всегда возможно упрощение, соответствующее  $k_1 = 0$ , т.е.

$$\underline{E}_1 = k_2 \underline{I}_p; \quad \underline{E}_2 = k_3 \underline{U}_p + k_4 \underline{I}_p. \quad (2.44)$$

При этом из (2.40) имеем  $\underline{Z}_0 = \underline{a}$ ;  $R_0 = k_2/k_3$ . Для направленного ДО с характеристикой 1, приведенной на рис. 2.24,б, имеем при этом  $k_2 = k_4$ . В другом частном случае ДО полного сопротивления (ХС в виде окружности с центром в начале координат) имеем  $\underline{Z}_0 = \underline{a} = 0$  ( $k_4 = 0$ ), и сравниваемые величины принимают вид

$$\underline{E}_1 = k_2 \underline{I}_p; \quad \underline{E}_2 = k_3 \underline{U}_p;$$

2) при ХС в виде окружности, охватывающей начало координат, возможно также упрощение  $\underline{a} = 0$  ( $k_4 = 0$ ;  $\underline{E}_1 = k_1 \underline{U}_p + k_2 \underline{I}_p$ ;  $\underline{E}_2 = k_3 \underline{U}_p$ ), и с учетом (2.40) имеем:

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{b}}{k^2 - 1}; \quad R_0 = \frac{k|\underline{b}|}{|k^2 - 1|}; \quad (2.45)$$

3) при ХС в виде окружности, не охватывающей начало координат, возможно упрощение  $\underline{b} = 0$  ( $k_2 = 0$ ;  $\underline{E}_1 = k_1 \underline{U}_p$ ;

$E_2 = k_3 U_p + k_4 I_p$ ), откуда из (2.40) имеем

$$Z_0 = \frac{k^2 \underline{a}}{k^2 - 1}; R_0 = \frac{k|\underline{a}|}{|k^2 - 1|}. \quad (2.46)$$

При прямолинейных ХС, не проходящих через начало координат, в зависимости от требуемых зон действия одну из точек  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  можно располагать в начале координат. При  $\underline{a} = 0$  из (2.43) имеем  $\underline{b} = 2Z_y$ , где  $Z_y$  — вектор, соответствующий расстоянию от начала координат до прямой (рис. 2.26).

Реализация ДО осуществляется на основе структуры, приведенной на рис. 2.25, где, например, при использовании ортогональных составляющих сравниваемых величин на выходах формирователей сравниваемых величин имеем:

$$E_1(nT) = E_{1x}(nT) + jE_{1y}(nT); E_2(nT) = E_{2x}(nT) + jE_{2y}(nT).$$

Алгоритм срабатывания ( $E_2 \leq E_1$ ) примет вид:

$$E_{2x}^2(nT) + E_{2y}^2(nT) \leq E_{1x}^2(nT) + E_{1y}^2(nT). \quad (2.47)$$

#### 2.5.4. Дистанционные органы на основе сравнения фаз двух электрических величин

Сравнение двух электрических величин  $e_1 = E_1 \sin \omega t$  и  $e_2 = E_2 \sin(\omega t + \varphi)$  по фазе есть фиксация факта нахождения угла  $\varphi = \arg E_2 / E_1 = \arg \underline{w}$  внутри заданной области (см. рис. П1.1,а)

$$\alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_2. \quad (2.48)$$

Если сформировать величины  $E_1$  и  $E_2$  в соответствии с (2.38), то условие (2.48) срабатывания ДО примет вид

$$\alpha_1 \leq \arg \frac{k_3 \underline{U}_p + k_4 \underline{I}_p}{k_1 \underline{U}_p + k_2 \underline{I}_p} = \arg \frac{k_3 \underline{Z} + k_4}{k_1 \underline{Z} + k_2} \leq \alpha_2. \quad (2.49)$$

Таким образом, сравнение по фазе двух величин  $E_1 = k_1 U_p + k_2 I_p$  и  $E_2 = k_3 U_p + k_4 I_p$  эквивалентно с учетом приложения П1 отображению с помощью дробно-линейного преобразования (П1.2) области срабатывания схемы сравнения в плоскости  $\underline{w}$  на плоскость  $\underline{Z}$  (см. рис. П1.1,а).

Области срабатывания в плоскости  $\underline{Z}$ , которые можно полу-



чить сравнением по фазе двух величин  $E_1$  и  $E_2$  по выражению (2.38), являются окружностями, прямыми либо комбинациями дуг окружностей и отрезков прямых (см. рис. П1.1). Эти области определяются коэффициентами  $k_1—k_4$  (особыми точками  $a = -k_4/k_3$ ,  $b = -k_2/k_1$ , параметром  $\beta = \arg k_3/k_1$ ) и характеристикой схемы сравнения в плоскости  $w$  (углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  на рис. П1.1,а). Из приложения П1 имеем следующие положения, определяющие характеристики ДО в плоскости  $Z$ :

1) при наиболее распространенном алгоритме срабатывания  $\alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_1 + \pi$ , когда характеристика схемы сравнения в плоскости  $w$  — прямая, проходящая через начало координат (см. рис. П1.1,а, характеристика З), ХС в плоскости  $Z$  есть в общем случае произвольно расположенная окружность (рис. П1.1,е) при  $\alpha_1 - \beta \neq 0$ ;  $\alpha_1 - \beta \neq \pi$  или прямая (рис. П1.1,д) при  $\alpha_1 - \beta = 0$  или  $\alpha_1 - \beta = \pi$ ;

2) особые точки  $a$  и  $b$  расположены на характеристике ДО в плоскости  $Z$ . При построении ХС необходимо провести окружность через точки  $a$  и  $b$  таким образом, чтобы вписанные углы, опирающиеся на точки  $a$  и  $b$ , были равны  $\alpha_1 - \beta$  и  $\alpha_1 - \beta + \pi$ . Область действия находится внутри окружности при  $\alpha_1 - \beta < \varphi < \alpha_1 - \beta + \pi$ . Для прямолинейной ХС, проходящей через точки  $a$  и  $b$ , область действия находится слева от прямой

при движении от  $a$  к  $b$ , если  $-\pi < \arg \frac{Z-a}{Z-b} < 0$ , и справа от

прямой при  $0 < \arg \frac{Z-a}{Z-b} < \pi$ ;

3) при  $\alpha_1 - \alpha_2 \neq \pi$  ХС определяется в зависимости от значений  $k_1—k_4$  двумя пересекающимися дугами окружностей, либо комбинациями дуг и отрезков прямых (см. рис. П1.1,б—г);

4) упрощения при построении ДО возможны при прямолинейной ХС ( $a = \infty$  или  $b = \infty$ , т.е.  $k_3 = 0$  или  $k_1 = 0$ ) или при ХС, проходящей через начало координат ( $a = 0$  или  $b = 0$ , т.е.  $k_4 = 0$  или  $k_2 = 0$ ). Наиболее часто при выполнении ДО применяются «косинусный» или «синусный» алгоритмы сравнения (рис. 2.27,а), например

$$-\frac{\pi}{2} \leq \arg w = \varphi \leq \frac{\pi}{2}; \quad (2.50)$$

$$0 \leq \arg w = \varphi \leq \pi. \quad (2.51)$$

При выполнении в этом случае направленного ДО с ХС, проходящей через начало координат, одну особую точку, например  $\underline{a}$ , проще всего расположить в начале координат, а другую — на конце диаметра окружности, проходящей через начало координат (рис. 2.27, б).

При этом  $\underline{k}_4 = 0$ ;  $-\underline{k}_2/\underline{k}_1 = \underline{b} = \underline{Z}_y$  и к схеме сравнения подводятся величины

$$\underline{E}_1 = \underline{k}_1 \underline{U}_p + \underline{k}_2 \underline{I}_p; \quad \underline{E}_2 = \underline{k}_3 \underline{U}_p. \quad (2.52)$$

При выполнении ДО с прямолинейной ХС (рис. 2.26, характеристика 2), приняв  $\underline{a} = \infty$ , имеем  $\underline{k}_3 = 0$ , т.е.  $\underline{E}_1 = \underline{k}_1 \underline{U}_p + \underline{k}_2 \underline{I}_p$ ;  $\underline{E}_2 = \underline{k}_4 \underline{I}_p$ . Точку  $\underline{b}$  можно расположить в любом месте прямой.

Цифровая реализация ДО осуществляется на основе структурной схемы рис. 2.25. При этом «косинусный» и «синусный» алгоритмы сравнения получим из аналогичного по структуре алгоритма реле направления мощности (2.27) соответственно при  $\alpha_1 = \pi/2$ ,  $\alpha_1 = 0$  и замене  $\underline{U}(nT)$  на  $\underline{E}_2(nT)$ ,  $\underline{I}(nT)$  на  $\underline{E}_1(nT)$ . В результате из выражения (2.32) получим:

для «косинусного» алгоритма сравнения ( $\alpha_1 = -\pi/2$ )

$$E_{1x}(nT)E_{2x}(nT) + E_{1y}(nT)E_{2y}(nT) \geq 0; \quad (2.53)$$

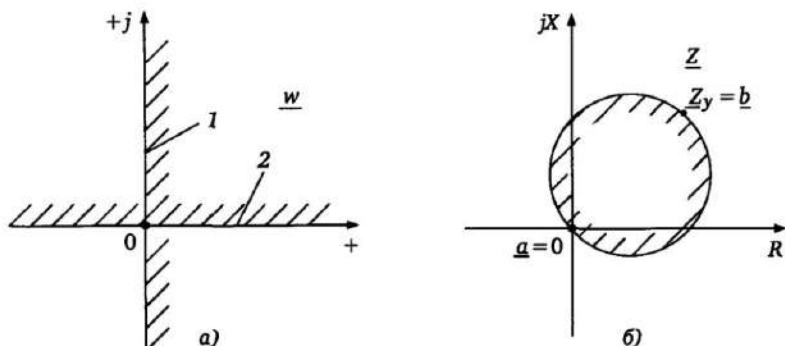


Рис. 2.27. Характеристики срабатывания ДО:  
а — в плоскости  $\underline{w}$ ; б — в плоскости  $\underline{Z}$ ; 1 — «косинусная» ХС; 2 — «синусная» ХС

для «синусного» алгоритма сравнения ( $\alpha_1 = 0$ )

$$E_{2y}(nT)E_{1x}(nT) - E_{2x}(nT)E_{1y}(nT) \geq 0. \quad (2.54)$$

Более общий алгоритм сравнения описывается системой неравенств (2.33) при той же замене  $\underline{U}(nT)$  и  $\underline{I}(nT)$ .

### 2.5.5. Цифровые ДО с полигональными и комбинированными характеристиками на основе сравнения электрических величин

Получить сложную (комбинированную или полигональную) характеристику (например, рис. 2.24, в—г) можно, используя несколько алгоритмов сравнения двух величин, каждый из которых образует одну единичную характеристику. Например, ДО с ХС в виде четырехугольника (рис. 2.28, а) можно выполнить на основе двух единичных ХС I и II, получаемых с помощью двух схем сравнения по фазе, выходы которых объединены по схеме И.

Каждая единичная ХС образована при этом пересечением двух прямых. Структура ДО на основе единичных ХС приведена на рис. 2.28, б, при этом  $AC_1 \dots AC_n$  — единичные алгоритмы сравнения по фазе. Другой возможностью построения ДО является одновременное сравнение по фазе нескольких электрических величин. Данный принцип рассмотрим на примере построения цифрового ДО с вы-

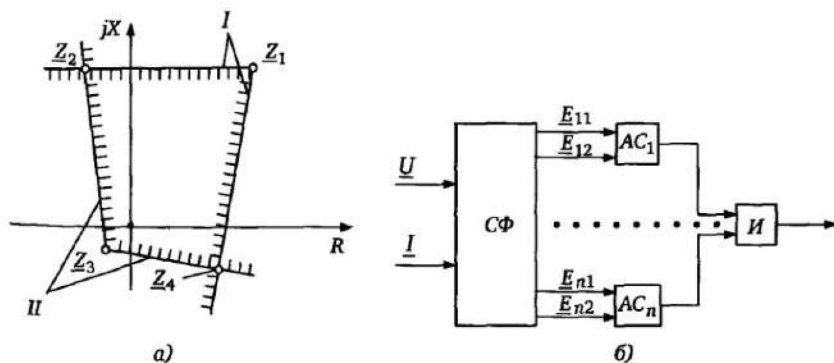


Рис. 2.28. Получение комбинированных характеристик на основе использования нескольких схем сравнения двух величин

пуклой  $n$ -угольной, в частности четырехугольной ХС (рис. 2.29,а).  
Сформируем четыре сравниваемые величины  $E_1—E_4$ :

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= k_{11}U_p + k_{12}I_p = k_{11}I_p(Z - Z_1); Z_1 = -k_{12} / k_{11}; \\ E_2 &= k_{21}U_p + k_{22}I_p = k_{21}I_p(Z - Z_2); Z_2 = -k_{22} / k_{21}; \\ E_3 &= k_{31}U_p + k_{32}I_p = k_{31}I_p(Z - Z_3); Z_3 = -k_{32} / k_{31}; \\ E_4 &= k_{41}U_p + k_{42}I_p = k_{41}I_p(Z - Z_4); Z_4 = -k_{42} / k_{41} \end{aligned} \right\} (2.55)$$

таким образом, чтобы особые точки  $Z_1—Z_4$  находились на вершинах требуемой ХС. Примем у коэффициентов  $k_{11}, k_{21}, k_{31}, k_{41}$  одинаковые аргументы (для простоты они приняты действительными). Найдем фазовые соотношения между векторами  $E_1—E_4$  при КЗ внутри и вне заданной ХС (рис. 2.29,а). Фазовые соотношения, т.е. сдвиги фаз между векторами, не изменяются, если всю систему векторов повернуть на любой угол. Поэтому с учетом (2.55) фазовые соотношения между векторами  $E_1—E_4$  такие же, как и между векторами  $Z—Z_1, Z—Z_2, Z—Z_3, Z—Z_4$ , что получено делением  $E_1—E_4$  на числа  $k_{11}I, k_{21}I, k_{31}I, k_{41}I$ , имеющие одинаковый аргумент. Примем последовательную нумерацию вершин характеристики  $Z_1—Z_4$  и соответствующих им величин  $E_1—E_4$  в направлении против часовой стрелки. Рисунок 2.29,а поясняет тот факт, что, если  $Z = Z'$ , где  $Z'$  — любая точка внутри области, ограниченной четырехугольником, то угол  $\alpha'$  между любыми двумя соседними векторами  $Z—Z'_1$  и  $Z—Z'_2, Z—Z'_2$  и  $Z—Z'_3, Z—Z'_3$  и  $Z—Z'_4, Z—Z'_4$  и  $Z—Z'_1$  всегда меньше  $\pi$ . При расположении точки  $Z = Z''$  вне области, ограниченной прямоугольником, один из углов между соседними векторами  $\alpha''$  всегда больше  $\pi$ .

С учетом изложенного, структура цифрового ДО с многоугольной ХС (рис. 2.29,б) должна содержать формирователь сравниваемых величин СФ по выражению (2.55), где каждая из величин формируется аналогично рис. 2.25, и алгоритм сравнения, фиксирующий нахождение угла  $\alpha$  между любой парой соседних векторов в диапазоне  $0 \leq \varphi \leq \pi$ . Таким образом, при принятии равными аргументов коэффициентов передачи  $k_{11}—k_{41}$  по напряжению алгоритм функционирования цифрового ДО соответствует одновременному обеспечению условий:

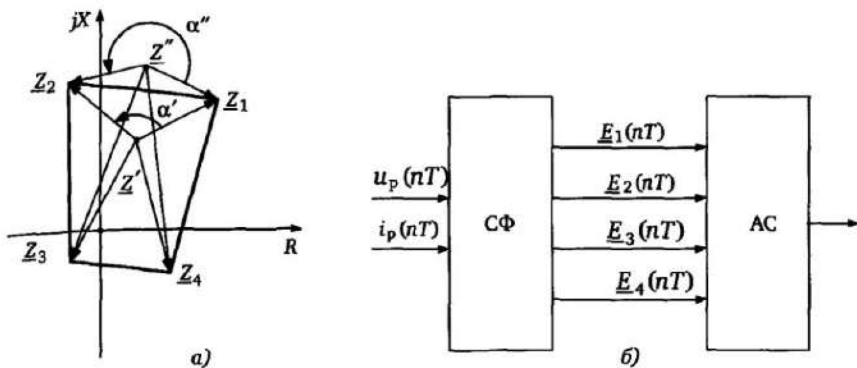


Рис. 2.29. Характеристика и структура цифрового ДО с полигональной характеристикой

$$\left. \begin{aligned}
 0 \leq \arg \frac{E_2}{E_1} \leq \pi; \\
 0 \leq \arg \frac{E_3}{E_2} \leq \pi; \\
 0 \leq \arg \frac{E_4}{E_3} \leq \pi; \\
 0 \leq \arg \frac{E_1}{E_4} \leq \pi.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

Каждое условие соответствует «синусной» схеме сравнения величины, т.е. при использовании ортогональных составляющих векторов  $E_1(nT) - E_4(nT)$  с учетом выражения (2.54) получим алгоритм функционирования ДО:

$$\left. \begin{aligned}
 E_{2y}(nT)E_{1x}(nT) - E_{2x}(nT)E_{1y}(nT) \geq 0; \\
 E_{3y}(nT)E_{2x}(nT) - E_{3x}(nT)E_{2y}(nT) \geq 0; \\
 E_{4y}(nT)E_{3x}(nT) - E_{4x}(nT)E_{3y}(nT) \geq 0; \\
 E_{1y}(nT)E_{4x}(nT) - E_{1x}(nT)E_{4y}(nT) \geq 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

### 2.5.5. Цифровые ДО на основе непосредственного вычисления $\underline{Z}$

Осуществив операцию деления  $\underline{Z}(nT) = \frac{U(nT)}{I(nT)} = R(nT) + jX(nT)$

в соответствии с выражением (2.30), можно построить ДО с прямолинейными (многоугольными) характеристиками срабатывания, решая одно или несколько неравенств вида

$$a_n X(nT) + b_n R(nT) + c_n \geq 0. \quad (2.58)$$

Характеристика ДО в виде произвольно расположенной окружности с центром  $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$  и радиусом  $a$  (рис. 2.30,б), определится из неравенства

$$|\underline{Z}(nT) - \underline{Z}_0| \leq a,$$

или при использовании ортогональных составляющих

$$\sqrt{[R(nT) - R_0]^2 + [X(nT) - X_0]^2} \leq a. \quad (2.59)$$

Учитывая, что операция деления требует наложения определенных ограничений на диапазон участвующих в делении величин, целесообразно построение ДО с прямолинейными, круговыми и комбинированными характеристиками без операции деления. В частности, уравнение прямой, проходящей через точки  $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$  и  $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ , в плоскости  $\underline{Z}$  (рис. 2.30,а) имеет вид:

$$X(nT) - \frac{X_2 - X_1}{R_2 - R_1} R(nT) + \frac{X_1 R_2 - X_2 R_1}{R_2 - R_1} = 0. \quad (2.60)$$

Подставив в (2.60) значения  $X(nT)$  и  $R(nT)$  из (2.30) и приняв

$$\left. \begin{aligned} a(nT) &= I_x(nT)U_x(nT) + I_y(nT)U_y(nT); \\ b(nT) &= I_x(nT)U_y(nT) - I_y(nT)U_x(nT), \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

получим условие, определяющее прямолинейную характеристику ДО, проходящую через точки  $\underline{Z}_1$  и  $\underline{Z}_2$  (рис. 2.30,а):

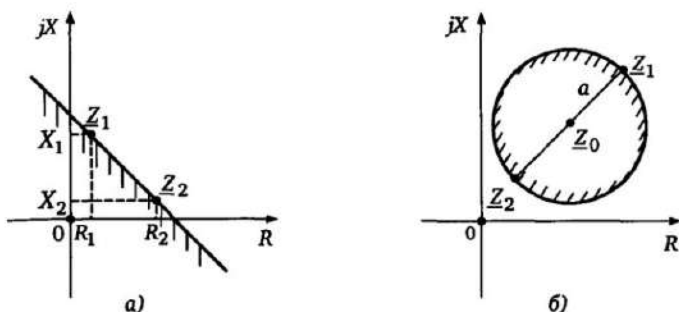


Рис. 2.30. Прямолинейная и круговая характеристики ДО

$$a(nT)(X_2 - X_1) + b(nT)(R_2 - R_1) + (X_1 R_2 - X_2 R_1) I^2(nT) \geq 0. \quad (2.62)$$

Совместное решение неравенств вида (2.62) определяет цифровой ДО с многоугольной характеристикой. В частности, для четырехугольной характеристики ДО с вершинами в точках  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  (см. рис. 2.29) необходимо с учетом (2.62) одновременное выполнение следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} a(nT)(X_2 - X_1) + b(nT)(R_2 - R_1) + (X_1 R_2 - X_2 R_1) I^2(nT) &\geq 0; \\ a(nT)(X_3 - X_2) + b(nT)(R_3 - R_2) + (X_2 R_3 - X_3 R_2) I^2(nT) &\geq 0; \\ a(nT)(X_4 - X_3) + b(nT)(R_4 - R_3) + (X_3 R_4 - X_4 R_3) I^2(nT) &\geq 0; \\ a(nT)(X_1 - X_4) + b(nT)(R_1 - R_4) + (X_4 R_1 - X_1 R_4) I^2(nT) &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

Для ДО с круговой характеристикой, проходящей через точки  $Z_1$  и  $Z_2$ , расположенные на концах диаметра характеристики (рис. 2.30, б), уравнение граничной линии срабатывания имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} U^2(nT) - a(nT)(R_1 + R_2) - b(nT)(X_1 + X_2) + \\ + I^2(nT)(R_1 R_2 + X_1 X_2) = 0. \end{aligned} \quad (2.64)$$

## 2.6. Обеспечение направленности ДО при близких повреждениях

Во многих случаях одним из основных требований, предъявляемых к ДО, является направленность — способность действо-

вать четко при повреждениях  $K_1$  в начале участка и не действовать при повреждениях  $K_2$  «за спиной» (рис. 2.31,а).

Для обеспечения этого требования ХС должна проходить через начало координат плоскости  $Z$  (характеристики 2 и 3 на рис. 2.31,б). Точки  $Z_{к1}$  и  $Z_{к2}$ , соответствующие повреждениям  $K_1$  и  $K_2$ , располагаются в плоскости  $Z$  практически рядом. Напряжение на входе защиты  $\underline{U}$  при этом близко к нулю. Очевидно, что без принятия специальных мер нельзя обеспечить четкое функционирование ДО при КЗ в точках  $K_1$  и  $K_2$ , так как одного лишь прохождения ХС через начало координат недостаточно. Это вызвано тем, что на грани срабатывания ХС действие ДО неустойчиво. В силу ряда влияющих факторов характеристика ДО в реальных условиях имеет определенные диапазоны отклонений, которые могут охватить точки  $Z_{к1}$ ,  $Z_{к2}$  на рис. 2.31,б, расположенные достаточно близко друг к другу. Поэтому без принятия специальных мер возможны как отказы ДО при КЗ в начале зоны, так и излишние срабатывания при внешних повреждениях.

Рассмотрим обеспечение направленности ДО на основе сравнения фаз электрических величин.

В этом случае характеристика ДО проходит через начало координат (см. рис. 2.17 и 2.27,б), и наиболее простым и эффективным решением является расположение одной из особых точек тоже в начале координат (см. п. 2.5.4). В частности, для ДО с круговой ХС (см. рис. 2.27,б) принято  $\underline{a} = 0$ , и с учетом (2.40) и (2.52) соответствующая сравниваемая величина определяется только напряжением сети  $\underline{U}$  ( $E_2 = k_3 \underline{U}_p$ ). В дальнейшем назовем эту величину поляризующей величиной  $E_{п}$ .

Для обеспечения правильного действия ДО при внутренних и внешних КЗ вблизи места установки ДО, сопровождающихся падением напряжения в месте КЗ до нуля, поляризующая величина  $E_{п}$  должна иметь дополнительную компоненту. Указанное обусловлено необходимостью сохранения кратковременно или длительно поляризующего напряжения, совпадающего или близкого по фазе с напряжением  $\underline{U}_p$ , снижающегося при близких КЗ до нуля. Поясним указанное на примере направленного ДО с круговой ХС (см. рис. 2.27,б), в котором величины  $E_1$  и  $E_2$  формируются в соответствии с выражением (2.52). При близких повреждениях имеем  $\underline{U}_p = 0$ , т.е.  $E_2 = 0$ , что приводит к неопределенности действия и отсутствию четкой направленности, так как



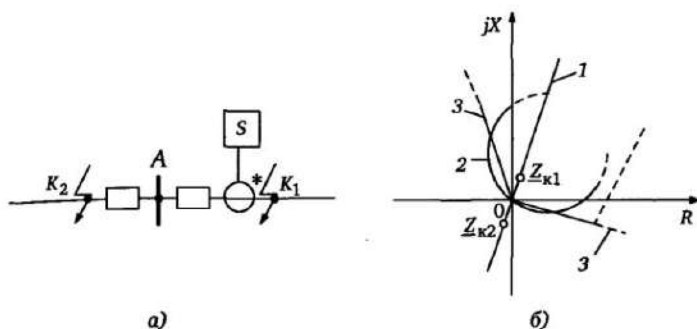


Рис. 2.31. Входные сопротивления (а) при КЗ в начале защищаемой зоны ( $K_1$ ) и «за спиной» ( $K_2$ ); участки характеристик направленных ДО вблизи начала координат (б)

одна из сравниваемых величин ( $\underline{E}_2$ ) отсутствует. Так как для срабатывания ДО важна лишь фаза величины  $\underline{E}_2$ , зависящей только от напряжения  $\underline{U}_p$ , то для обеспечения четкой направленности необходимо сформировать величину  $\underline{E}_2$  таким образом, чтобы при всех возможных видах близких КЗ она не снижалась до 0. Указанное может быть достигнуто использованием при формировании поляризующей величины  $\underline{E}_n$  дополнительного напряжения  $\underline{U}_d$ , близкого по фазе к напряжению  $\underline{U}_p$ , зависящего от напряжений неповрежденных фаз при рассматриваемом виде КЗ фаз и, следовательно, не падающего до нуля при КЗ в месте защиты. При добавлении дополнительного напряжения к  $\underline{E}_2$  сравнимые величины по выражению (2.52) для направленного ДО с круговой ХС (см. рис. 2.27,б) примут вид

$$\underline{E}_1 = k_1 \underline{U}_p + k_2 \underline{I}_p; \quad \underline{E}_2 = k_3 \underline{U}_p + k_n \underline{U}_d. \quad (2.65)$$

В этом случае при близких повреждениях ( $\underline{U}_p = 0$ ) имеем:  $\underline{E}_1 = k_2 \underline{I}_p$ ;  $\underline{E}_2 = k_n \underline{U}_d$ . В зависимости от места повреждения ( $K_1$  и  $K_2$ , рис. 2.31,а) фаза тока  $\underline{I}_p$  и, следовательно, фаза величины  $\underline{E}_1$  будет изменяться существенно (до  $180^\circ$ ), а фаза  $\underline{E}_2$  незначительно, что и обеспечит возможность четко различать замыкания  $K_1$  и  $K_2$ , т.е. направленность ДО при близких повреждениях.

В зависимости от вида КЗ, при котором должен действовать ДО, в качестве поляризующего напряжения могут использоваться напряжения различных фаз. Возможны различные варианты формирования поляризующей величины при выполнении одно-

го и того же типа ДО при условии, что  $\underline{U}_\Pi$  должно мало отличаться при КЗ в начале линии и «за спиной» (рис. 2.31,а). Соответственно различными принимаются и коэффициенты  $k_\Pi$ . В табл. 2.3 приведены четыре варианта значений дополнительных напряжений поляризации  $k_\Pi \underline{U}_d$  для направленных ДО, действующих при междуфазных и однофазных КЗ.

Точно такие же напряжения могут использоваться в сравниваемой величине  $\underline{E}_3$  по выражению (2.55) в направленном ДО с многоугольной ХС, проходящей через начало координат (см., например, рис. 2.29,а), при расположении особой точке  $\underline{Z}_3 = 0$  в начале координат. В этом случае

$$\underline{E}_3 = k_{31} \underline{U}_p + k_\Pi \underline{U}_d. \quad (2.66)$$

Другим вариантом формирования поляризующей величины  $\underline{E}_\Pi$  является запоминание предшествующего напряжения  $\underline{U}_p$  на заданное время  $\Delta t$ , достаточное для фиксации направленности КЗ при падении напряжения  $\underline{U}_p$  до нуля и для срабатывания ДО при КЗ в зоне действия. В данном случае поляризующее напряжение  $\underline{E}_\Pi = k_\Pi \underline{U}_p^H$ , где  $\underline{U}_p^H$  — запомненное на заданное время напряжение предаварийного (нагрузочного) режима. Аналогичным образом можно запомнить дополнительное напряжение  $\underline{U}_d$  (см. табл. 2.3). В этом случае  $\underline{E}_\Pi = k_\Pi \underline{U}_d^H$ . Запоминание достигается введением в схему формирования величины  $\underline{E}_\Pi$  блока памяти  $\Pi$  (рис. 2.32), который определенное время  $\Delta t$  генерирует напряжение, имевшееся ранее на его входе при скачкообразном снижении напряжений  $\underline{U}_p$  или  $\underline{U}_d$ . Отметим, что для правильного

Таблица 2.3. Варианты значений дополнительных напряжений поляризации

Тип ДО	$\underline{U}_p$	$I_p$	Входное сопротивление	Варианты напряжений поляризации $k_\Pi \underline{U}_d$			
				I	II	III	IV
ДО <sub>AB</sub>	$\underline{U}_{AB}$	$I_A - I_B$	$Z_{AB}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_C$	$k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_{AC}$	$k_\Pi e^{-j60^\circ} \underline{U}_{CB}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC})$
ДО <sub>BC</sub>	$\underline{U}_{BC}$	$I_B - I_C$	$Z_{BC}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_A$	$k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_{BA}$	$k_\Pi e^{-j60^\circ} \underline{U}_{AC}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA})$
ДО <sub>CA</sub>	$\underline{U}_{CA}$	$I_C - I_A$	$Z_{CA}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_B$	$k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_{CB}$	$k_\Pi e^{-j60^\circ} \underline{U}_{BA}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} (\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB})$
ДО <sub>A</sub>	$\underline{U}_A$	$I_A + k'_0 I_C$	$Z_{A0}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{BC}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_C$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{BC}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC})$
ДО <sub>B</sub>	$\underline{U}_B$	$I_B + k'_0 I_A$	$Z_{B0}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{CA}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_A$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{CA}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA})$
ДО <sub>CO</sub>	$\underline{U}_C$	$I_C + k'_0 I_B$	$Z_{CO}$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{AB}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} \underline{U}_B$	$k_\Pi e^{-j90^\circ} \underline{U}_{AB}$	$-k_\Pi e^{j60^\circ} (\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB})$

действия при близких трехфазных КЗ, когда все напряжения снижаются до нуля, использование блока памяти  $\Pi$  необходимо в любом случае.

Возможно использование комбинаций рассмотренных выше вариантов при формировании поляризирующей величины  $\underline{E}_n$ . Некоторые наиболее распространенные варианты формирования поляризирующей величины  $\underline{E}_n$  для направленных ДО с характеристиками, проходящими через начало координат, приведены на рис. 2.32.

**Вариант I** соответствует запоминанию с помощью блока памяти  $\Pi$  предаварийного основного напряжения  $\underline{U}_p$ . В результате поляризирующая величина  $\underline{E}_n = k_n \underline{U}_p^H$  сохраняет заданное время фазу напряжения  $\underline{U}_p^H$ , имевшегося на входе ДО до возникно-

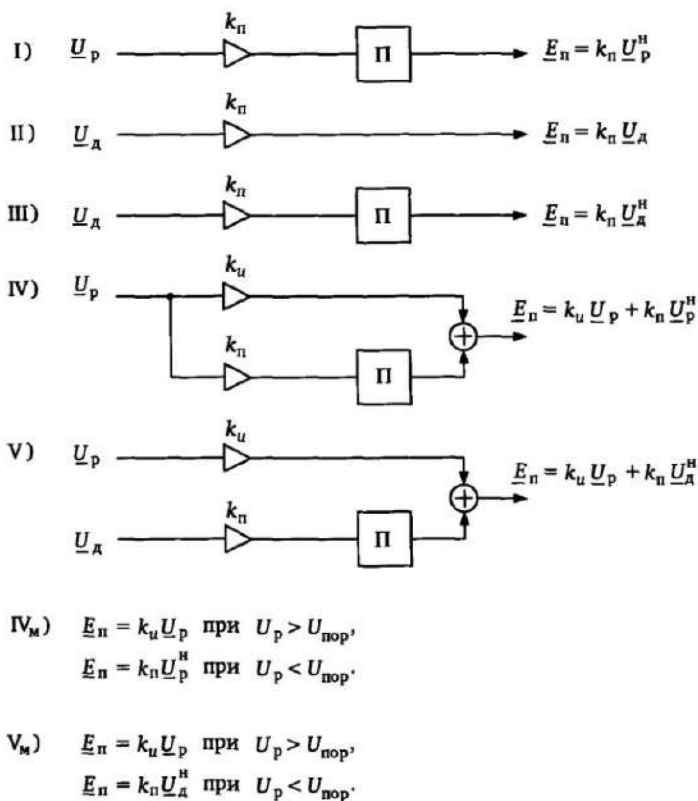


Рис. 2.32. Варианты формирования поляризирующего напряжения  $\underline{E}_n$

вения КЗ. Это обеспечивает правильное действие ДО при всех видах близких КЗ, сопровождающихся падением напряжения  $\underline{U}_p$  до нуля.

**Варианты II и III** выполнения поляризации используют для формирования  $\underline{E}_n$  дополнительные напряжения  $\underline{U}_d$ , формируемые неповрежденными фазами (см. табл. 2.3). Вариант II нечувствителен к трехфазным КЗ, ввиду отсутствия блока памяти. Введение блока памяти II (вариант III) необходимо для обеспечения направленности при трехфазных КЗ в месте установки защиты (отличие от варианта II), когда до нуля снижается напряжение всех фаз.

**Вариант IV** использует только основное напряжения  $\underline{U}_p$ :

$$\underline{E}_n = k_u \underline{U}_p + k_n \underline{U}_p^H.$$

Запоминаемая составляющая  $k_n \underline{U}_p^H$  является в этом случае лишь частью поляризующего напряжения  $\underline{E}_n$  (обычно  $k_n/k_u \approx 0,05$ ) и эффективна только при КЗ в месте установки защиты, когда составляющая  $k_u \underline{U}_p \approx 0$ . Данный вариант отличается от варианта I динамическими характеристиками (см. §7.10).

**Вариант V**, распространенный в практике, использует при формировании поляризующей величины  $\underline{E}_n$  как основную  $\underline{U}_p$ , так и дополнительную  $\underline{U}_d$  величины:

$$\underline{E}_n = k_u \underline{U}_p + k_n \underline{U}_d^H.$$

Это обеспечивает длительное нахождение ДО в устойчивом состоянии при всех видах КЗ кроме трехфазного. При трехфазных КЗ поляризующее напряжение обеспечивается в течение заданного времени блоком памяти II.

**Варианты IV<sub>м</sub> и V<sub>м</sub>** являются модификациями соответственно вариантов IV и V. В данном случае контролируется величина основного напряжения  $\underline{U}_p$ , и при снижении его ниже заданного значения  $\underline{U}_{пор}$  (примерно  $0,02 U_{ном}$ ) происходит изменение формирования поляризующей величины  $\underline{E}_n$ . В обоих вариантах при  $\underline{U}_p > U_{пор}$  поляризующая величина  $\underline{E}_n = k_3 \underline{U}_p$  пропорциональна основному напряжению  $\underline{U}_p$ . При  $U_p < U_{пор}$  в варианте IV<sub>м</sub> напряжение  $\underline{E}_n$  пропорционально запомненному блоком памяти предаварийному дополнительному напряжению  $\underline{U}_d$  ( $\underline{E}_n = k_n \underline{U}_d^H$ ). На рис. 2.33 приведена структура формирования  $\underline{E}_n$

при использовании варианта  $V_m$ . Рассматривается ДО<sub>AB</sub> при формировании напряжения  $\underline{U}_d$  по варианту IV в табл. 2.3.

В этом случае (рис. 2.33) сравнительно быстрое цифровое измерение позволяет контролировать напряжение измеряемой петли и использовать напряжение неповрежденных фаз только при снижении этого напряжения ниже заданного значения. Для этого в тракты формирования составляющих поляризующей величины  $\underline{E}_n = k_3 \underline{U}_{AB} + k_n \underline{U}_d$  введены блоки запрета  $B_1$  и  $B_2$ . При  $U_{AB} > U_{пор}$  блок  $B_1$  открыт, а блок  $B_2$  заперт и формируется величина  $\underline{E}_n = k_3 \underline{U}_{AB}$ . Существенное снижение напряжения  $\underline{U}_{AB}$  (обычно ниже 1—2%  $U_{ном}$ ), характеризующее КЗ вблизи места установки защиты, фиксируется блоком  $< U_{пор}$  и приводит к запертию блока  $B_1$  и открытию блока  $B_2$ . В результате поляризующее напряжение при близких КЗ определяется только напряжениями неповрежденных фаз  $\underline{U}_{BC}$  и  $\underline{U}_{CA}$ , используемых для формирования дополнительного напряжения  $\underline{U}_d$  ( $\underline{E}_n = k_n \underline{U}_d$ ).

В зависимости от используемого варианта поляризации (рис. 2.32) ДО обладает определенными динамическими свойствами (см. §7.10).

Особый случай представляет отсутствие напряжения на входе защиты до возникновения КЗ и последующее включение на трехфазное КЗ (например, включение линии, находившейся без напряжения, на трехфазное КЗ в месте установки защиты). Данный режим фиксируется отсутствием как основного или допол-

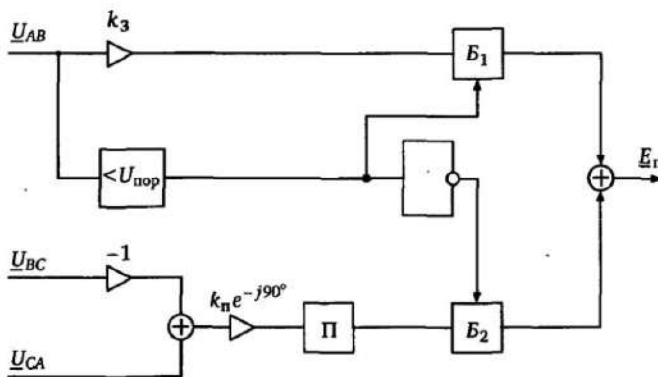


Рис. 2.33. Формирование поляризующей цепи с контролем входного напряжения

нительного напряжения, так и напряжения на входе блоков памяти (рис. 2.32). Сигнал на отключение при фиксации указанного режима вырабатывается (или не вырабатывается) в зависимости от стратегии пользователя, так как селективное выявление повреждения в данном случае невозможно.

Аналогичные проблемы возникают при обеспечении чёткого действия направленных ДО при близких повреждениях на основе других принципов сравнения величин, в частности на основе сравнения абсолютных значений (см. п. 2.5.3). В этом случае в отличие от способов сравнения по фазе особые точки не располагаются на характеристике срабатывания, вследствие чего напряжение поляризации  $k_{\text{п}}U_{\text{д}}$  неповрежденных фаз вводится в обе сравниваемые величины. В результате для ДО с характеристикой, проходящей через начало координат, с учетом (2.44) при условии  $k_2 = -k_4$ , необходимом для обеспечения направленности, имеем

$$E_1 = k_2 I_p + k_{\text{п}} U_{\text{д}}; \quad E_2 = k_3 U_p - k_2 I_p + k_{\text{п}} U_{\text{д}}.$$

При КЗ в месте установки ДО входное напряжение  $U_p = 0$ , отсюда имеем следующее условие срабатывания ДО:

$$|k_2 I_p + k_{\text{п}} U_{\text{д}}| \geq |-k_2 I_p + k_{\text{п}} U_{\text{д}}|,$$

что соответствует ХС реле направления мощности с четкой фиксацией направления повреждения при изменении фазы тока  $I_p$  в зависимости от того, произошло КЗ в точке  $K_1$  или  $K_2$  (см. рис. 2.31,а).

## 2.7. Трехфазные дистанционные органы

Как отмечалось в §2.5, под трехфазным ДО понимается структура, действующая при нескольких видах повреждения, при построении которой используется более чем одна комбинация  $U_p$ ,  $I_p$  из табл. 2.1. Формально структура, обеспечивающая объединение нескольких пофазных ДО, например ступень ДЗ, является трехфазным ДО. Анализ подобных структур полностью основан на анализе отдельных пофазных ДО. Принципиально новые качества получают при выполнении трехфазных ДО на основе сравнения электрических величин, использующих более чем одну комбинацию  $U_p$ ,  $I_p$  из табл. 2.1. Ниже рассматриваются ука-

занные ДО, к которым в первую очередь и относится термин «трехфазные».

**Трехфазные ДО на основе сравнения абсолютных сравнений величин** можно разбить на две группы: ДО на основе выбора максимальной и минимальной из групп величин [44]; фильтровые ДО на основе сравнения абсолютных значений величин, составленных из комбинаций симметричных составляющих [4].

Структура ДО на основе выделения минимальной и максимальной величин показана на рис. 2.34.

При подведении к максиселектору *Max* величин  $I_p$ , пропорциональных разности фазных токов, а к миниселектору *Min* — линейных напряжений  $U_p$ , необходимых для замера петель КЗ при междуфазных повреждениях, условие срабатывания ДО примет вид:

$$k_1 U_{\min} \leq k_2 I_{\max}, \quad (2.67)$$

где  $I_{\max}$  — наибольшая разность фазных токов;  $U_{\min}$  — наименьшее междуфазное напряжение.

С учетом (2.67) ДО срабатывают при междуфазных повреждениях, причем всегда сравниваются сигналы  $|U_p|$  и  $|I_p|$ , соответствующие поврежденным фазам. Дистанционный орган обладает ненаправленной ХС в виде окружности с центром в начале координат и уставкой  $Z_y = k_2/k_1$ .

Из фильтровых ДО на основе сравнения абсолютных значений величин следует в первую очередь выделить ДО на основе следующего алгоритма сравнения:

$$|U_2 - Z_y I_2| \geq |U_1 - Z_y I_1|, \quad (2.68)$$

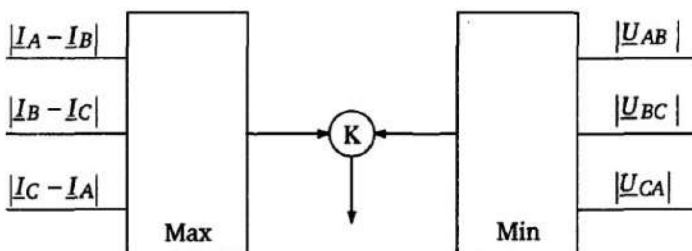


Рис. 2.34. Трехфазный ДО на основе максимального и минимального из абсолютных значений величин

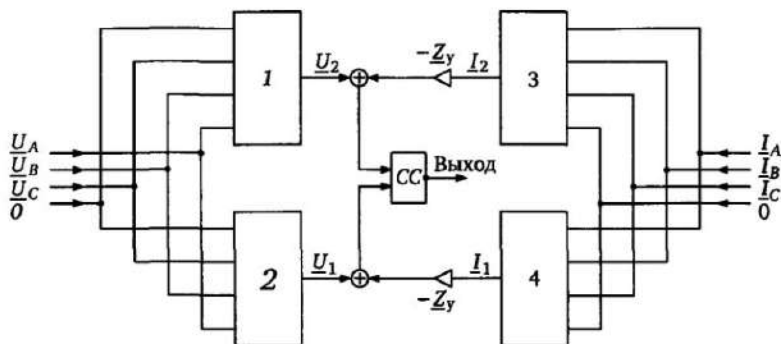


Рис. 2.35. Структура фильтрового направленного ДО

где  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$  и  $I_1$ ,  $I_2$  — симметричные составляющие напряжений и токов прямой и обратной последовательностей.

Структуру данного ДО поясняет рис. 2.35, где 1, 2 — фильтры напряжения обратной и прямой последовательностей; 3, 4 — фильтры тока обратной и прямой последовательностей.

Покажем, что граница действия данного ДО определяется при всех металлических двухфазных КЗ точкой  $Z_{1к} = Z_y$  и что ДО обладает направленностью действия.

Для обобщенной схемы ЭС с двусторонним питанием (рис. 2.36,а) имеем схемы замещения отдельных последовательностей (рис. 2.36,б,в).

При металлических двухфазных КЗ в точке  $K$  (рис. 2.36,а) справедливы следующие соотношения между напряжениями и токами обратной последовательности  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  фазы  $A$  в месте установки ДО (точка 1) и  $\underline{U}_{1к}$ ,  $\underline{U}_{2к}$ ,  $I_{1к}$ ,  $I_{2к}$  в месте повреждения (при равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов ЭС):

$$I_{1к} = -I_{2к} = \frac{E_{\Sigma}}{2Z_{1\Sigma}};$$

$$\underline{U}_{1к} = \underline{U}_{2к} = Z_{2\Sigma} I_{1к} = Z_{1\Sigma} I_{1к},$$

где  $E_{\Sigma}$  — эквивалентная ЭДС, приведенная к точке  $K$ ;  $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$  — эквивалентные сопротивления прямой и обратной последовательностей, приведенные к точке  $K$ .



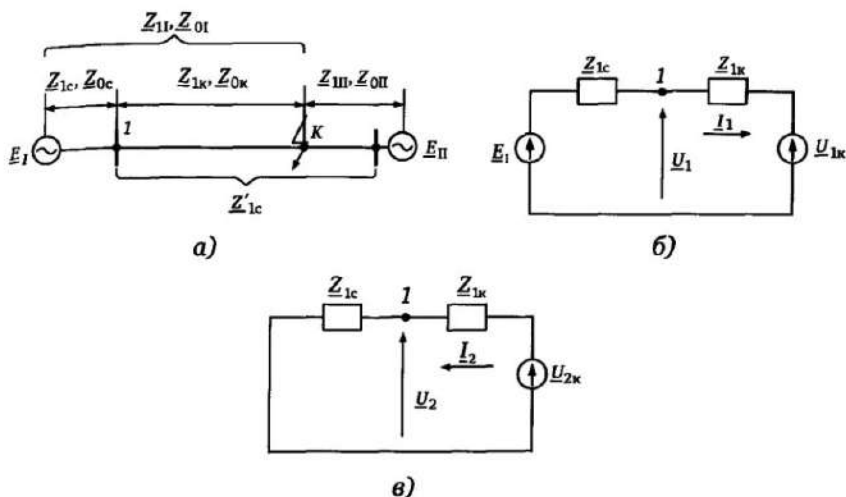


Рис. 2.36. Схемы замещения ЭС при анализе трехфазных фильтровых ДО

С учетом схем замещения прямой и обратной последовательностей (рис. 2.36, б, в) в точке 1 установки ДО имеем

$$\underline{U}_1 = \frac{E_I \underline{Z}_{1к} + \underline{U}_{1к} \underline{Z}_{1c}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}}; \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_{2к} \underline{Z}_{1c}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}}$$

Постановка полученных значений в алгоритм срабатывания (2.68) дает

$$\left| \frac{\underline{U}_{2к} \underline{Z}_{1c}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}} - \left( -\underline{Z}_y \frac{\underline{U}_{2к}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}} \right) \right| \geq \left| \frac{E_I \underline{Z}_{1к} + \underline{U}_{1к} \underline{Z}_{1c}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}} - \underline{Z}_y \frac{E_I - \underline{U}_{1к}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}} \right|,$$

откуда после преобразований с учетом  $\underline{U}_{1к} = \underline{U}_{2к}$  получим

$$|\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1c}| \geq |d(\underline{Z}_{1к} - \underline{Z}_y) + \underline{Z}_y + \underline{Z}_{1c}|, \quad (2.69)$$

где  $d = E_I / \underline{U}_{2к}$ .

Грань срабатывания ДО, соответствующая равенству правых и левых частей (2.69), имеет место при  $\underline{Z}_{1к} = \underline{Z}_y$  независимо от коэффициента  $d$ . При КЗ в начале зоны ( $\underline{Z}_{1к} = 0$ ) из (2.69) имеем

$$|\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1с}| \geq |\underline{Z}_{1с} - (\underline{d}-1)\underline{Z}_y|,$$

что в реальных условиях в большинстве случаев выполняется. В частности, при  $\underline{E}_1 = \underline{E}_2$  при двухфазных КЗ имеем  $\underline{d} = 2$ , откуда из (2.69) при  $\underline{E}_{1\Sigma}$  получим

$$|\underline{Z}_{1с} + \underline{Z}_y| > |\underline{Z}_{1с} - \underline{Z}_y|. \quad (2.70)$$

При близком КЗ «за спиной» изменяется место приложения напряжений  $\underline{U}_{1к}$  и  $\underline{U}_{2к}$ , по отношению к точке 1 установки ДО по сравнению с рис. 2.37,б,в, а, следовательно, изменяются направления токов  $I_1$  и  $I_2$  и знаки перед слагаемыми с  $\underline{Z}_y$ . В результате при  $\underline{Z}_{1к} = 0$  вместо (2.70) получим

$$|\underline{Z}'_{1с} - \underline{Z}_y| < |\underline{Z}'_{1с} + \underline{Z}_y|.$$

где  $\underline{Z}'_{1с}$  — сопротивление противоположной относительно точки 1 части ЭС.

Указанное соответствует чёткому несрабатыванию ДО.

Все полученные соотношения полностью справедливы и при двухфазных КЗ на землю, так как в этом случае также справедливо условие  $\underline{U}_{1к} = \underline{U}_{2к}$ , откуда следует справедливость выражения (2.69), но при других значениях  $\underline{d} = \underline{E}_1/\underline{U}_{2к}$ , соответствующих двухфазному КЗ на землю.

**Трёхфазные ДО на основе сравнения фаз двух электрических величин.** Правильное действие ДО при нескольких видах повреждений может быть обеспечено сравнением по фазе величин  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ , зависящих от комбинаций токов и напряжений различных фаз. В частности, при сравнении компенсированных линейных и фазных напряжений, приведенных в табл. 2.4 [12,13],

Таблица 2.4. Действие ДО на границах зон

Исполнение	$\underline{E}_1$	$\underline{E}_2$	Вид КЗ
I	$\underline{U}_{AB} - (\underline{U}_A - I_B)\underline{Z}_y = \underline{U}'_{AB}$	$\underline{U}_C - (\underline{U}_C - k'I_0)\underline{Z}_y = \underline{U}'_C$	AB, CO, ABO, ACO
II	$\underline{U}_{BC} - (\underline{U}_B - I_C)\underline{Z}_y = \underline{U}'_{BC}$	$\underline{U}_A - (\underline{U}_A - k'I_0)\underline{Z}_y = \underline{U}'_A$	BC, AO, ABO, ACO, BCO
III	$\underline{U}_{CA} - (\underline{U}_C - I_A)\underline{Z}_y = \underline{U}'_{CA}$	$\underline{U}_B - (\underline{U}_B - k'I_0)\underline{Z}_y = \underline{U}'_B$	AC, BO, ABO, ACO, BCO

действие каждого ДО обеспечивается при определенных видах двухфазных и однофазных КЗ. Однако действие при всех видах несимметричных повреждений обеспечивается только совокупностью всех трех ДО по табл. 2.4. Действие ДО на границах зон при различных видах КЗ рассмотрим на примере исполнения I табл. 2.4. При КЗ  $AB$ ,  $ABO$  и переходе через границу зоны действия ( $Z_{AB} = Z_y$ ) величина  $E_1$  изменяет фазу на противоположную, а  $E_2$  изменяется мало и является в данном случае поляризующей величиной. При близких повреждениях данного вида ( $U_{AB} = 0$ ) в зависимости от того, КЗ в зоне или «за спиной», также меняет знак  $E_1$  (направление тока  $I_A - I_B$  изменяется на противоположное). Поэтому ДО является направленным. При повреждениях  $CO$ ,  $ACO$ ,  $BCO$ , связанных с замыканием фазы  $C$  на землю вблизи точки  $Z_{CO} = Z_y$ , изменяется знак  $E_2$ , которая переходит через нулевое значение, а знак  $E_1$  не меняется. При этом виде КЗ ДО является направленным, так как при близких к месту установки ДО повреждениях данного вида в зоне и «за спиной» также изменяется знак  $E_2$  (направление тока  $I_C + k I_0$ ).

Другим вариантом ДО данной группы является реле Бреслера [4], обеспечивающее действие при всех видах двухфазных повреждений ( $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$ ,  $ABO$ ,  $BCO$ ,  $CAO$ ). Для построения ДО данного типа достаточно сравнить по фазе любые два из трех компенсированных линейных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_{AB} &= \underline{U}_{AB} - (I_A - I_B)Z_y; \\ \underline{U}'_{BC} &= \underline{U}_{BC} - (I_B - I_C)Z_y; \\ \underline{U}'_{CA} &= \underline{U}_{CA} - (I_C - I_A)Z_y. \end{aligned} \right\} \quad (2.71)$$

Алгоритм сравнения определяется (например, для напряжений  $\underline{U}'_{AB}$ ,  $\underline{U}'_{BC}$ ) соотношением

$$0 \leq \arg \frac{\underline{U}'_{AB}}{\underline{U}'_{BC}} \leq \pi, \quad (2.72)$$

что соответствует «синусной» схеме сравнения фаз по выражению (2.51).

Если имеется «косинусная» схема сравнения фаз по выражению (2.50), то перед сравнением одну из величин необходимо

сдвинуть на угол  $\pi/2$ . Условие (2.72), соответствующее опережению вектором  $\underline{U}'_{AB}$  вектора  $\underline{U}'_{BC}$  на угол, меньший  $\pi$ , эквивалентно условию положительности мнимой составляющей  $\underline{U}'_{AB}$ , если  $\underline{U}'_{BC}$  лежит на оси абсцисс. Для получения этого необходимо умножить оба вектора  $\underline{U}'_{AB}$  и  $\underline{U}'_{BC}$  на сопряженный вектор  $\underline{U}'_{BC}$ . Таким образом, выражению (2.72) эквивалентно соотношение

$$\text{Im } \underline{U}'_{AB} \underline{U}'_{BC} \geq 0. \quad (2.73)$$

Соотношению (2.73) соответствует выражение

$$|\underline{U}_2 - Z_y I_2| \leq |\underline{U}_1 - Z_y I_1|,$$

которое получается заменой  $\underline{U}'_{AB}$  и  $\underline{U}'_{BC}$  их симметричными составляющими [4]. Это означает с учетом (2.68), что алгоритм реле Бреслера эквивалентен алгоритму фильтрового ДО на основе сравнения абсолютных значений величин. Поэтому характеристики данного ДО описываются также выражением (2.69).

**Трехфазные ДО на основе сравнения фаз нескольких электрических величин.** Из значительного разнообразия известных вариантов ДО данной группы следует выделить в первую очередь следующие.

*Дистанционные органы на основе фиксации порядка чередования компенсированных напряжений.* Как показано в [47], фиксация порядка чередования трех компенсированных линейных напряжений по выражению (2.71) в прямом и обратном направлениях (рис. 2.37) обеспечивает такие же характеристики, как и реле Бреслера.

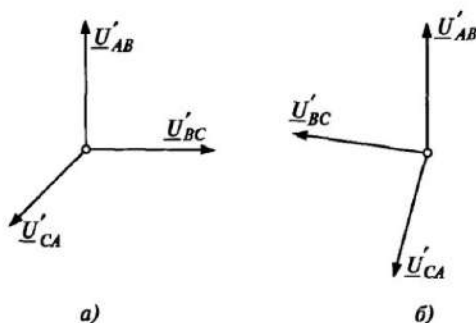


Рис. 2.37. Прямое (а) и обратное (б) чередование трех компенсированных напряжений

При фиксации порядка чередования трех фазных компенсированных напряжений  $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$  аналогично рис. 2.37, где

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_A &= \underline{U}_A - (\underline{I}_A + \underline{k}'_0 \underline{I}_0) \underline{Z}_y; \\ \underline{U}'_B &= \underline{U}_B - (\underline{I}_B + \underline{k}'_0 \underline{I}_0) \underline{Z}_y; \\ \underline{U}'_C &= \underline{U}_C - (\underline{I}_C + \underline{k}'_0 \underline{I}_0) \underline{Z}_y, \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

обеспечивается правильное действие ДО при всех несимметричных повреждениях, как двухфазных, так и однофазных, в том числе и направленность при близких КЗ. Результирующая характеристика ДО образована дугами окружностей, получающимися сравнением по фазе всех возможных пар из трех напряжений (в данном случае трех пар  $\underline{U}'_A$  и  $\underline{U}'_B$ ,  $\underline{U}'_B$  и  $\underline{U}'_C$ ,  $\underline{U}'_C$  и  $\underline{U}'_A$ ).

*Дистанционные органы от замыканий на землю на основе фиксации угловых соотношений между тремя компенсированными фазными напряжениями и током нулевой последовательности.* Данный принцип, предложенный в [13], основан на одновременном сравнении нескольких электрических величин

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= \underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{Z}_y (\underline{I}_A + \underline{k}'_0 \underline{I}_0); \\ \underline{E}_2 &= \underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{Z}_y (\underline{I}_B + \underline{k}'_0 \underline{I}_0); \\ \underline{E}_3 &= \underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{Z}_y (\underline{I}_C + \underline{k}'_0 \underline{I}_0); \\ \underline{E}_4 &= -\underline{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.75)$$

Три компенсированные фазные напряжения  $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$  по выражению (2.75) и ток  $\underline{I}_0$  сравниваются по фазе. Срабатывание ДО происходит, если все четыре вектора находятся в одной полуплоскости, т.е. угол между крайними из них меньше  $\pi$ .

На рис. 2.38 приведены векторные диаграммы четырех сравниваемых величин при различных удаленностях места однофазного КЗ (например, замыкания фазы А) от точки 1 установки ДО.

Как видно из диаграммы, при КЗ вне зоны действия ( $K_1, K_4$ ) угол  $\alpha$  между крайними из четырех векторов, отсчитываемый в направлении расположения остальных, больше  $\pi$ . При КЗ на границе зоны действия ( $K_2$ )  $\alpha = \pi$ . При КЗ в зоне действия ( $K_3$ )

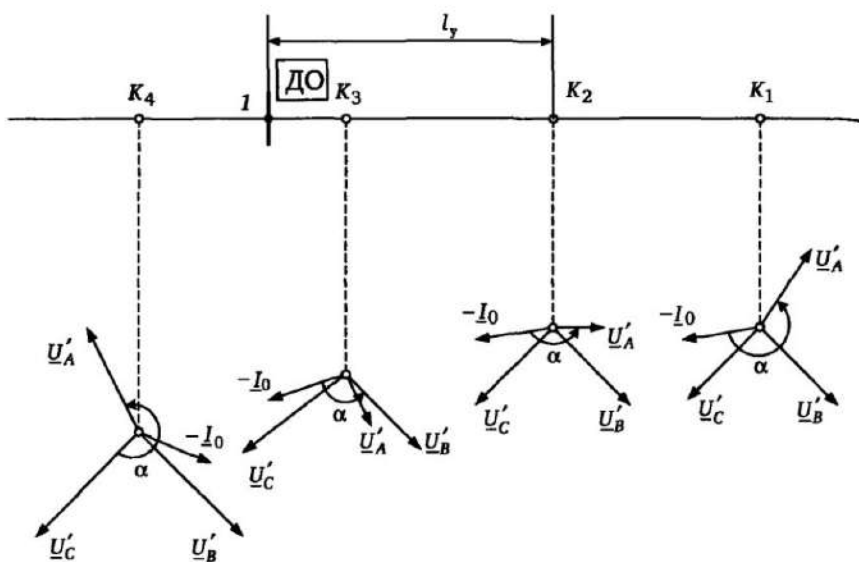


Рис. 2.38. Соотношения между сравниваемыми величинами при различных удаленностях однофазного КЗ

$\alpha < \pi$ . Характеристика ДО в плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$ , где  $\underline{Z}^{(1)} = \underline{U}_\Phi / (\underline{I}_\Phi + k'_0 \underline{I}_0)$ ;  $\underline{U}_\Phi$  и  $\underline{I}_\Phi$  — напряжение и ток поврежденной фазы, есть область, ограниченная в общем случае тремя дугами окружностей и тремя прямыми, получающимися из граничных условий срабатывания, когда в противофазе находятся любые два из сравниваемых векторов. Имеются шесть возможных сочетаний величин, определяющих уравнения граничных линий в плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$ :

$$\left. \begin{aligned} \arg \frac{\underline{U}'_A}{-\underline{I}_0} = \pi; \quad \arg \frac{\underline{U}'_B}{-\underline{I}_0} = \pi; \quad \arg \frac{\underline{U}'_C}{-\underline{I}_0} = \pi; \\ \arg \frac{\underline{U}'_A}{\underline{U}'_B} = \pi; \quad \arg \frac{\underline{U}'_B}{\underline{U}'_C} = \pi; \quad \arg \frac{\underline{U}'_C}{\underline{U}'_A} = \pi. \end{aligned} \right\} \quad (2.76)$$

Уравнения отдельных образующих ХС в плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$  получаются подстановкой в (2.76) значений компенсированных напряжений и тока  $\underline{I}_0$ . В общем случае ХС зависит от расположения точки КЗ, угла между эквивалентными ЭДС в ЭС, переходного сопротивления в месте КЗ, параметров ЭС. При равенстве

ЭДС эквивалентных генераторов и совпадении их по фазе уравнения образующих ХС не зависят от переходного сопротивления. Так, для образующих ХС характеристики ДО, расположенных в первом квадранте комплексной плоскости, при однофазном замыкании фазы А справедливо следующее уравнение:

$$\arg \frac{U'_A}{-I_0} = \arg \frac{U_A - Z_y(I_A + k'_0 I_0)}{-I_0} = \pi, \quad (2.77)$$

что при совпадении по фазе векторов  $I_A + k'_0 I_0$  и  $I_0$  эквивалентно условию

$$\arg(Z^{(1)} - Z_y) = 0. \quad (2.78)$$

Условию (2.78) в плоскости  $Z^{(1)}$  соответствует отрезок прямой, расположенный на луче, проходящем через точку  $Z_y$  параллельно оси абсцисс справа от точки  $Z_y$  (рис. 2.39,а, прямая 1).

Граничному условию нахождения в противофазе напряжений  $U'_A$  и соответствует уравнение

$$\arg \frac{U_A - Z_y(I_A + k'_0 I_0)}{U_C - Z_y(I_C + k'_0 I_0)} = \arg \frac{Z^{(1)} - Z_y}{a_1 Z^{(1)} - a_2 Z_y} = \pi, \quad (2.79)$$

где  $a_1, a_2$  — коэффициенты, определяемые параметрами ЭС.

Уравнение (2.79) соответствует одной из дуг окружностей, образующих ХС (рис. 2.39,а, дуга 2). Хотя результирующая ХС и охватывает начало координат, рассматриваемый ДО является направленным (см. рис. 2.38), так как уравнения граничных ли-

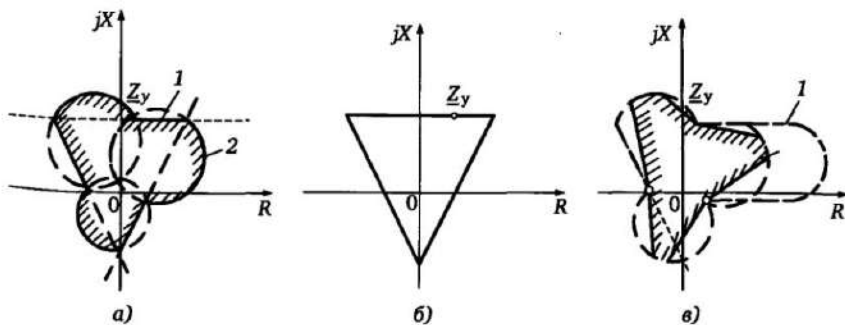


Рис. 2.39. Характеристики трехфазных ДО в плоскости сопротивления

ний зависят от места КЗ. Результирующая область ограничена отрезками трех прямых по уравнениям типа (2.78), дугами трех окружностей по уравнениям типа (2.79) и заштрихована на рис. 2.39,а.

Как частный случай данного ДО можно рассматривать алгоритм, заключающийся в фиксации одновременного отставания векторов  $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$  от вектора  $\underline{I}_0$  на угол, меньший  $\pi$ . При этом граничные линии ХС определяются при однофазных КЗ только тремя уравнениями типа (2.78), что соответствует области срабатывания, ограниченной треугольником (рис. 2.39,б).

Используя алгоритм, описываемый выражениями (2.56) и (2.57), при построении данного ЦИО необходимо сформировать цифровые последовательности, соответствующие векторам  $\underline{E}_1—\underline{E}_4$ , и реализовать алгоритм, обеспечивающий фиксацию нахождения векторов  $\underline{E}_1—\underline{E}_4$  в одной полуплоскости независимо от их чередования. Для построения необходимого алгоритма ЦИО рассмотрим системы векторов (рис. 2.40), соответствующие повреждению в зоне действия.

Предположим, известно, что  $\underline{E}_1$  — крайний правый вектор из пучка векторов  $\underline{E}_1—\underline{E}_4$ , соответствующих условию срабатывания, т.е. угол  $\alpha_{31}$  между крайними векторами  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_3$ , меньше  $\pi$  (рис. 2.40,а). Указанному соответствует одновременное выполнение трех условий:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \alpha_{21} = \arg \underline{E}_2 / \underline{E}_1 \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{31} = \arg \underline{E}_3 / \underline{E}_1 \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{41} = \arg \underline{E}_4 / \underline{E}_1 \leq \pi. \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

Выполнение системы неравенств (2.80) является достаточным, но не необходимым условием, так как для системы векторов на рис. 2.40,б, также соответствующей срабатыванию, система неравенств (2.80) не удовлетворится, ввиду того, что  $\pi \leq \alpha_{41} \leq 2\pi$ . Указанное обусловлено тем, что на рис. 2.40,б вектор  $\underline{E}_1$  не является крайним. Из изложенного следует, что если составить четыре системы неравенств типа (2.80) для случаев, когда каждый из векторов  $\underline{E}_1—\underline{E}_4$  является крайним, то при КЗ в зоне (угол между крайними векторами меньше  $\pi$ ) по крайней мере одна из систем неравенств будет удовлетворяться, а при КЗ вне зоны ни одна из систем удовлетворяться не будет. Таким



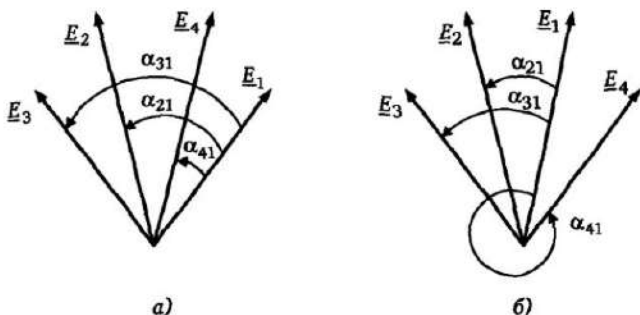


Рис. 2.40. Системы векторов, формируемых в многофазном ЦИО

образом, для фиксации повреждения в зоне действия необходимо выполнение любой из четырех систем неравенств

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq \alpha_{21} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{31} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{41} \leq \pi. \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 0 \leq \alpha_{12} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{32} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{42} \leq \pi. \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 0 \leq \alpha_{13} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{23} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{43} \leq \pi. \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 0 \leq \alpha_{14} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{24} \leq \pi; \\ 0 \leq \alpha_{34} \leq \pi. \end{array} \right\} \quad (2.81)$$

Каждое из неравенств (2.81) соответствует «синусной» характеристике сравнения (см. рис. 2.27,а, характеристика 2).

Реализация каждого из неравенств может быть осуществлена на основе соотношений типа (2.54) при использовании ортогональных составляющих векторов. При использовании мгновенных выборок сигнала «синусную» характеристику обеспечит неравенство

$$u(nT - mT)i(nT) - u(nT)i(nT - mT) \geq 0, \quad (2.82)$$

получаемое из выражения (2.35а) при  $d = 0$ , что соответствует  $\alpha_1 = 0$  (рис. 2.17,б,в).

Используя ортогональные составляющие, получим с учетом выражения (2.54) для первого столбца системы неравенств (2.81)

$$\left. \begin{array}{l} a_{21} = E_{2y}(nT)E_{1x}(nT) - E_{2x}(nT)E_{1y}(nT) \geq 0; \\ a_{31} = E_{3y}(nT)E_{1x}(nT) - E_{3x}(nT)E_{1y}(nT) \geq 0; \\ a_{41} = E_{4y}(nT)E_{1x}(nT) - E_{4x}(nT)E_{1y}(nT) \geq 0. \end{array} \right\} \quad (2.83)$$

Применив аналогичные (2.83) обозначения и для других условий в общей системе неравенств (2.81), получим следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} a_{21} \geq 0; \quad a_{31} \geq 0; \quad a_{41} \geq 0; \\ a_{12} = -a_{21} \geq 0; \quad a_{32} \geq 0; \quad a_{42} \geq 0; \\ a_{13} = -a_{31} \geq 0; \quad a_{23} = -a_{32} \geq 0; \quad a_{43} \geq 0; \\ a_{14} = -a_{41} \geq 0; \quad a_{24} = -a_{42} \geq 0; \quad a_{34} = -a_{43} \geq 0, \end{aligned} \right\} (2.84)$$

выполнение любого из которых соответствует повреждению в зоне действия. С учетом (2.84) дополнительно к  $a_{21}$ ,  $a_{31}$ ,  $a_{41}$  в (2.83) необходимо вычислить еще три величины  $a_{32}$ ,  $a_{42}$ ,  $a_{43}$  и проверить соотношения:

$$\left. \begin{aligned} a_{32} = E_{3y}(nT)E_{2x}(nT) - E_{3x}(nT)E_{2y}(nT) \geq 0; \\ a_{41} = E_{4y}(nT)E_{2x}(nT) - E_{4x}(nT)E_{2y}(nT) \geq 0; \\ a_{42} = E_{4y}(nT)E_{3x}(nT) - E_{4x}(nT)E_{3y}(nT) \geq 0. \end{aligned} \right\} (2.85)$$

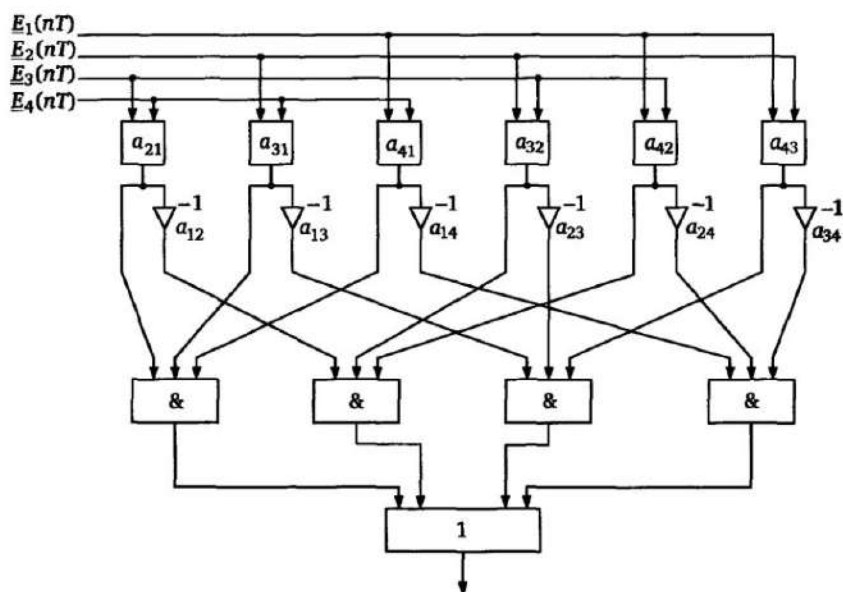


Рис. 2.41. Элементы структуры многофазного ЦИО

С учетом соотношений (2.84), структура цифрового трехфазного ДО на основе одновременного сравнения фаз четырех величин по выражениям (2.75) показана на рис. 2.41.

При этом последовательности  $E_1(nT) \text{—} E_4(nT)$  подводятся к блокам  $a_{21} \text{—} a_{43}$ . Логические схемы И и схема ИЛИ обеспечивают фиксацию каждого условия (2.84), оперируя только со знаками входных последовательностей. Инверсные величины  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{14}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{24}$ ,  $a_{34}$  в (2.84) получаются соответствующими сменами знаков (умножением на  $-1$ ).

## Глава 3

# Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты

### 3.1. Уравнения и характеристики цифровых фильтров

Цифровые фильтры (ЦФ) относятся к классу цифровых систем, т.е. систем, осуществляющих однозначное преобразование одной цифровой последовательности  $x(nT)$  (входной) в другую  $y(nT)$  (выходную).

В цифровых системах регистрация и ввод аналоговых сигналов производятся путем их дискретизации в равноотстоящие моменты времени, т.е. вместо сигнала  $x(t)$  используется дискретный сигнал  $x(nT)$ , фиксируемый в цифровом виде с определенным уровнем квантования. Для последующего использования цифровых сигналов во многих случаях необходима их обработка, позволяющая выделить содержащуюся в них информацию. В частности, как и в аналоговой технике, возникает необходимость выделения среднего значения сигнала по его выборкам, дифференцирования или интегрирования, подавления составляющих определенных частот во входном сигнале  $x(t)$ . Для выполнения этих функций производятся операции с цифровыми последовательностями  $x(nT)$ , превращающие их в другие последовательности  $y(nT)$ , обладающие требуемыми свойствами (выделение среднего значения  $x(nT)$ , дифференцирование  $x(nT)$  и т.д.). В частности, при усреднении (сглаживании) сигнала  $x(nT)$  можно, например, использовать выражение

$$y(nT) = \frac{1}{3} [x(nT - 2T) + x(nT - T) + x(nT)].$$

Данное выражение описывает простейший цифровой фильтр с входным сигналом  $x(nT)$  и выходным сигналом  $y(nT)$ , причем используются две предшествующие выборки сигнала  $x(nT)$ . Вычисления производятся непрерывно, т.е. номер выборки  $n$  из-

меняется в процессе вычислений. В более общем случае на текущем этапе вычислений используются предшествующие значения не только сигнала  $x(nT)$ , но и выходного сигнала  $y(nT)$ .

Некоторые алгоритмы ЦИО, осуществляющие линейные преобразования цифровых последовательностей, например алгоритмы вычисления векторов (см. §2.2), по структуре близки к цифровым фильтрам, однако имеют особенности, связанные с умножением выборок входных сигналов на комплексные коэффициенты.

Структуры фильтрующих цифровых систем могут быть достаточно разнообразными. При этом не всегда обязательно наличие отдельных ЦФ, так как определенными фильтрующими свойствами обладают сами алгоритмы преобразований цифровых последовательностей в ЦИО. Ниже рассматриваются основные характеристики систем цифровой обработки сигналов, которые используются в дальнейшем при анализе характеристик ЦИО.

Единичный импульс  $\delta(nT)$  (рис. 3.1, а) является одной из последовательностей, играющих важную роль в теории цифровой обработки сигналов. Он определяется как последовательность со значением

$$\delta(nT) = \begin{cases} 0, & nT \neq 0; \\ 1, & nT = 0. \end{cases}$$

Единичный импульс, сдвинутый во времени на  $mT$ , т. е. на  $m$  циклов дискретизации (рис. 3.1, б), описывается соотношениями:

$$\delta(nT - mT) = \begin{cases} 1, & nT = mT; \\ 0, & nT \neq mT. \end{cases}$$

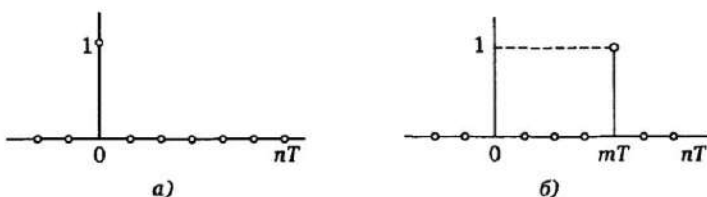


Рис. 3.1. Единичные импульсы

Импульсной характеристикой цифровой системы  $h(nT)$  является выходная последовательность  $y(nT)$ , возникающая при входной последовательности в виде единичного импульса  $\delta(nT)$ . Цифровые фильтры принадлежат к классу линейных инвариантных к сдвигу цифровых систем, для которых справедлив принцип суперпозиции. Инвариантность систем к сдвигу характеризуется следующим свойством: если  $y(nT)$  — реакция на  $x(nT)$ , то  $y(nT - mT)$  — реакция на  $x(nT - mT)$ . Для указанных систем связь между входной и выходной последовательностями определяется формулами свертки:

$$y(nT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(mT)h(nT - mT),$$

или при замене переменных

$$y(nT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(mT)x(nT - mT).$$

Импульсная характеристика  $h(nT)$  полностью характеризует цифровую систему, так как на её основе при известной входной последовательности  $x(nT)$  определяется выходная последовательность  $y(nT)$ .

В общем случае любой цифровой фильтр описывается линейным разностным уравнением  $M$ -го порядка с постоянными коэффициентами вида

$$\sum_{k=0}^M b_k y(nT - kT) = \sum_{k=0}^M a_k x(nT - kT), \quad (3.1)$$

откуда имеем выходную величину  $y(nT)$  при  $b_0 = 1$ :

$$y(nT) = \sum_{k=0}^M a_k x(nT - kT) - \sum_{k=1}^M b_k y(nT - kT). \quad (3.2)$$

Уравнение (3.2) определяет рекурсивный алгоритм вычислений, в котором используются как выборки сигнала  $x(nT)$ , так и предшествующие выборки выходного сигнала  $y(nT)$ , и соответствует рекурсивному ЦФ.

В частном случае выходная величина определяется только зна-

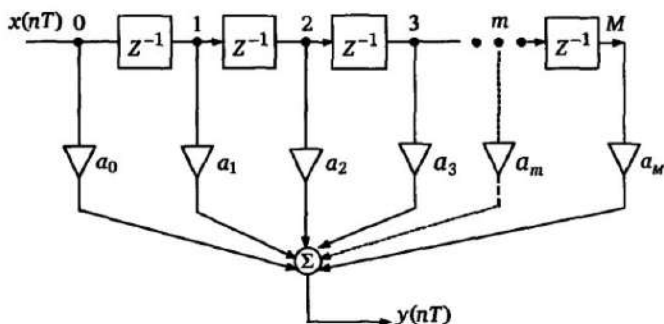


Рис. 3.2. Структура нерекурсивного ЦФ

чениями выборок входной величины, и уравнение (3.2) принимает вид:

$$y(nT) = \sum_{k=0}^M a_k x(nT - kT). \quad (3.3)$$

Это уравнение определяет нерекурсивный цифровой фильтр, одна из возможных структур которого приведена на рис. 3.2.

Найдем импульсную характеристику  $h(nT)$  нерекурсивного фильтра, описываемого уравнением (3.3), соответствующую выходному сигналу  $y(nT)$  (рис. 3.2) при входном сигнале в виде одиночного импульса (рис. 3.1,а), т.е. при  $x(nT) = \delta(nT)$ . Так как блоки  $Z^{-1}$  соответствуют элементам памяти, задерживающим входной сигнал на период дискретизации  $T$ , то в момент  $nT = 0$  имеем сигнал  $\delta(nT)$  в точке 0 (рис. 3.2) и нулевые сигналы во всех остальных точках, т.е. на выходе сумматора  $\Sigma$  при  $nT = 0$  имеем  $y(0) = a_0 \delta(nT)$ . В момент  $nT = T$  в точке 0 сигнал равен нулю, так как входной сигнал уже отсутствует, но в точке 1 появляется запомненный блоком  $Z^{-1}$  сигнал  $\delta(nT)$ , который умножается на коэффициент  $a_1$  и подводится к сумматору. Сигналы в точках 2, 3, ... равны при этом нулю. Таким образом, в момент  $nT = T$  выходной сигнал соответствует смещенному на  $T$  единичному импульсу, умноженному на коэффициент  $a_1$ , т.е.  $y(T) = a_1 \delta(nT - T)$ . С учетом этого, в момент  $mT$  ( $m \leq M$ ) имеем единичный сигнал только в точке  $m$  схемы рис. 3.2 и выходной сигнал есть смещенный на  $mT$  единичный импульс (рис. 3.1,б), умноженный на коэффициент  $a_m$ , т.е.  $y(mT) = a_m \delta(nT - mT)$ . Та-

ким образом, импульсная характеристика нерекурсивного ЦФ по выражению (3.3) имеет конечное число членов  $M + 1$  и описывается выражением

$$h(nT) = a_0 \delta(nT) + a_1 \delta(nT - T) + \dots + a_M \delta(nT - MT) = \sum_{k=0}^M a_k \delta(nT - kT). \quad (3.4)$$

Цифровые фильтры, имеющие импульсную характеристику  $h(nT)$  с конечным числом коэффициентов (конечной длины) и описываемые выражениями (3.3), (3.4), носят название КИХ-фильтров. В отличие от них у рекурсивных фильтров, описываемых выражением (3.2), характеристика  $h(nT)$  имеет бесконечное число членов, так как определяется не только входным, но и выходным сигналом  $y(nT)$ . Эти фильтры носят название БИХ-фильтров (ЦФ с бесконечной импульсной характеристикой). Прототипами их являются обычные частотные фильтры, у которых переходный процесс определяется составляющими  $A_k e^{-b_k t}$ ; КИХ-фильтры прототипов в аналоговых устройствах не имеют.

### 3.2. Частотные характеристики и передаточные функции ЦФ

Определим выходной установившийся сигнал  $y(nT)$  ЦФ с известной импульсной характеристикой  $h(nT)$  при входном сигнале  $x(nT)$ , являющемся комплексной экспонентой, т.е. при  $x(nT) = e^{j\omega nT}$ . Для этого применим формулу свертки [14]:

$$\begin{aligned} y(nT) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)x(nT - kT) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)e^{j\omega(nT - kT)} = \\ &= e^{j\omega nT} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)e^{-j\omega kT} = \underline{H}(\omega)e^{j\omega nT} = \underline{H}(\omega)x(nT), \end{aligned} \quad (3.5)$$

где

$$\underline{H}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)e^{-j\omega kT}. \quad (3.6)$$

Из (3.5) и (3.6) следует, что при входном сигнале в виде ком-



плексной экспоненциальной последовательности  $e^{j\omega nT}$  выходной установившийся сигнал является такой же последовательностью, умноженной на постоянный комплексный множитель  $\underline{H}(\omega)$ , зависящий от частоты входной последовательности  $\omega$  и коэффициентов импульсной характеристики ЦФ  $h(nT)$ . Таким образом, выходная последовательность отличается от входной изменением значения каждого члена в  $|\underline{H}(\omega)|$  раз и сдвигом по фазе на угол  $\beta = \arg \underline{H}(\omega)$ .

Величина  $\underline{H}(\omega)$  по выражению (3.6) является частотной характеристикой ЦФ, связывающей входные и выходные последовательности при входном сигнале  $x(nT) = e^{j\omega nT}$ . Характеристика  $\underline{H}(\omega)$  определяет реакцию и на вещественный синусоидальный сигнал, который можно представить как сумму двух комплексных экспонент:

$$x(nT) = \sin(\omega nT + \psi) = \frac{1}{2j} [e^{j(\omega nT + \psi)} - e^{-j(\omega nT + \psi)}]. \quad (3.7)$$

Подставив каждую из составляющих (3.7) в выражение (3.5), получим

$$y(nT) = \frac{1}{2j} [\underline{H}(\omega) e^{j\psi} e^{j\omega nT} - \underline{H}(-\omega) e^{-j\psi} e^{-j\omega nT}], \quad (3.8)$$

где

$$\underline{H}(-\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT) e^{jk\omega T}. \quad (3.9)$$

Цифровые фильтры относятся к цифровым системам, у которых коэффициенты импульсной характеристики  $a_0 \dots a_M$  по выражению (3.4) являются действительными числами. Для таких систем характеристики  $\underline{H}(\omega)$  и  $\underline{H}(-\omega)$  являются комплексно сопряженными, т.е.

$$|\underline{H}(\omega)| = |\underline{H}(-\omega)|; \quad \beta(\omega) = -\beta(-\omega). \quad (3.10)$$

Алгоритмы ЦИО, как будет показано ниже, данным свойством не обладают. Построение, поясняющее выражение (3.10) для  $\underline{H}(\omega)$  и  $\underline{H}(-\omega)$  на основе (3.6) и (3.9), приведено на рис. 3.3,а для случая  $M = 2$ .

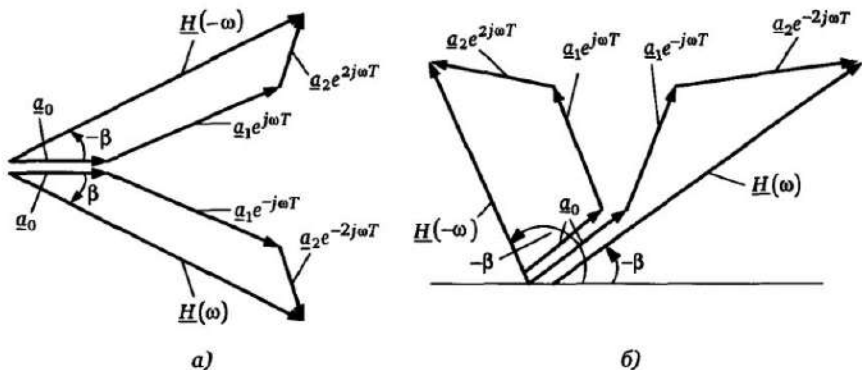


Рис. 3.3. Величины  $H(\omega)$  и  $H(-\omega)$  при действительных (а) и комплексных (б) коэффициентах

С учетом (3.10) выражение (3.8) преобразуется к виду

$$y(nT) = H(\omega) \sin[\omega nT + \varphi + \beta(\omega)], \quad (3.11)$$

откуда следует, что при входном дискретизированном синусоидальном сигнале установившийся выходной сигнал ЦФ является также дискретизированным синусоидальным сигналом, изменённым по амплитуде в  $H(\omega)$  раз и сдвинутым по фазе на угол  $\beta = \arg H(\omega)$ .

Подставив в (3.6) вместо  $\omega$  значение  $\omega + k2\pi/T$ , где  $k$  — целое число, получим

$$H(\omega) = H(\omega + k2\pi/T),$$

т.е. частотная характеристика является периодической функцией частоты  $\omega$  с периодом  $\Delta\omega = 2\pi/T$  и ЦФ одинаково реагирует на частоты  $\omega$  и  $\omega + k2\pi/T$ . В качестве примера на рис. 3.4 приведены характеристики КИХ-фильтра, описываемого уравнением

$$y(nT) = x(nT) + x(nT-T) + \dots + x(nT-mT), \quad (3.12)$$

который имеет импульсную характеристику  $h(nT)$  (рис. 3.4,а):

$$h(nT) = \sum_{k=0}^m \delta(nT - kT).$$

Используя (3.6), получаем следующую частотную характеристику данного ЦФ:

$$\underline{H}(\omega) = \sum_{k=0}^m e^{-jk\omega T} = \frac{1 - e^{-j\omega T(m+1)}}{1 - e^{-j\omega T}} = \frac{\sin \omega T(m+1)/2}{\sin \omega T/2} e^{-j\omega T/2}.$$

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ЦФ для случая  $m = 2$  приведены на рис. 3.4, б, в. В данном случае фильтр близок по свойствам к интегрирующему звену, подавляющему в определенной полосе составляющие высоких частот.

Исследование свойств последовательностей и цифровых сис-

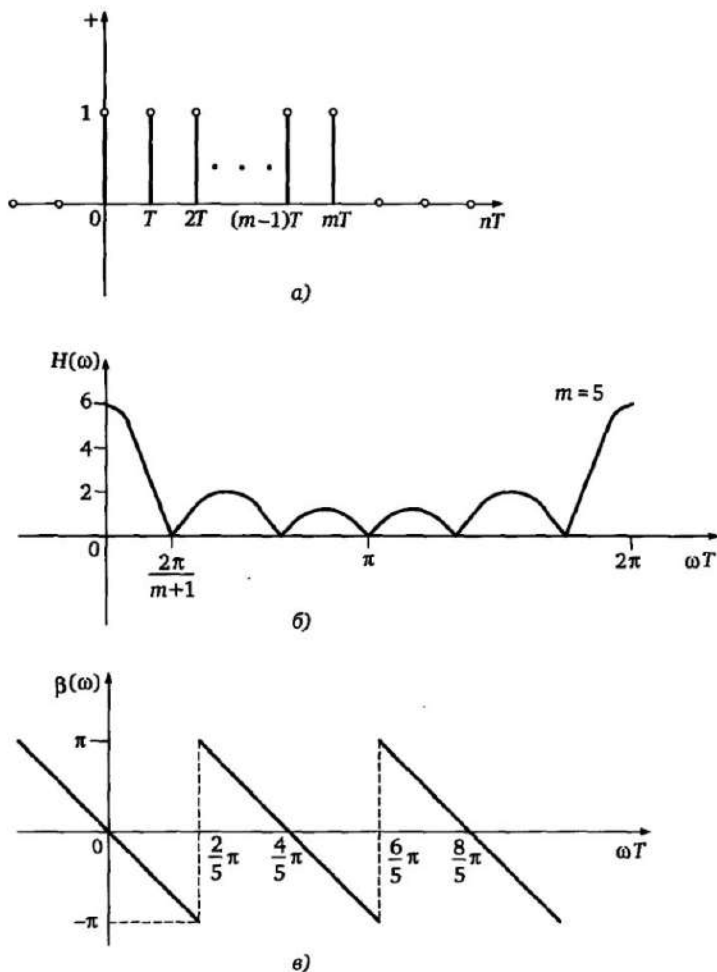


Рис. 3.4. Характеристики интегрирующего КИХ-фильтра

тем удобно проводить методами  $z$ -преобразования, определяемого для последовательности  $x(n)$  следующим образом:

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}. \quad (3.13)$$

Применяя свойства  $z$ -преобразования к последовательностям в левой и правой частях уравнения (3.1), получаем

$$\sum_{k=0}^M b_k z^{-k} Y(z) = \sum_{k=0}^M a_k z^{-k} X(z),$$

откуда имеем выражение для передаточной функции системы

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M a_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}, \quad (3.14)$$

т.е. передаточная функция  $H(z)$  является  $z$ -преобразованием импульсной характеристики системы  $h(nT)$ . Поэтому для интегрирующего КИХ-фильтра по выражению (3.12) имеем

$$Y(z) = X(z)(1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-m});$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^m z^{-k} = \frac{1 - z^{m+1}}{1 - z^{-1}}.$$

И в более общем случае, для БИХ-фильтров передаточная функция определяется  $z$ -преобразованием импульсной характеристики на основе соотношения

$$H(z) = \sum_{k=0}^m h(k)z^{-k}. \quad (3.15)$$

Из сопоставления выражений (3.6) и (3.15) следует важное правило построения частотных характеристик цифровых систем, в частности ЦФ, по их передаточным функциям  $H(z)$ , справедливое и для частотных характеристик алгоритмов ЦИО (см. ни-

же): для нахождения  $\underline{H}(\omega)$ , достаточно осуществить в  $H(z)$  постановку  $z = e^{j\omega T}$ , т. е.

$$\underline{H}(\omega) = \underline{H}(z) \text{ при } z = e^{j\omega T}. \quad (3.16)$$

### 3.3. Частотные характеристики алгоритмов цифрового измерения синусоидальных величин

Рассмотренные в §2.2 алгоритмы вычисления векторов по выборкам мгновенных значений синусоидальных величин можно рассматривать как уравнения, описывающие цифровые системы, входными сигналами которых являются действительные цифровые последовательности  $u(nT)$ , а выходными — комплексные цифровые последовательности  $\underline{U}(nT)$ , которые могут характеризоваться и двумя действительными последовательностями, например  $U_x(nT)$ ,  $U_y(nT)$  (см. рис. 2.9).

Так как в результате измерения должны быть получены параметры вектора (амплитуда  $U$ , фаза  $\varphi$ ), зависящие как от  $U_x(nT)$ , так и от  $U_y(nT)$ , полноценно исследовать свойства алгоритма можно, учитывая эти последовательности одновременно, т. е. рассматривая цифровую систему с входным сигналом в виде одной комплексной последовательности  $\underline{U}(nT)$ . В этом случае имеется аналогия между структурами алгоритмов ЦИО и цифровых фильтров с существенным различием, заключающимся в том, что уравнения, описывающие алгоритмы ЦИО, содержат не действительные, а комплексные коэффициенты. Структуры алгоритмов в отличие от ЦФ содержат блоки умножения выборок на комплексные числа, например  $\underline{a}_0$ ,  $\underline{a}_1$ ,  $\underline{a}_2$  на рис. 2.9, а.

С учетом этого алгоритм цифрового преобразования действительной цифровой последовательности  $u(nT)$  в векторную последовательность  $\underline{D}(nT)$  характеризует эквивалентную цифровую систему с комплексными коэффициентами и имеет в некурсивной форме вид

$$\underline{D}(nT) = \underline{a}_0 u(nT) + \underline{a}_1 u(nT-T) + \dots + \underline{a}_m u(nT-mT), \quad (3.17)$$

где  $\underline{a}_0 - \underline{a}_m$  — комплексные коэффициенты.

Импульсная характеристика  $\underline{h}(nT)$  цифровой системы по выражению (3.17) описывается соотношением

$$\underline{h}(nT) = \underline{a}_0 \delta(nT) + \underline{a}_1 \delta(nT-T) + \dots + \underline{a}_m \delta(nT-mT), \quad (3.18)$$

что аналогично выражению (3.4) для ЦФ, за исключением того, что коэффициенты  $\underline{a}_0$ — $\underline{a}_m$  в общем случае — комплексные числа. Поэтому передаточная функция эквивалентной алгоритму цифровой системы  $H(z)$  с учетом (3.15) описывается соотношением

$$\underline{H}(z) = \sum_{k=0}^m h(kT)z^{-k} = \underline{a}_0 + \underline{a}_1 z^{-1} + \dots + \underline{a}_m z^{-m} \quad (3.19)$$

и также содержит комплексные коэффициенты.

С учетом изложенного, структуру алгоритма цифрового измерения вектора можно рассматривать как цифровой фильтр с комплексными коэффициентами. Однако если задачей цифрового фильтра является подавление или выделение входных составляющих определенных частот, то в данном случае решается задача измерения вектора, характеризующего синусоидальную величину, по выборкам мгновенных значений этой величины. Алгоритмы измерения синусоидальной величины используют прежде всего тот факт, что частота синусоидальной величины  $\omega_0$  заранее известна (она учтена в числе  $N$  выборок за период частоты  $\omega_0$ , так как  $N = 2\pi/(\omega_0 T)$ ). При изменении частоты входного сигнала ( $\omega \neq \omega_0$ ) измерение вектора искажается. Зависимость изменения параметров измеряемого вектора, в частности, амплитуды, от частоты определяет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) рассматриваемых алгоритмов. При этом АЧХ алгоритмов определяет свойства алгоритмов при несинусоидальных входных сигналах и в переходных режимах, а также необходимые параметры аналоговой и цифровой фильтрации в ЦИО, которые выбираются с учетом как спектра входного сигнала, так и частотных свойств самих алгоритмов.

Наличие комплексных коэффициентов  $\underline{a}_0$ — $\underline{a}_m$  в импульсной характеристике  $\underline{h}(nT)$  и в передаточной функции  $\underline{H}(z)$  по выражениям (3.18), (3.19) принципиально отличает свойства алгоритмов измерения векторов и их частотные характеристики от характеристик цифровых фильтров.

Прежде всего при входном синусоидальном сигнале  $x(nT)$  по выражению (3.3) выходной сигнал  $y(nT)$  не является синусоидальным, а характеризуется вращающимся вектором (см. рис. 2.6,б). Это обусловлено тем, что при комплексных коэффициентах  $\underline{a}$ — $\underline{a}_m$  величины  $\underline{H}(\omega)$ ,  $\underline{H}(-\omega)$  в выражении (3.8) не являются комплексно-

сопряженными числами, т.е. не выполняется соотношение (3.10). Несопряженность  $\underline{H}(\omega)$  и  $\underline{H}(-\omega)$  при комплексных коэффициентах  $\underline{a}_0 - \underline{a}_m$  поясняет рис. 3.3,б.

Определим выходной сигнал  $\underline{D}(nT)$  цифровой системы с алгоритмом (3.17) с передаточной функцией  $\underline{H}(z)$  по выражению (3.19), соответствующей алгоритму измерения вектора на основе выборок сигнала  $u(nT) = \sin(\omega nT + \psi)$  в общем случае при  $\omega \neq \omega_0$  [5]. Из (3.8) при использовании нерекурсивной обработки  $m$  выборок сигнала в соответствии с (3.17) получим:

$$\underline{D}(nT) = \frac{e^{j(\omega nT + \psi)}}{2j} \underline{H}(\omega) - \frac{e^{-j(\omega nT + \psi)}}{2j} \underline{H}(-\omega) = \frac{1}{2} [\underline{D}_1(n, \omega) - \underline{D}_2(n, \omega)], \quad (3.20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \underline{H}(\omega) &= \sum_{k=0}^m \underline{h}(kT) e^{-j\omega kT} = H(\omega) e^{j\beta(\omega)}; \quad \beta(\omega) = \arg \underline{H}(\omega); \\ \underline{H}(-\omega) &= \sum_{k=0}^m \underline{h}(kT) e^{j\omega kT} = H(-\omega) e^{j\beta(-\omega)}; \quad \beta(-\omega) = \arg \underline{H}(-\omega); \\ \underline{D}_1(n, \omega) &= \underline{H}(\omega) e^{j\alpha(n, \omega)}; \quad \underline{D}_2(n, \omega) = \underline{H}(-\omega) e^{-j\alpha(n, \omega)}; \\ \alpha(n, \omega) &= \omega nT + \psi - \pi/2. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

При изменении  $n$  годограф  $\underline{D}(nT)$  по выражению (3.20) описывает в комплексной плоскости эллипс (рис. 3.5,а), повернутый относительно осей координат на угол

$$\Delta\varphi = \frac{\beta(\omega) + \beta(-\omega)}{2}.$$

Большая  $A_1(\omega)$  и малая  $A_2(\omega)$  полуоси эллипса равны

$$A_1(\omega) = \frac{1}{2} |\underline{H}(\omega) + \underline{H}(-\omega)|; \quad A_2(\omega) = \frac{1}{2} |\underline{H}(\omega) - \underline{H}(-\omega)|. \quad (3.22)$$

При изменении  $n$  выходной комплексный сигнал соответствует точке, движущейся по эллипсу (рис. 3.5,а).

При вещественных импульсной характеристике и передаточной функции с учетом (3.10) имеем  $\Delta\varphi = 0$ ;  $A_1(\omega) = H(\omega)$ ;  $A_2(\omega) = 0$ , и эллипс вытягивается в отрезок прямой (рис. 3.5,б).

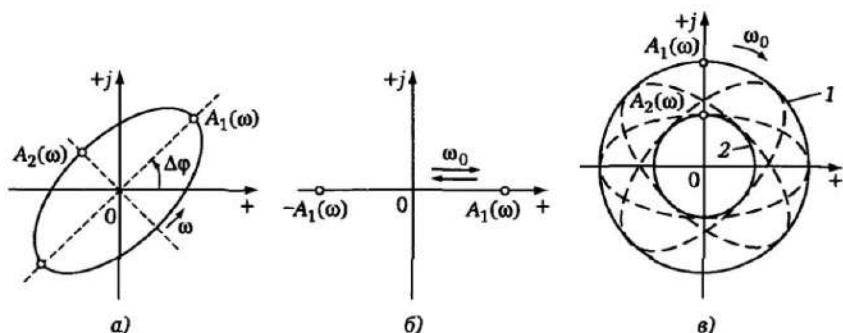


Рис. 3.5. Изменение векторов при отклонении частоты ( $\omega \neq \omega_0$ )

Результирующий сигнал является при этом действительной синусоидальной функцией, дискретизированной во времени, изменяющейся от  $A_1(\omega)$  до  $-A_1(\omega)$  (рис. 3.5,б) в соответствии с (3.11) при  $H(\omega) = A_1(\omega)$ .

Таким образом, в общем случае в соответствии с рис. 3.5,а и соотношением (3.20) амплитуда измеряемого вектора не является постоянной во времени, так как конец вектора описывает не окружность, а эллипс и изменяется при входном единичном по амплитуде синусоидальном сигнале в пределах от  $A_2(\omega)$  до  $A_1(\omega)$ . С учетом этого имеются две АЧХ  $A_1(\omega)$ ,  $A_2(\omega)$ , ограничивающие возможные изменения амплитуды вектора сверху и снизу.

Для анализа измеряемого вектора  $\underline{D}(nT)$  по выражению (3.20) при различных частотах во многих случаях целесообразно произвести операцию «останова» вращающегося вектора  $\underline{U}(nT) = Ue^{j(\omega_0 nT + \psi)}$  (рис. 2.6,б) путем умножения его на оператор  $e^{-j\omega_0 nT}$ . При этом получим для дискретизированного синусоидального сигнала частоты  $\omega_0$  постоянный по времени вектор  $\underline{U}(nT) = Ue^{-j\psi}$ , что соответствует операциям с синусоидальными величинами, применяемыми в символическом методе анализа цепей и сигналов переменного тока. Для цифровой системы по выражению (3.17) эта операция с выходным сигналом  $\underline{D}(nT)$  имеет вид

$$F(nT) = \underline{D}(nT)e^{-j\omega_0 nT}. \quad (3.23)$$

Однако постоянный во времени выходной сигнал, соответствующий измеряемому вектору при операции (3.23), получается



при движении конца вектора  $\underline{D}(nT)$  по окружности с частотой  $\omega_0$  (см. рис. 2.6,б). Для более общего случая движения по эллипсу при  $\omega \neq \omega_0$  (рис. 3.5,а) выполнение (3.23) соответствует одновременно двум движениям —  $\underline{D}(nT)$  по эллипсу (рис. 3.5,а) с частотой  $\omega$  и вращению эллипса с частотой  $-\omega_0$  относительно начала координат, что определяется множителем  $e^{-j\omega_0 nT}$ . Так как в общем случае частоты  $\omega$  и  $-\omega_0$  не кратны, конец результирующего вектора может быть расположен в отдельные моменты времени в области, ограниченной кольцом (рис. 3.5,в) с наружным радиусом  $A_1(\omega)$  и внутренним радиусом  $A_2(\omega)$ .

Исследуем на основе полученных соотношений частотные свойства некоторых алгоритмов вычисления векторов.

**Алгоритмы с использованием производных.** Передаточная функция  $H(z)$  и частотные характеристики алгоритма (2.12) с учетом (3.15), (3.16)

$$H(z) = \frac{N}{2\pi} + j - \frac{N}{2\pi} z^{-1};$$

$$\underline{H}(\omega) = \frac{N}{2\pi} + j - \frac{N}{2\pi} e^{-j\omega T};$$

$$\underline{H}(-\omega) = \frac{N}{2\pi} + j - \frac{N}{2\pi} e^{j\omega T}.$$

Годографы  $\underline{H}(\omega)$  и  $\underline{H}(-\omega)$  описывают одну и ту же окружность (рис. 3.6,а), находясь в различных ее точках. Частотные свойства данного алгоритма характеризуют в относительных единицах  $q = \omega/\omega_0$  зависимости  $A_1 = f(q)$  (рис. 3.6,б), построенные на основе (3.22) при различных  $N$ .

Они определяют изменение наружного радиуса кольца области измерения (рис. 3.6,в) в зависимости от частоты входного сигнала, характеризуемой величиной  $q$ . Как видно из рис. 3.6,б, с ростом  $N$  дифференцирующие свойства алгоритма (усиление сигнала высокой частоты) увеличиваются. Для оценки точности алгоритма на основной частоте  $\omega_0$  на рис. 3.6,в приведены построенные на основе (3.22) зависимости  $A_1 = f(N)$ ,  $A_2 = f(N)$  при  $\omega = \omega_0$  ( $q = 1$ ) и изменении  $N$ , характеризующие точность обработки синусоидального воздействия основной частоты. Как видно из рис. 3.6,в, данный алгоритм имеет значительные пульсации измерений, становящиеся менее 5% лишь при  $N \geq 24$ , что

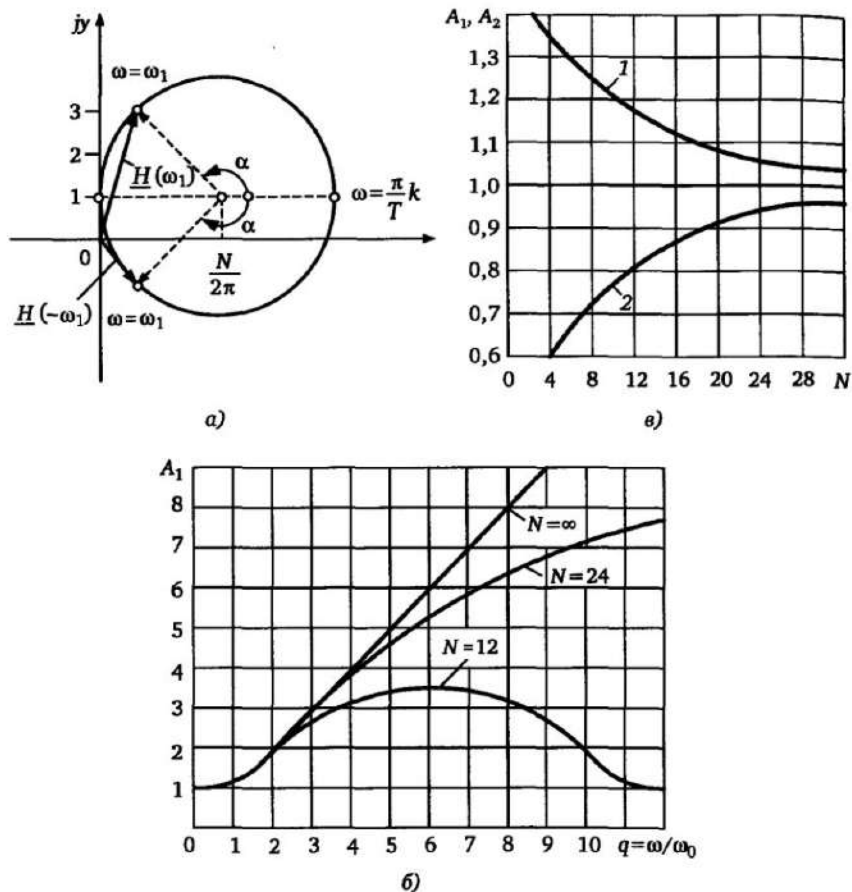


Рис. 3.6. Частотные характеристики алгоритмов с использованием производных:  
 а — зависимости  $H(\omega)$ ,  $H(-\omega)$ ; б — зависимости  $A_1(q)$  при различных  $N$ ;  
 в — зависимости  $A_1(N)$  и  $A_2(N)$  при  $q = 1$

требует для получения необходимой точности (1—2%) значительного быстродействия вычислительных средств.

Аналогичными методами исследуются частотные свойства значительного класса алгоритмов ЦИО, описываемых импульсными характеристиками  $\underline{h}(nT)$  вида (3.18) с комплексными коэффициентами.

В частности, широко применяемому алгоритму двух выборок (2.16) соответствует с учетом (3.15) передаточная функция

$$H(z) = \frac{1}{\sin \beta} (e^{j\beta} - z^{-m}); \quad \beta = \omega_0 m T \quad (3.24)$$

и амплитудно-фазовые частотные характеристики

$$\underline{H}(\omega) = \frac{1}{\sin \beta} (e^{j\beta} - e^{-j\omega m T}); \quad \underline{H}(-\omega) = \frac{1}{\sin \beta} (e^{j\beta} - e^{j\omega m T}). \quad (3.25)$$

Годографы  $H(\omega)$ ,  $H(-\omega)$  располагаются на окружности с центром в точке  $e^{j\beta}/\sin \beta$ , имеющей радиус  $1/\sin \beta$  (рис. 3.7,а). Окружность проходит через начало координат и точку  $2j$  на мнимой оси.

Используя соотношение (3.22), получаем с учетом (3.25) после преобразований частотные характеристики алгоритма при  $q = \omega/\omega_0$  (рис. 3.7,б):

$$A_{1,2}(q) = \frac{1}{\sin \beta} \left\| \sin \frac{\beta + q\omega_0 m T}{2} \right\| \pm \left\| \sin \frac{\beta - q\omega_0 m T}{2} \right\|. \quad (3.26)$$

При  $\omega = \omega_0$  ( $q = 1$ ) из (3.26) имеем  $A_1(q) = 1$ ;  $A_2(q) = 1$ . Указанное соответствует отсутствию отклонений измеряемых данным алгоритмом составляющих основной частоты, т.е. все ха-

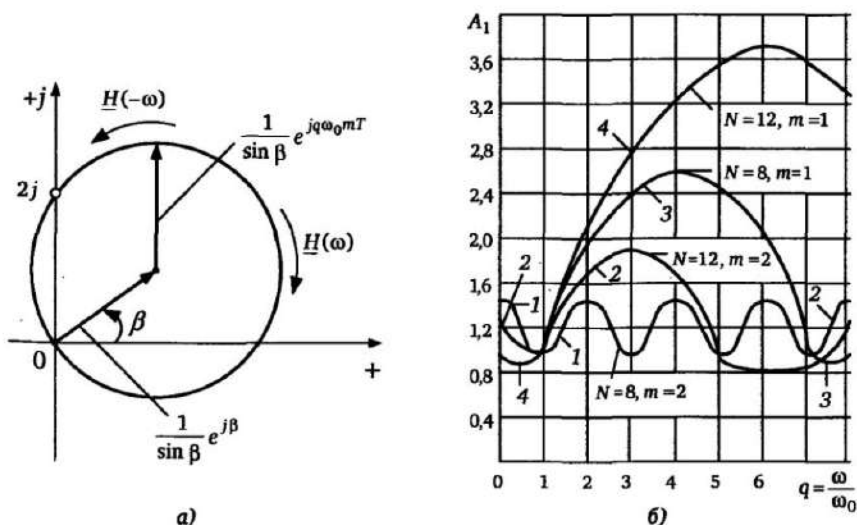


Рис. 3.7. Частотные характеристики алгоритма двух выборок

рактеристики рис. 3.7,б независимо от значений  $m$  и  $N$  проходят через точку  $A_1$ ;  $A_2 = 1$ ;  $q = 1$ . Как видно из рис. 3.7,б, при увеличении  $N$  и уменьшении  $m$  преобладают дифференцирующие свойства алгоритма двух выборок, сводящиеся к усилению сигналов высоких частот. При малых  $N$  и больших  $m$  усиление сигналов высоких частот происходит в меньшей степени, но усиливаются сигналы низких частот.

В общем случае для алгоритмов с передаточной функцией (3.19) для точного измерения вектора, соответствующего синусоидальному сигналу с частотой  $\omega_0$ , необходимо с учетом изложенного выполнение условия  $A_1(\omega_0) = A_2(\omega_0)$ .

### 3.4. Частотные характеристики алгоритма Фурье

Для оценки частотных свойств алгоритма Фурье примем входной сигнал

$$u(t) = \sin(q\omega_0 t + \psi).$$

В этом случае из (2.22) получим выходной сигнал преобразователя Фурье

$$\begin{aligned} \underline{F}(t) &= \frac{2j}{T_0} \int_{t-T_0}^t \sin(q\omega_0 t + \psi) e^{-j\omega_0 t} dt = \\ &= \frac{1}{T_0} \left[ e^{j\psi} \int_{t-T_0}^t e^{j\omega_0(q-1)t} dt + e^{-j\psi} \int_{t-T_0}^t e^{-j\omega_0(q+1)t} dt \right]. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Из (3.27) следует, что при любых целых  $q \neq 1$  имеем  $F(t) = 0$ , т.е. составляющие высших частот, кратных  $\omega_0$ , подавляются алгоритмом полностью. Из (3.27) после преобразований имеем

$$\underline{F}(t) = \frac{1}{2\pi j} \left\{ \frac{e^{j\alpha(t)}}{q-1} [e^{2\pi j q} - 1] + \frac{e^{-j\alpha(t)}}{q+1} [e^{-2\pi j q} - 1] \right\} e^{-j\omega_0 t}, \quad (3.28)$$

где  $\alpha(t) = \psi + q\omega_0 t - 2\pi q$ .

Запишем (3.28) в виде

$$\underline{F}(t) = \underline{D}(t) e^{-j\omega_0 t},$$

где с учетом изложенного  $\underline{D}(t)$  — комплексная огибающая.

После преобразований получим

$$\underline{D}(t) = \frac{2 \sin \pi q}{\pi(q^2 - 1)} \{ \cos[\alpha(t) + \pi q] + jq \sin[\alpha(t) + \pi q] \}. \quad (3.29)$$

При изменении  $\alpha(t)$  в диапазоне  $0 \leq \alpha(t) \leq 2\pi$  выражение (3.29) описывает движение  $\underline{D}(t)$  по эллипсу. Полуоси эллипса равны

$$A_1(q) = \frac{2q|\sin \pi q|}{|q^2 - 1|\pi}; \quad A_2(q) = \frac{2|\sin \pi q|}{|q^2 - 1|\pi}. \quad (3.30)$$

Полная траектория  $\underline{F}(t)$ , характеризующая замер, определится сложением движений по эллипсу и одновременным вращением эллипса относительно начала координат с частотой  $-\omega_0$ . Так как частоты  $\omega_0$  и  $q\omega_0$  в общем случае не кратны, то в процессе измерения вектор  $\underline{F}(t)$  может занимать положение на любом из эллипсов при их вращении относительно начала координат (см. рис. 3.5, в), т.е. результат измерения, так же как и для других алгоритмов ЦИО, при отклонении частоты может располагаться внутри кольца, ограниченного окружностями с радиусами  $A'_1(q)$ ,  $A'_2(q)$ , аналогично рис. 3.5, в.

На рис. 3.8 приведены зависимости, характеризующие частотные свойства «гладкого» алгоритма Фурье по выражению (2.22).

Сравнение рис. 3.8 и 3.6, б показывает значительные различия частотных свойств алгоритма Фурье и алгоритмов, использующих производные. В частности, алгоритм Фурье полностью подавляет постоянную составляющую и частоты, кратные  $\omega_0$  ( $q = 0, 2, 3, \dots$ ), т.е. кольца (рис. 3.5, в) при этих частотах стягиваются к началу координат ( $A_1 = 0; A_2 = 0$ ), что определяется свойствами разложения в ряд Фурье. Наличие неопределенности измерения при различных частотах (от  $A_1$  до  $A_2$  на рис. 3.8) объясняется изменением во времени текущего измерения на основе интеграла (2.22) при непериодической (по отношению к частоте  $\omega_0$ ) функции ( $\omega$  не кратно  $\omega_0$ ).

При наличии во входном сигнале полезной составляющей основной частоты, характеризуемой вектором  $\underline{U}_0$ , и не кратной ей помехи, центр кольца смещается относительно начала координат на величину  $\underline{U}_0$ , соответствующую полезной составляющей

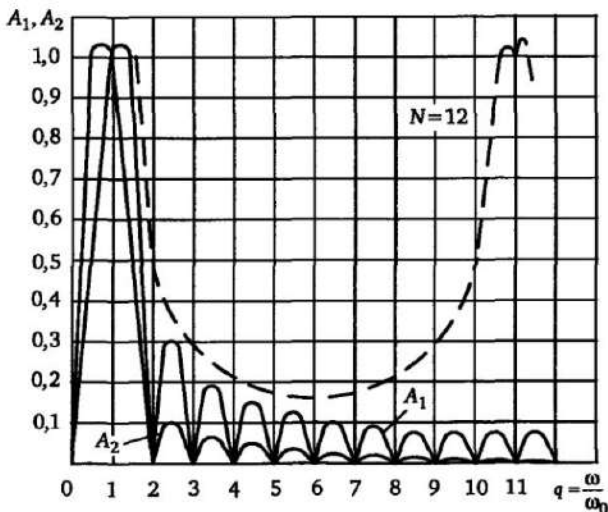


Рис. 3.8. Характеристики «гладкого» алгоритма Фурье; пунктир — огибающая при дискретизации ( $N = 12$ )

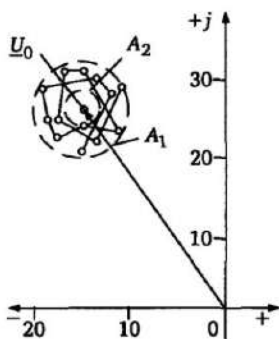


Рис. 3.9. Отклонения измеряемого вектора при несинусоидальном сигнале

(экспериментальная характеристика на рис. 3.9 для алгоритма Фурье).

Характеристики на рис. 3.8 соответствуют «гладкой» функции, т.е. бесконечно большому числу выборок  $N$  за период  $T_0$ . Практический интерес представляют частотные характеристики алгоритма Фурье, реализуемого на основе элементов цифровой обработки сигналов, при конечном числе выборок  $N$  в соответствии с (2.23) и рис. 2.12.

Определим импульсную характеристику  $\underline{h}(nT)$  цифровой системы, реализующей преобразование (2.23). Для этого примем в (2.23) входной сигнал  $u(nT)$  равным одиночному единичному импульсу  $\delta(nT)$ . В результате получим

$$\underline{h}(nT) = \frac{2j}{N} \left[ e^{-j\omega_0(N-1)T} \delta(nT) + e^{-j\omega_0(N-2)T} \delta(nT-T) + \dots + 1 \delta(nT-NT+T) \right].$$

С учетом этого для произвольного момента времени начала

измерения, характеризуемого углом  $\alpha$ , имеем импульсную характеристику эквивалентной системы

$$\underline{h}(nT) = \frac{2j}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j(\omega_0 kT + \alpha)} \delta(nT - kT). \quad (3.31)$$

Передаточная функция эквивалентной системы с учетом общего соотношения (3.15) равна при произвольном угле  $\alpha$  в диапазоне  $0 \leq \alpha < 2\pi$

$$H(z) = \frac{2j}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \underline{h}(kT) z^{-k} = \frac{2j}{N} e^{-\alpha} \frac{1 - z^{-N}}{1 - e^{j\omega_0 T} z^{-1}}. \quad (3.32)$$

Таким образом, рассматриваемый алгоритм характеризует цифровую систему, обладающую импульсной характеристикой и передаточной функцией с комплексными коэффициентами.

Значения характеристик  $H(\omega)$  и  $H(-\omega)$  получим путем замены в (3.32)  $z$  на  $e^{j\omega T}$  и  $e^{-j\omega T}$ . В результате после преобразований имеем

$$\left. \begin{aligned} H(\omega) &= \frac{2}{N} \left| \frac{\sin \frac{\omega NT}{2}}{\sin \frac{(\omega_0 - \omega)T}{2}} \right| = \frac{2}{N} \left| \frac{\sin \pi q}{\sin \frac{\pi}{N}(1-q)} \right|; \\ H(-\omega) &= \frac{2}{N} \left| \frac{\sin \pi q}{\sin \frac{\pi}{N}(1+q)} \right|; \quad q = \frac{\omega}{\omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Радиусы  $A_1(q)$ ,  $A_2(q)$ , ограничивающие кольцо измерений (рис. 3.5,б) при частоте входного сигнала  $\omega = q\omega_0$ , определяются из (3.22), где с учетом (3.33) после преобразований имеем

$$A_{1,2}(q) = \frac{|\sin \pi q|}{N} \left| \frac{1}{\left| \sin \frac{\pi}{N}(1-q) \right|} \pm \frac{1}{\left| \sin \frac{\pi}{N}(1+q) \right|} \right|. \quad (3.34)$$

На рис. 3.10 приведены частотные характеристики  $A_1(q)$ ,  $A_2(q)$  алгоритма Фурье при числе выборок за период  $N = 12$ .

При  $\omega = \omega_0$  ( $q = 1$ ) из (3.34) имеем  $A_1(q) = 1$ ,  $A_2(q) = 1$  независимо от  $N$ , т.е. на основе алгоритма Фурье измерение векто-

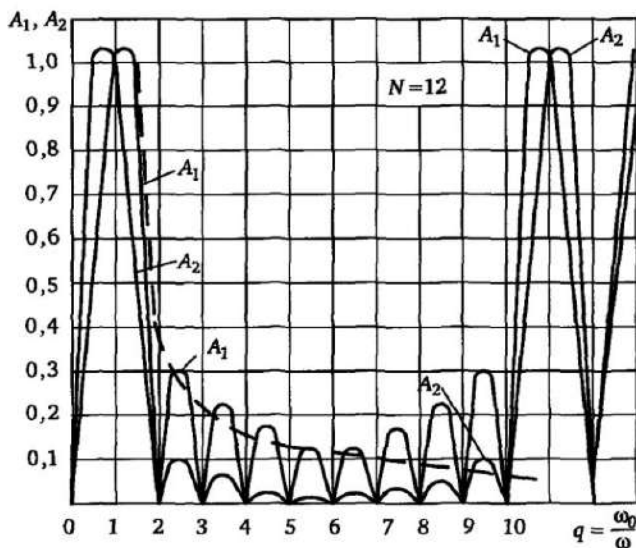


Рис. 3.10. Частотные характеристики дискретной реализации алгоритма Фурье при  $N = 12$

ра основной частоты производится без погрешностей независимо от числа выборок. Характеристики алгоритма Фурье с учетом дискретизации (рис. 3.10) отличаются от «гладкого» преобразования (см. рис. 3.8) тем больше, чем больше частота входного сигнала (пунктиром на рис. 3.10 проведена огибающая характеристики  $A_1(q)$  при  $N = \infty$ ). Указанные различия увеличиваются с уменьшением  $N$  и объясняются эффектом наложения спектров при конечном числе выборок (см. рис. 2.5).

### 3.5. Динамические характеристики ЦИО

#### 3.5.1. Факторы, обуславливающие динамические свойства ЦИО

Выше рассматривались характеристики, описывающие свойства алгоритмов цифрового измерения в установившихся режимах входных воздействий. Имеется две основные причины, обуславливающие отклонения измерений ЦИО в условиях повреждений в электрической системе:

- наличие в измеряемых ЦИО величинах свободных апериодических и гармонических составляющих в токах и напряжениях, возникающих при повреждениях в ЭС. Эти составляющие



обусловлены динамическими процессами в электрической системе и нелинейностью ее элементов;

- инерционность самих алгоритмов, вызванная наличием в них запоминающих звеньев, в частности, аналоговых и цифровых фильтров [5, 15], в результате чего даже при скачкообразных измерениях синусоидальных сигналов основной частоты  $\omega_0$  на входе ЦИО замер искажается и правильные измерения возникают лишь через определенное время  $t = MT$ , где  $M$  — число необходимых выборок, соответствующее обычно порядку алгоритма (см. §2.2).

С учетом этого, например, классический алгоритм Фурье по выражению (2.24) дает правильные результаты лишь через время  $t = NT$ , равное периоду изменения основной частоты. Характеристики, определяющие отклонения замера ЦИО при синусоидальных возмущениях, вызванные инерционностью алгоритма функционирования и элементов самого ЦИО, назовем *собственными динамическими характеристиками ЦИО*. Анализ собственных динамических характеристик важен ввиду не только определяемых ими замедлений срабатывания ЦИО, но и возникающих областей излишнего срабатывания (неселективного отключения). С учетом этого применяют специальные меры для повышения быстродействия и точности измерения за счет снижения влияния собственных динамических свойств ЦИО (см. ниже).

### 3.5.2. Собственные динамические характеристики ЦИО

Рассмотрим поведение ЦИО в реальных условиях повреждения ЭС, когда напряжение основной частоты изменяется скачкообразно от значения  $u_n(t) = U_n \sin(\omega_0 t + \alpha_{ун})$  в нагрузочном режиме до значения  $u_k(t) = U_k \sin(\omega_0 t + \alpha_{ук})$  в режиме КЗ (рис. 3.11). При этом имеется в виду, что для правильного измерения алгоритм использует  $m$  выборок входного сигнала (порядок алгоритма  $m$ ).

Физически наличие отклонений замера ЦИО в этом случае обусловлено тем, что при цифровой обработке скачкообразно изменившегося в момент времени  $nT$  входного сигнала выходной сигнал зависит от  $n - m$  предыдущих выборок входного сигнала, которые содержат информацию о предшествующем входном сигнале  $u_n(t)$ . Правильный замер вектора  $\underline{U}_n(nT)$ , соответствующего предаварийной величине  $u_n(t)$ , имеет место при  $t < 0$  (рис. 3.11), т. е. до возникновения повреждения.

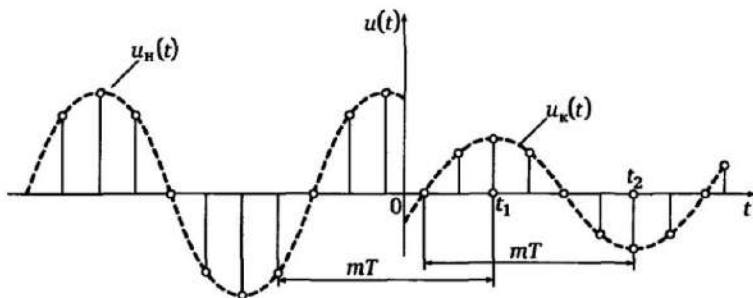


Рис. 3.11. Входной сигнал при синусоидальном возмущении

В промежутке времени  $0 < t < t_2$ , где  $t_2 = mT$  – время, соответствующее появлению  $m$  выборок сигнала повреждения, в частности при  $t = t_1$ , измерение будет неправильным, так как будут влиять выборки, соответствующие доаварийному сигналу  $u_n(t)$ . При  $t \geq mT$  измеряемое значение  $\underline{U}(t)$  будет соответствовать установившемуся сигналу повреждения.

Учет этого фактора необходим при разработке быстродействующих ЦИО, так как возможны случаи, когда при повреждении вне заданных зон действия замер ЦИО в первые моменты времени может находиться внутри этих зон из-за запоминания информации, имевшейся на их входах до возникновения повреждения.

Рассмотрим анализ собственных динамических характеристик на примере алгоритма Фурье, определяемого выражением (2.23) [18]. Предавварийное напряжение  $u_n(nT)$  и аварийное напряжение  $u_k(t)$  определяются по выражениям:

$$u_n(nT) = U_n \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ун}), \quad -\infty < nT \leq 0;$$

$$u_k(nT) = U_k \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ук}), \quad 0 > nT > \infty.$$

В соответствии с выражением (2.23) для текущего интервала («окна») измерения алгоритма имеем:

$$\begin{aligned} \underline{U}(nT) &= \frac{2j}{N} \sum_{n-N+1}^n u(nT) e^{-j\omega_0 nT} = \\ &= \frac{2j}{N} \sum_{n-N+1}^0 U_n \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ун}) e^{-j\omega_0 nT} + \frac{2j}{N} \sum_1^n U_k \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ук}) e^{-j\omega_0 nT} = \\ &= \frac{N-n}{N} U_n e^{j\alpha_{ун}} + \underline{k}_1(n) U_n e^{-j\alpha_{ун}} + \frac{n}{N} U_k e^{j\alpha_{ук}} - \underline{k}_1(n) U_k e^{-j\alpha_{ук}}, \quad (3.35) \end{aligned}$$

где

$$\underline{k}_1(n) = \frac{e^{-2j\omega_0 T}}{N(e^{2j\omega_0 T} - 1)} (e^{-2j\omega_0 nT} - 1). \quad (3.36)$$

Легко проверить, что при  $nT = 0$  и  $nT = NT = T_0$  из (3.35) следует:  $\underline{U}(nT) = U_H e^{j\alpha_{ин}} = \underline{U}_H$  и  $\underline{U}(nT) = U_K e^{j\alpha_{ик}} = \underline{U}_K$ , т.е. измерения соответствуют векторам напряжений в доаварийном и аварийном режимах.

Приняв в доаварийном и аварийном режимах

$$i_H(nT) = I_H \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ин}); \quad -\infty \leq nT \leq 0;$$

$$i_K(nT) = I_K \sin(\omega_0 nT + \alpha_{ик}), \quad 0 > nT > -\infty,$$

после преобразований, аналогичных (3.35), имеем измеряемое текущее сопротивление  $\underline{Z}(nT) = \underline{U}(nT)/\underline{I}(nT)$  в переходном режиме:

$$\underline{Z}(n^*) = \frac{\underline{U}_H \left[ (1 - n^*) + \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ин}} \right] + \underline{U}_K \left[ n^* - \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ик}} \right]}{\underline{I}_H \left[ (1 - n^*) + \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ин}} \right] + \underline{I}_K \left[ n^* - \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ик}} \right]}, \quad (3.37)$$

где  $n^* = n/N$ .

Учитывая, что для случая металлического короткого замыкания на защищаемой линии (рис. 3.12) справедливы соотношения:

$$\underline{Z}_H = \frac{U_H}{I_H}; \quad \underline{Z}_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad \frac{I_H}{I_K} = \frac{Z_K + Z_C}{Z_H + Z_C} = \underline{k}_z, \quad (3.38)$$

получим окончательно

$$\underline{Z}(n^*) = \frac{\underline{k}_z \underline{Z}_H \left[ (1 - n^*) + \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ин}} \right] + \underline{Z}_K \left[ n^* - \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ик}} \right]}{\underline{k}_z (1 - n^*) + \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ин}} + n^* - \underline{k}_1(n) e^{-j2\varphi_{ик}}}. \quad (3.39)$$

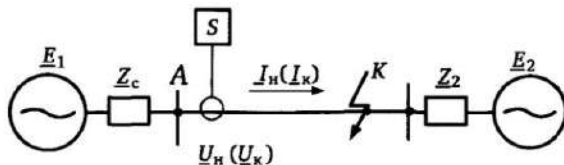


Рис. 3.12. Общий случай линии с двусторонним питанием

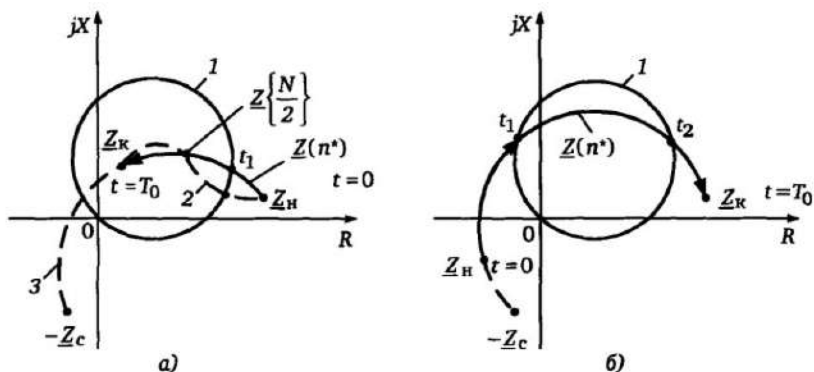


Рис. 3.13. Траектории измеряемого сопротивления ДО на основе алгоритма Фурье

Из (3.39) в момент  $t = 0$  ( $n^* = 0$ ) имеем  $Z(0) = Z_H$ , а в момент  $t = T_0$  ( $n = N$ )  $Z(N) = Z_K$ . В промежутке времени  $0 \leq nT \leq N$  измеряемый вектор сопротивления движется от  $Z_H$  к  $Z_K$  по траектории, определяемой выражением (3.39). Следует отметить, что любые траектории  $Z(n^*)$  проходят через точку  $Z(N/2)$ , соответствующую моменту времени  $t = (N/2)T$ . При этом с учетом (3.36)  $k_1(N/2) = 0$ , и из (3.39) имеем координаты точки  $Z(N/2)$ :

$$\underline{Z}\left(\frac{N}{2}\right) = \frac{k_z Z_H + Z_c}{k_z + 1}. \quad (3.40)$$

Траектория измеряемого сопротивления, проходящего через точки  $Z_H$ ,  $Z(N/2)$ ,  $Z_K$  приведены на рис. 3.13,а (пунктирная характеристика 2).

Точка пересечения указанной траектории с характеристикой срабатывания 1 определяет время срабатывания ЦИО.

Качественно расположение траекторий можно определить, приняв для упрощения в (3.39)  $k_1(n) = 0$ . В этом случае из (3.35) имеем:

$$\underline{U}(n) = \underline{U}_H(1 - n^*) + \underline{U}_K(n^*), \quad (3.41)$$

т.е. переход от вектора  $\underline{U}_H$  к вектору  $\underline{U}_K$  происходит по линейному закону (рис. 3.14). В этом случае с учетом выражения (3.39) получим выражение для измеряемого сопротивления:

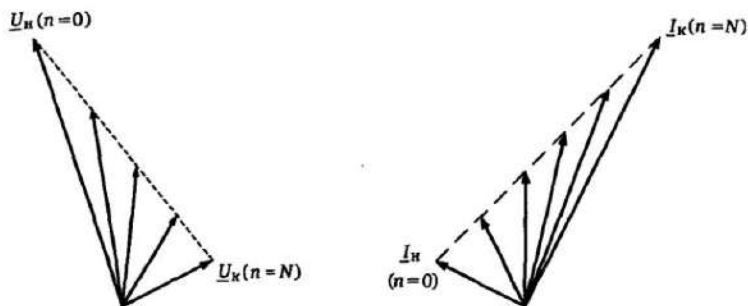


Рис. 3.14. Изменение векторов  $U$  и  $I$  во времени при допущении  $k_1(n) = 0$

$$\underline{Z}(n^*) = \frac{k_z \underline{Z}_H(1-n^*) + \underline{Z}_K n^*}{k_z(1-n^*) + n^*}. \quad (3.42)$$

Преобразовав выражение (3.42) путем выделения  $n^*$ , получим

$$\frac{\underline{Z}(n^*) - \underline{Z}_H}{\underline{Z}(n^*) + \underline{Z}_C} = n^* \frac{k_z - 1}{k_z}. \quad (3.43)$$

Из выражения (3.43) следует, что траектория измеряемого сопротивления  $\underline{Z}(n^*)$  совпадает с частью дуги окружности, опирающейся на точку  $\underline{Z}_H$  (измеряемое сопротивление в режиме нагрузки) и точку  $-\underline{Z}_C$ , определяемую сопротивлением системы (см. рис. 3.12). На траектории  $\underline{Z}(n^*)$  лежит также точка  $\underline{Z}_K$  — измеряемое сопротивление в установившемся режиме КЗ. Указанные траектории показаны на рис. 3.13. Траектории  $\underline{Z}(n^*)$  позволяют оценить как замедление срабатывания ЦИО, так и возможность неселективной работы при внешнем КЗ в зависимости от соотношений между  $\underline{Z}_H$ ,  $\underline{Z}_K$ ,  $\underline{Z}_C$  и расположения характеристик ЦИО. Так, случай внешнего КЗ на рис. 3.13,б соответствует неселективному срабатыванию ЦИО в промежутке времени  $t_1 \leq t \leq t_2$ , где  $t_1$  и  $t_2$  — моменты времени, соответствующие пересечению траектории с характеристикой срабатывания ЦИО. При КЗ в зоне действия (рис. 3.13,а) время  $t_1$  пересечения траектории  $\underline{Z}(n^*)$  с характеристикой срабатывания  $I$  определяет время срабатывания ЦИО.

**Использование пусковых органов.** Существенно уменьшить инерционность ЦИО, вызванную запоминанием информации

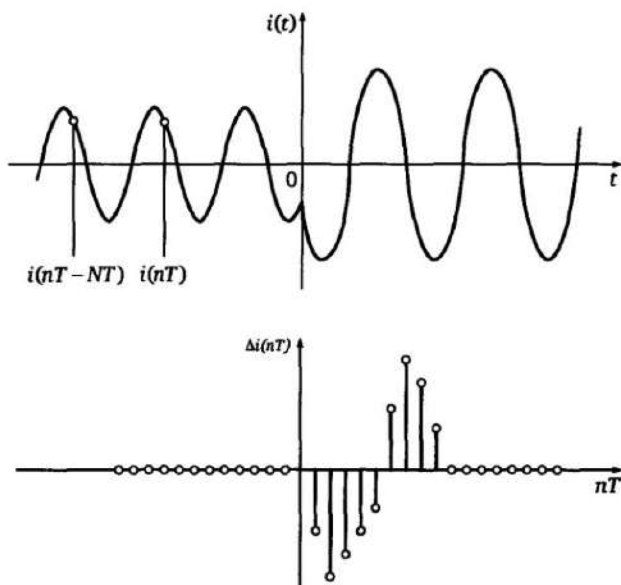


Рис. 3.15. Измерение тока пусковым органом, реагирующим на приращение величины за время  $NT$

предаварийного режима, и тем самым улучшить его динамические свойства позволяет использование быстродействующих пусковых органов (ПО). Основной функцией ПО является быстрое выявление аварийного режима и запуск цифрового измерения. В этом случае запуск производится с нулевыми начальными условиями и алгоритм цифрового измерения использует только аварийные величины. Это исключает существенную часть динамической погрешности, вносимую наличием информации о предаварийном режиме, но не устраняет полностью погрешности измерения в начальные моменты времени, возникающие из-за недостаточности информации.

Простейшей реализацией цифрового ПО является измерение приращения вектора тока (напряжения) путем сравнения текущей (измеряемой) величины  $x(nT)$  с величиной, имевшейся за один или несколько ( $k$ ) периодов измерения  $NT$  ранее. Данное приращение возникает вследствие скачкообразного изменения величины, характеризующей возникновение КЗ. Условие срабатывания ПО примет в этом случае вид:

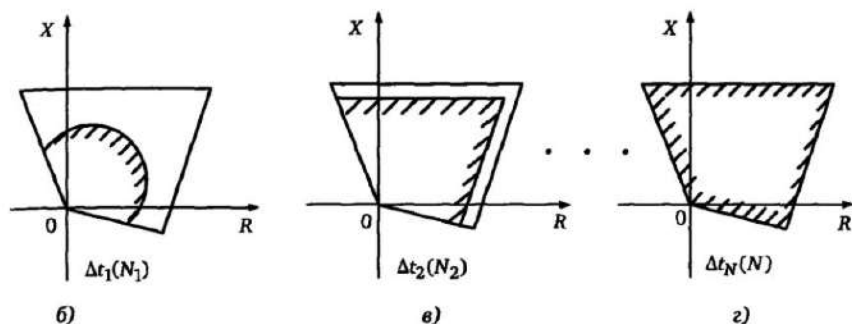
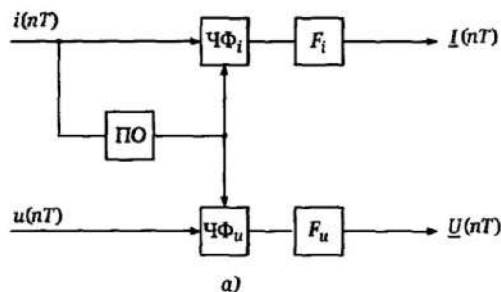


Рис. 3.16. Взаимодействие ПО с частотными фильтрами (а) и регулирование характеристик ЦИО (б—з)

$$\Delta x(nT) = x(nT) - x(nT - kNT) \geq A, \quad (3.44)$$

где  $A$  — уставка ПО.

Дифференциальная величина  $\Delta i(nT) = i(nT) - i(nT - NT)$ , измеряемая пусковым органом, реагирующим на приращение тока  $\Delta i(nT)$ , за один период ( $k = 1$ ) показана на рис. 3.15.

Взаимодействие ПО с частотными фильтрами ЧФ показано на рис. 3.16,а.

При фиксации возникновения повреждения, например, на основе условия (3.44), ПО дает старт цифровой фильтрации. При этом цифровая фильтрация с пуском от ПО проводится определенное время, достаточное для измерения, после чего ПО готов к новому пуску.

Для медленно действующих ступеней защит пусковых органов не требуется, т.е. фильтрация и наблюдение величины происходит непрерывно.

Другим способом повышения динамической устойчивости функционирования ЦИО является использование «гибкой» филь-

трации, включаемой при обнаружении повреждения (срабатывании ПО). Как показано выше, качество фильтрации определяется во многом числом используемых выборок (порядком фильтра или алгоритма). Однако с ростом числа выборок  $N$  используемого алгоритма ухудшаются его собственные динамические свойства — возрастает время срабатывания и вероятность неселективной работы при внешних КЗ (см. рис. 3.13). Эффективным решением является использование быстродействующих ПО не только для старта цифровой фильтрации (рис. 3.16,а), но и одновременно для пуска блока изменения во времени порядка фильтра и соответствующей характеристики ЦИО (рис. 3.16) [17, 40].

Данное решение основывается на том, что быстрое отключение необходимо прежде всего при КЗ в глубине зоны действия (в начале или середине зоны). Поэтому при обнаружении КЗ (старте ПО) включаются цифровые фильтры, имеющие малое окно наблюдения, например, продолжительностью  $\Delta t_1 = 0,5T_0$  ( $n = N/2$ ), однако характеристика ЦИО в этот момент регулируется так, что охватывает лишь часть зоны действия (на рис. 3.16,б заштрихованная область). Указанное обеспечивает быстрое срабатывание ЦИО при повреждениях в глубине зоны ввиду того, что порядок фильтра мал. В силу ослабленного подавления составляющих помехи вследствие малого порядка фильтра возможно расширение области излишнего срабатывания. Однако это не приводит к срабатыванию вне зоны действия, так как охватываемая зона в рассматриваемый момент  $t_1$  существенно сокращена. С течением времени увеличивается окно наблюдения  $\Delta t_2 > \Delta t_1$  и увеличивается область действия ЦИО (рис. 3.16,в). Это достигается изменением числа и соответственно коэффициентов цифрового фильтра (алгоритма) и параметров, определяющих характеристику срабатывания ЦИО.

Таким образом, по истечении заданного времени коэффициенты цифровой фильтрации и характеристики срабатывания принимают установившиеся значения (окно  $\Delta t_N$ , рис. 3.16,г), обеспечивая необходимые чувствительность и отстройку от нагрузки. Данное решение повышает быстродействие при КЗ в глубине зоны действия и снижает влияние собственных динамических свойств ЦИО. Увеличение областей излишнего срабатывания предотвращается сужением характеристики срабатывания в первоначальные моменты после возникновения КЗ.



### 3.6. Быстродействующее вычисление векторов на основе фильтров с изменяемыми коэффициентами

#### 3.6.1. Постановка вопроса

Основным недостатком алгоритмов выделения ортогональных составляющих векторов, традиционно применяемых в РЗ, является возможность правильных измерений лишь по истечении периода  $T_0$  сигнала основной частоты  $\omega_0$ . Это означает, что правильное измерение может быть обеспечено лишь при наличии  $N$  выборок измеряемого сигнала, где  $N = T_0/T$ ;  $T$  — период дискретизации. В промежутке времени  $0 < t < T_0$  алгоритм ортогональных составляющих, например Фурье, дает неверные результаты, которые могут привести как к замедлению РЗ, так и излишнему срабатыванию (см. §3.5). Наличие только пусковых фильтров устраняет влияние информации о предаварийном режиме, накапливаемой алгоритмом, но не устраняет неправильное измерение при  $t < T_0$ .

В этой связи возникает вопрос о построении фильтров ортогональных составляющих, обеспечивающих правильное измерение сигнала основной частоты  $\omega_0$  в начальные моменты времени  $t < T_0$ , т.е. при использовании числа выборок  $M < N$ . Указанное позволяет повысить точность измерения и быстродействие ЦИО, с том числе используя регулирование характеристик (рис. 3.16).

Структура рассматриваемых ниже алгоритмов предполагает наличие пускового органа, дающего старт измерению, и отличается от классической структуры прежде всего тем, что для каждого увеличивающегося окна измерения  $M$ , характеризующегося числом рассматриваемых выборок  $n = M$ , используются новые значения коэффициентов, например [17,40]. Указанное означает, что новому окну измерения соответствует ряд коэффициентов фильтра, отличающихся от коэффициентов, используемых в предыдущих и последующих циклах измерения. При достижении определенного времени, например равного периоду основной частоты  $T_0$  ( $M = N$ ), наращивание фильтра прекращается, и дальнейшие измерения производятся с постоянными коэффициентами цифровой фильтрации.

### 3.6.2. Общий случай фильтра ортогональных составляющих с числом коэффициентов $M < N$

Рассмотрим цифровой фильтр, содержащий  $M$  коэффициентов. Назовем данный фильтр «синусным» (тип  $H$ ), если на значение его коэффициентов  $h_k$  накладывается следующее условие

$$h_k = -h_{M-1-k}, \quad 0 \leq k \leq M-1. \quad (3.45)$$

Пример коэффициентов синусных фильтров приведен на рис. 3.17, а, б для случаев четного (8) и нечетного (7) числа коэффициентов.

Фильтры с четным  $M$  имеют точку симметрии  $n = (M-1)/2$ .

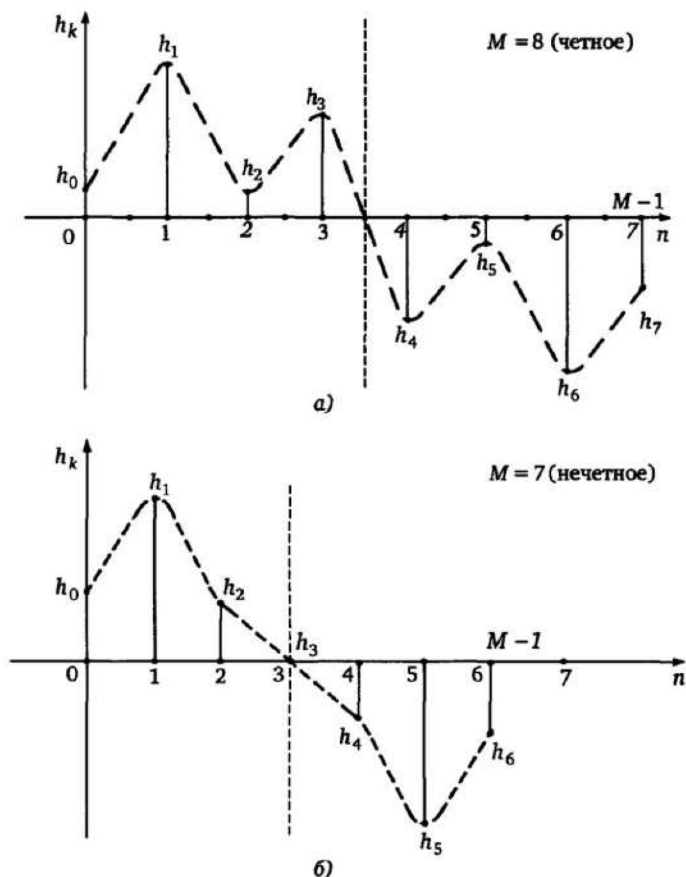


Рис. 3.17. Коэффициенты синусного перестраиваемого фильтра при четном и нечетном числе выборок  $M$ : а —  $M = 8$ ; б —  $M = 7$

При нечетном  $M$  коэффициент, соответствующий точке симметрии, всегда равен нулю (коэффициент  $h_3$  на рис. 3.17,б).

Косинусным фильтром общего вида (тип  $G$ ) с числом выборок  $M$  назовем любой фильтр, коэффициенты которого удовлетворяют условию

$$g_k = g_{M-1-k}, \quad 0 \leq k \leq M-1. \quad (3.46)$$

В данном случае коэффициенты фильтра при нечетном  $M$  фильтра (рис. 3.18,б) симметричны относительно оси  $n = (M-1)/2$ .

Углом сдвига фильтра  $\varphi_M$  назовем угол, соответствующий сдвигу точки или оси симметрии фильтра относительно начала координат. В соответствии с этим для фильтров на рис. 3.17, рис. 3.18 имеем:

$$\varphi_M = \frac{M-1}{2} \omega_0 T. \quad (3.47)$$

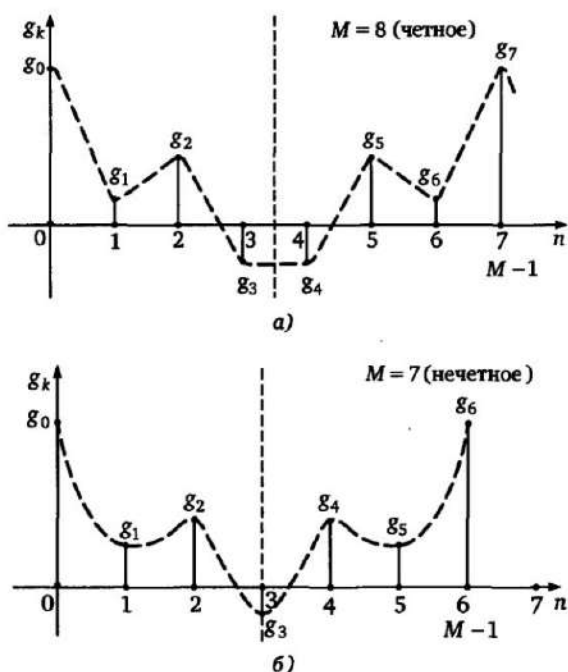


Рис. 3.18. Коэффициенты «косинусного» фильтра для четного (а) и нечетного (б) числа выборок

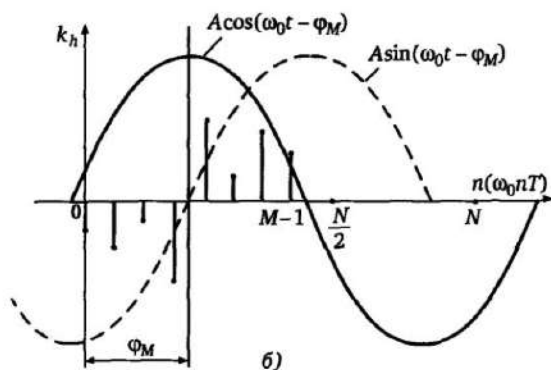
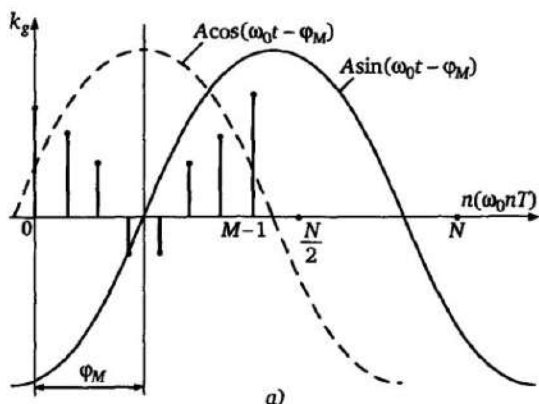


Рис. 3.19. К расчету реакции косинусных (а) и синусных (б) фильтров общего вида на синусоидальное воздействие

Рассмотрим реакцию  $F_g$  косинусного фильтра по выражению (3.46) с числом коэффициентов  $M$  на синусоидальное со сдвигом  $\varphi_M$  воздействие  $f(nT) = A \sin(\omega_0 nT - \varphi_M)$  к моменту времени  $t = (M - 1)T$ , т.е. при наличии  $M$  выборок измеряемого сигнала (рис. 3.19,а). Эта реакция имеет вид

$$F_g(M) = \sum_{k=0}^{M-1} f(nT) k_g(nT) = \sum_{k=0}^{M-1} A \sin(\omega_0 nT - \varphi_M) k_g(nT) = 0, \quad (3.48)$$

где  $k_g(nT)$  — коэффициенты фильтра по выражению (3.46).

Выражение (3.48) справедливо для любых косинусных филь-

тров ввиду того, что при сдвиге синусоидального воздействия на угол фильтра  $\varphi_M$  с учетом (3.46) всегда справедливо условие

$$\sum_{k=0}^{\frac{M}{2}-1} f(nT)k_g(nT) = - \sum_{\frac{M}{2}}^{M-1} f(nT)k_g(nT). \quad (3.49)$$

Из тех же соображений реакция синусного фильтра в момент времени  $t = (M-1)T$  на косинусоидальное воздействие  $f(nT) = A \cos(\omega_0 nT - \varphi_M)$  со сдвигом  $\varphi_M$  также равна нулю, т. е.

$$F_h(M) = \sum_{k=0}^{M-1} A \cos(\omega_0 nT - \varphi_M) k_h(nT) = 0. \quad (3.50)$$

В данном случае в силу свойств симметрии с учетом условия (3.45) реакция фильтра как результирующая сумма по выражению (3.50) равна нулю (рис. 3.19, б).

Рассмотрим реакцию косинусного и синусного фильтров ортогональных составляющих на синусоидальное воздействие с амплитудой  $A$  и произвольной фазой  $\varphi$ :

$$f(nT) = A \sin(\omega_0 nT - \varphi).$$

Представим воздействие  $f(nT)$  в этом случае в виде суммы синусной и косинусной составляющих:

$$\begin{aligned} f(nT) &= A \sin(\omega_0 nT + \varphi + \varphi_M - \varphi_M) = \\ &= A_h \sin(\omega_0 nT - \varphi_M) + A_g \cos(\omega_0 nT - \varphi_M), \end{aligned} \quad (3.51)$$

где  $A_h = A \cos(\varphi + \varphi_M)$ ;  $A_g = A \sin(\varphi + \varphi_M)$ .

С учетом (3.51) сигнал, подводимый к фильтру ортогональных составляющих, содержит синусную и косинусную составляющие с амплитудами  $A_h$  и  $A_g$ , сдвинутые на угол  $\varphi_M$  относительно оси симметрии фильтра. Так как фильтр является линейным цифровым звеном, для которого справедлив метод наложения, то с учетом выражений (3.48) и (3.50) синусный фильтр полностью подавит косинусоидальную составляющую с амплитудой  $A_g$ , а косинусный фильтр подавит полностью синусоидальную составляющую с амплитудой  $A_h$ .

С учетом этого, в момент времени  $t = T(M - 1)$  получим на выходах «косинусного» и «синусного» фильтров соответственно вещественную  $F_x$  и мнимую  $F_y$  составляющие измеряемого вектора:

$$\left. \begin{aligned} F_y = \text{Im}[\underline{F}] &= \sum_{n=0}^{M-1} f(nT)k_g(n) = A_g(n) \sum_{n=0}^{M-1} \cos(\omega_0 nT - \varphi_M)k_g(n); \\ F_x = \text{Re}[\underline{F}] &= \sum_{n=0}^{M-1} f(nT)k_h(n) = A_h(n) \sum_{n=0}^{M-1} \sin(\omega_0 nT - \varphi_M)k_h(n). \end{aligned} \right\} (3.52)$$

где  $\varphi_M$  определяется выражением (3.47).

Коэффициенты фильтров для любого значения  $M$  для упрощения всегда можно выбрать (нормировать) таким образом, чтобы выполнялось нормирующее условие, например:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=0}^{M-1} \cos(\omega_0 nT - \varphi_M)k_g(n) &= 1; \\ \sum_{n=0}^{M-1} \sin(\omega_0 nT - \varphi_M)k_h(n) &= 1. \end{aligned} \right\} (3.53)$$

В этом случае, с учетом значений  $A_h$  и  $A_g$  из (3.51), получим для момента времени  $t = T(M - 1)$  значение амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  составляющей основной частоты выходного сигнала:

$$\left. \begin{aligned} A &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{\left[ \sum_{n=0}^{M-1} f(nT)k_g(n) \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^{M-1} f(nT)k_h(n) \right]^2}; \\ \varphi &= \text{arctg} \frac{F_y}{F_x} - \varphi_M. \end{aligned} \right\} (3.54)$$

Сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  между сигналами, характеризуемыми векторами  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ , измеряемыми в один и тот же момент времени  $t$ , не зависит от угла фильтра  $\varphi_M$ :

$$\Delta\varphi = \text{arctg} \frac{F_{1y}}{F_{1x}} - \text{arctg} \frac{F_{2y}}{F_{2x}}. \quad (3.55)$$

Структура алгоритма измерения ортогональных составляю-

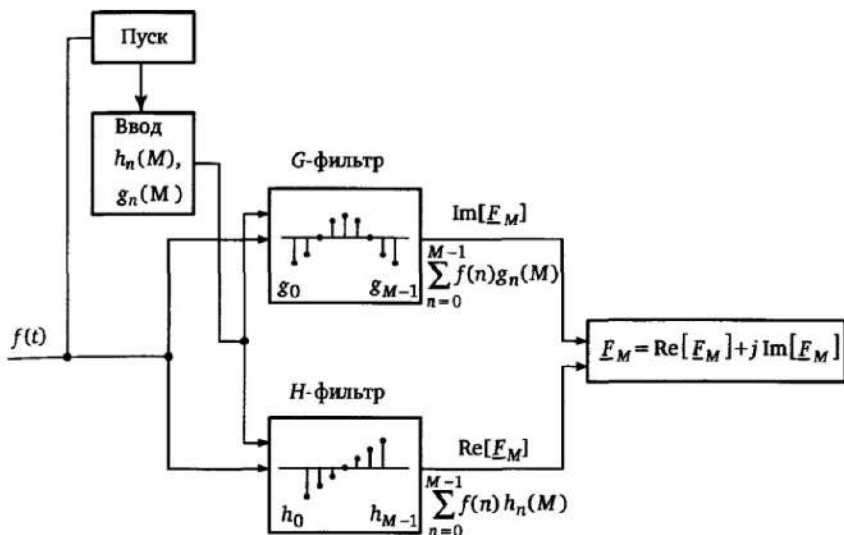


Рис. 3.20. Структура алгоритма быстрого измерения ортогональных составляющих

щих на основе рассмотренных соотношений приведена на рис. 3.20.

Возникновение КЗ фиксируется пусковым органом ПО, дающим запуск измерениям (фиксируется момент  $t = 0$ ). Для определения моментов времени  $t_{M1}, t_{M2}, \dots, T_0$ , соответствующих заданным числам выборок  $M$  (выбранным длинам  $M_1, M_2, \dots, T_0$  окна измерения), заранее рассчитаны коэффициенты синусных и косинусных фильтров  $h_0 \dots h_{M-1}, g_0 \dots g_{M-1}$  (рис. 3.17, рис. 3.18), удовлетворяющих условиям (3.45), (3.46).

Для выбранных окон измерения рассчитываются ортогональные составляющие, амплитуда и фаза вектора  $\underline{E}$  на основе (3.52), (3.54).

Отметим важное свойство фильтров с изменяемыми коэффициентами. В процессе вычислений ( $M < N$ ) значение ортогональных составляющих вектора  $\text{Im}[E_M], \text{Re}[E_M]$  справедливы лишь для текущего момента времени  $t = T(M - 1)$  и приве-

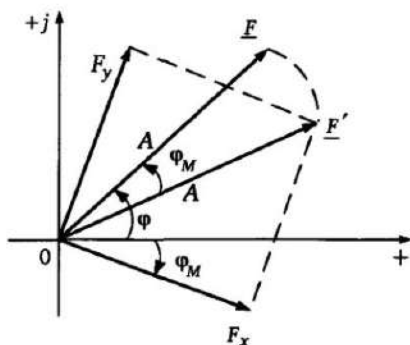


Рис. 3.21. К вычислению аргумента  $\varphi$  измеряемого вектора

дены к текущему углу фильтра  $\varphi_M$  (рис. 3.21), зависящему в соответствии с (3.47) от числа используемых коэффициентов  $M$ .

Поэтому измеренный вектор  $\underline{E}' = E_x + jE_y$  должен быть повернут в соответствии с (3.54) на угол  $\varphi_M$  для получения вектора  $\underline{E}$ , соответствующего данному моменту времени. При этом амплитуда вектора остается без изменения. Если же важен только сдвиг  $\Delta\varphi$  измеряемых в момент  $t$  векторов, например, при вычислении направления мощности или сопротивления  $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ , то в корректировке угла  $\varphi$  в соответствии с выражением (3.55) нет необходимости.

Для любых следующих моментов времени, соответствующих новому значению  $M$ , должны быть рассчитаны новые коэффициенты фильтра и произведен перерасчет  $A$  и  $\varphi$ . Лишь при достижении периода измеряемого сигнала ( $t = NT$ ) коэффициенты фильтра становятся постоянными.

### 3.6.3. Расчет коэффициентов фильтра ортогональных составляющих в общем случае $M < N$

Существует практически бесконечное число комбинаций коэффициентов фильтров ортогональных составляющих, удовлетворяющих условиям (3.45), (3.46), определяющим требования к синусным и косинусным фильтрам. Поэтому для выбора конкретного варианта фильтра целесообразно выдвинуть дополнительные требования, определяющие его качество, прежде всего, частотную характеристику.

**Нормирование амплитудно-частотной характеристики на основной частоте  $f_0$ .** На основной частоте  $f_0$  коэффициенты  $g_k$  и  $h_k$  косинусного и синусного фильтра, должны обеспечивать одинаковый максимальный коэффициент передачи  $H(\omega_0)$  соответственно при  $f(t) = A \cos(\omega_0 t - \varphi_M)$  и  $f(t) = A \sin(\omega_0 t - \varphi_M)$  (см. рис. 3.19). Этот коэффициент передачи численно равен выходной величине фильтра при единичном входном синусном воздействии. Приняв  $A = 1$ ,  $\varphi = \varphi_M$ , получим из (3.52) для коэффициентов передачи косинусного и синусного фильтров:

$$\left. \begin{aligned} H_g(\omega_0) &= \sum_{n=0}^{M-1} \cos(\omega_0 n T - \varphi_M) k_g(n); \\ H_h(\omega_0) &= \sum_{n=0}^{M-1} \sin(\omega_0 n T - \varphi_M) k_h(n). \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$



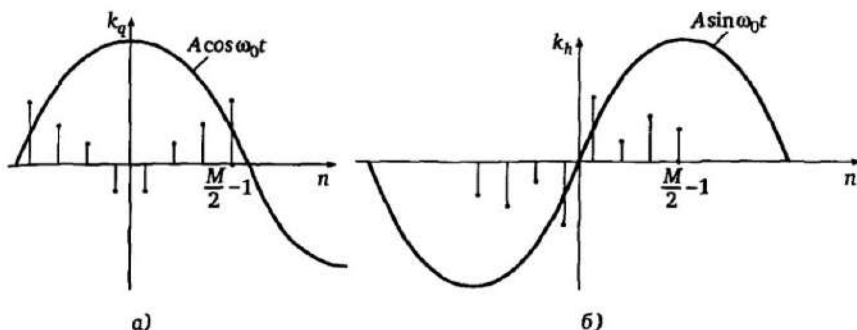


Рис. 3.22. К вычислению коэффициентов передачи косинусного (а) и синусного (б) фильтров ортогональных составляющих ( $M$  четное)

Для упрощения вычислений  $H_g(\omega_0)$  и  $H_h(\omega_0)$  сдвинем входные воздействия на угол  $\varphi_M$ , изменив при этом нумерацию коэффициентов фильтров (рис. 3.22).

С учетом свойств симметрии фильтров, определяемых соотношениями (3.45), (3.46), можно рассматривать лишь половину коэффициентов фильтров, т.е.:

$$\left. \begin{aligned} H_g(\omega_0) &= 2 \sum_{n=0}^{\frac{M}{2}-1} \cos(\omega_0 n T) k_g(n); \\ H_h(\omega_0) &= 2 \sum_{n=0}^{\frac{M}{2}-1} \sin(\omega_0 n T) k_h(n). \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

В общем случае для любой частоты  $f_q$ , учитывая что  $q = f/f_0$ ,  $T = 1/(f_0 N)$ , где  $N$  — число выборок за период основной частоты, получим:

$$\left. \begin{aligned} H_g(\omega_0) &= 2 \sum_{n=0}^{\frac{M}{2}-1} \cos(2\pi q \frac{n}{N}) k_g(n); \\ H_h(\omega_0) &= 2 \sum_{n=0}^{\frac{M}{2}-1} \sin(2\pi q \frac{n}{N}) k_h(n). \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

Используя уравнения (3.57), (3.58), можно, установив дополнительные условия для подавляющих свойств фильтров, опре-

деляемых частотными характеристиками  $H_g(\omega_q)$ ,  $H_h(\omega_q)$ , составить систему уравнений для нахождения коэффициентов фильтров  $g_k$ ,  $h_k$  (рис. 3.17, 3.18). Так, для цифрового фильтра с числом коэффициентов  $M$ , с учетом симметрии коэффициентов, необходимо составить  $M/2$  уравнений вида (3.57), (3.58). При этом можно поставить условие полного подавления постоянной составляющей фильтром  $H_g(0) = 0$  ( $q = 0$ ) и подавления выбранных частот  $f_q$ , ( $q = q_1, q_2, \dots$ ).

С учетом этого для косинусного фильтра с четным числом коэффициентов  $M$  имеет систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} g_0 + g_1 + \dots + g_{\frac{M}{2}-1} &= 0; \\ g_0 \cos 2\pi \cdot 1 \frac{0}{N} + g_1 \cos 2\pi \cdot 1 \frac{1}{N} + \dots + g_{\frac{M}{2}-1} \cos 2\pi \cdot 1 \frac{0,5M-1}{N} &= 0,5; \\ g_0 \cos 2\pi q_2 \frac{0}{N} + g_1 \cos 2\pi q_2 \frac{1}{N} + \dots + g_{\frac{M}{2}-1} \cos 2\pi q_2 \frac{0,5M-1}{N} &= 0; \\ &\dots \\ g_0 \cos 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{0}{N} + g_1 \cos 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{1}{N} + \dots + g_{\frac{M}{2}-1} \cos 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{0,5M-1}{N} &= 0. \end{aligned} \right\} (3.59)$$

Первое уравнение в системе (3.59) соответствует полному подавлению косинусным фильтром постоянной составляющей во входном сигнале ( $q_0 = 0$ ). Второе уравнение соответствует нормированию сигнала основной частоты  $\omega_0$  ( $q_1 = 1$ ). Остальные уравнения соответствуют полному подавлению  $G$ -фильтром составляющих сигнала с частотами  $q_2, \dots, q_{0,5M-1}$ . Решением системы уравнений (3.59) определяются  $M/2$  коэффициентов фильтра ( $g_0, g_1, \dots, g_{0,5M-1}$ ). При этом остальные коэффициенты фильтра определяются с учетом соотношения (3.46):

$$g_{M-1} = g_0; g_{M-2} = g_1, \dots, g_{\frac{M}{2}+1} = g_{\frac{M}{2}-1}.$$

Аналогичным образом, с учетом (3.57), (3.58) для синусного фильтра, получим следующую систему  $M/2$  уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 h_0 \sin 2\pi \cdot 1 \frac{0}{N} + h_1 \sin 2\pi \cdot 1 \frac{1}{N} + \dots + h_{\frac{M}{2}-1} \sin 2\pi \cdot 1 \frac{0,5M-1}{N} &= 0,5; \\
 h_0 \sin 2\pi q_2 \frac{0}{N} + h_1 \sin 2\pi q_2 \frac{1}{N} + \dots + h_{\frac{M}{2}-1} \sin 2\pi q_2 \frac{0,5M-1}{N} &= 0; \\
 &\dots \\
 h_0 \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{0}{N} + h_1 \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{1}{N} + \dots + h_{\frac{M}{2}-1} \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}-1} \frac{0,5M-1}{N} &= 0; \\
 h_0 \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}} \frac{0}{N} + h_1 \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}} \frac{1}{N} + \dots + h_{\frac{M}{2}-1} \sin 2\pi q_{\frac{M}{2}} \frac{0,5M-1}{N} &= 0.
 \end{aligned} \right\} (3.60)$$

Система уравнений (3.60) так же содержит  $M/2$  неизвестных  $h_0, \dots, h_{0,5M-1}$  и, в отличие от системы уравнений  $G$ -фильтра, в данном случае не требуется составления специального уравнения для подавления постоянной составляющей во входном сигнале, так как для синусного фильтра с учетом (3.45) всегда выполняется соотношение

$$h_0 + h_1 + \dots + h_{M-1} = 0.$$

Поэтому первое уравнение в системе (3.60) нормирует коэффициенты фильтра для составляющей основной частоты  $\omega_0$  ( $q_1 = 1$ ), а остальные уравнения обеспечивают подавление составляющих с частотами  $f_2, \dots, f_{0,5M-1}, f_{0,5M}$ . Оставшиеся  $M/2$  коэффициентов фильтра определяются с учетом выражения (3.45) соотношениями

$$h_{M-1} = -h_0; \quad h_{M-2} = -h_1, \dots, h_{\frac{M}{2}+1} = -h_{\frac{M}{2}-1}.$$

### 3.6.4. Быстродействующие фильтры Фурье ортогональных составляющих

Интерес представляет быстродействующий фильтр на основе распространенного фильтра ортогональных составляющих с Фурье-коэффициентами при  $M < N$ :

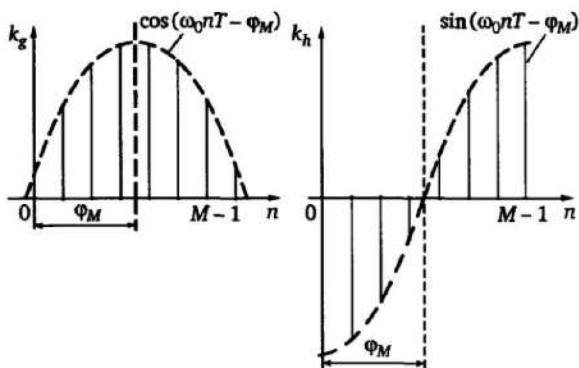


Рис. 3.23. Косинусный и синусный наращиваемые фильтры на основе алгоритма Фурье

$$\left. \begin{aligned} g(n) &= \cos(\omega_0 n T - \varphi_M); \\ h(n) &= \sin(\omega_0 n T - \varphi_M). \end{aligned} \right\} \quad (3.61)$$

Как и в общем случае, должны выполняться условия симметрии (3.45), (3.46), и коэффициенты фильтров (рис. 3.23), с учетом рассмотренного выше, располагаются симметрично относительно начала координат (аналогично рис. 3.22).

Коэффициенты косинусного и синусного фильтров в данном случае известны и обеспечивают правильное измерение векторов при полном числе выборок  $N$ . Определим поправочные коэффициенты  $C_g(M)$ ,  $C_h(M)$  к алгоритму Фурье, позволяющие правильно вычислить ортогональные составляющие вектора при используемом числе выборок  $M < N$ . С учетом выражения (3.52) и использования структуры быстрого измерения с пусковым органом (рис. 3.20) в момент времени  $t = T(M - 1)$  при наличии  $M$  выборок сигнала соответственно для синусного и косинусного воздействия  $u(nT)$  с единичной амплитудой  $u(nT) = \sin(\omega_0 n T - \varphi_M)$ ;  $u(nT) = \cos(\omega_0 n T - \varphi_M)$  имеем

$$\begin{aligned} F_x(M) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} u(nT) k_h(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} \sin^2(\omega_0 n T - \varphi_M) = \\ &= \frac{M}{N} \frac{1}{N} \frac{\sin \omega_0 M T}{\sin \omega_0 T}; \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$F_y(M) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} u(nT)k_g(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} \cos^2(\omega_0 nT - \varphi_M) = \\ = \frac{M}{N} + \frac{1}{N} \frac{\sin \omega_0 MT}{\sin \omega_0 T}. \quad (3.63)$$

При  $M = N$  (полное число выборок), учитывая, что  $\sin \omega_0 NT = \sin 2\pi = 0$ , из (3.62), (3.63) имеем  $F_x(N) = 1$ ,  $F_y(N) = 1$ , что соответствует алгоритму Фурье с полным числом выборок  $N$ . Поправочные коэффициенты  $C_g$ ,  $C_h$  при расчете векторов при неполном числе выборок определяются из соотношений:

$$F_x(M) = C_h \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} \sin^2(\omega_0 nT - \varphi_M) = 1; \\ F_y(M) = C_g \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} \cos^2(\omega_0 nT - \varphi_M) = 1,$$

откуда с учетом (3.62), (3.63) при  $\omega_0 = 2\pi/N$  получим:

$$C_h = \left[ \frac{M}{N} - \frac{1}{N} \frac{\sin 2\pi \frac{M}{N}}{\sin \frac{2\pi}{N}} \right]^{-1}; \\ C_g = \left[ \frac{M}{N} + \frac{1}{N} \frac{\sin 2\pi \frac{M}{N}}{\sin \frac{2\pi}{N}} \right]^{-1}. \quad (3.64)$$

Коэффициенты  $C_g$ ,  $C_h$  являются поправочными (нормирующими) при вычислении ортогональных составляющих векторов, позволяющими получить правильное значение амплитуды в момент времени  $MT$  независимо от числа используемых выборок  $M$ .

**Обеспечение подавления постоянной составляющей «косинусным» быстродействующим фильтром Фурье.** Коэффициент передачи любого фильтра при постоянном во времени сигнале  $u_d$  (частота  $f_q = 0$ ) определяется алгебраической суммой его коэффициентов. Отсюда следует, что реакция фильтра  $F_d$  на еди-

ничный постоянный во времени сигнал определяется выражением

$$F_d = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} k_F, \quad (3.65)$$

где  $k_F$  — коэффициенты фильтра.

С учетом соотношения (3.45), любые синусные фильтры полностью подавляют постоянную составляющую во входном сигнале.

Для косинусных фильтров Фурье при  $M < N$  сумма  $A_d$  его коэффициентов равна

$$A_d = \sum_{n=0}^{M-1} \cos(\omega_0 nT - \varphi_M) = \frac{\sin \pi \frac{M}{N}}{\sin \pi \frac{1}{N}}. \quad (3.66)$$

С учетом этого, обеспечить подавление постоянной составляющей входного сигнала косинусным фильтром можно в случае, если изменить каждый из его коэффициентов на величину  $-A_d/M$  (рис. 3.24), с тем чтобы их алгебраическая сумма равнялась нулю. При этом коэффициенты фильтра равны

$$k_d(M, N) = \cos(\omega_0 nT - \varphi_M) - \frac{\sin \pi \frac{M}{N}}{M \sin \pi \frac{1}{N}}. \quad (3.67)$$

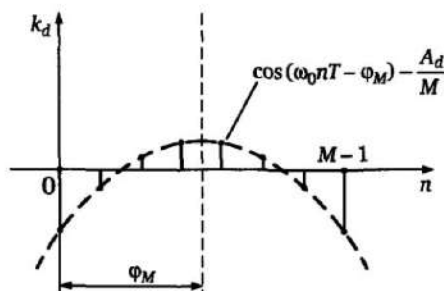


Рис. 3.24. Скорректированные коэффициенты G-фильтра с учета подавления постоянной составляющей

Для того, чтобы нормировать вычисления, необходимо ввести поправочный коэффициент  $C_{gd}$  для вычисления амплитуды, позволяющий получить косинусную составляющую вектора  $F_y(M)$  единичной амплитуды при единичном синусоидальном воздействии частоты  $\omega_0$ , т.е.

$$F_y(M) = C_{gd} \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{M-1} \left[ \cos(\omega_0 n T - \varphi) - \frac{\sin \pi \frac{M}{N}}{M \sin \pi \frac{1}{N}} \right] \cos(\omega_0 n T - \varphi) = 1. \quad (3.68)$$

Из (3.68) получим нормирующий коэффициент  $C_{gd}$  при вычислении косинусной составляющей измеряемого вектора

$$C_{gd} = \left( \frac{M}{N} + \frac{1}{N} \frac{\sin 2\pi \frac{M}{N}}{\sin 2\pi \frac{1}{N}} - \frac{2}{NM} \frac{\sin^2 \pi \frac{M}{N}}{\sin^2 \pi \frac{1}{N}} \right)^{-1}. \quad (3.69)$$

### 3.7. Алгоритмы, использующие критерии идентификации сигналов

#### 3.7.1. Общие понятия

С учетом постоянного совершенствования технических средств, используемых в ЦРЗ, прежде всего повышения скорости и объема вычислений, возникают реальные возможности использования элементов теории идентификации (оценивания) полезного сигнала основной частоты в общем сигнале, поступающем на входы релейной защиты, что впервые предложено в [31].

В общем случае задачу идентификации применительно к ЦРЗ можно сформулировать следующим образом.

Цифровая релейная защита измеряет сигнал  $y(nT)$ , содержащий полезную установившуюся составляющую основной частоты:

$$u(nT) = X_1 \sin(\omega_0 n T) + X_2 \cos(\omega_0 n T), \quad (3.70)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – неизвестные величины, и составляющую помехи  $S(nT)$ , т.е.

$$y(nT) = u(nT) + C(nT).$$

Обозначим для любой выборки  $nT$

$$u(nT) = u_n = X_1 b_{1n} + X_2 b_{2n}, \quad b_{1n} = \sin \omega_0 nT, \quad b_{2n} = \cos \omega_0 nT. \quad (3.71)$$

С учетом этого, в диапазоне наблюдения  $\Delta t = NT$  имеется  $N$  выборок сигнала  $y(nT)$ , которые можно охарактеризовать вектором-столбцом

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T.$$

Вектору  $\mathbf{Y}$  соответствует неизвестный вектор  $\mathbf{U}$ , который для используемого числа выборок  $N$  можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{bmatrix} X_1 \sin \omega_0 T & X_2 \cos \omega_0 T \\ X_1 \sin 2\omega_0 T & X_2 \cos 2\omega_0 T \\ \dots & \dots \\ X_1 \sin N\omega_0 T & X_2 \cos N\omega_0 T \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sin \omega_0 T & \cos \omega_0 T \\ \sin 2\omega_0 T & \cos 2\omega_0 T \\ \dots & \dots \\ \sin N\omega_0 T & \cos N\omega_0 T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{X}. \quad (3.72) \end{aligned}$$

Общее соотношение (3.70) в матричной форме примет вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{E}, \quad (3.73)$$

где  $\mathbf{E} = (e_1, e_2, \dots, e_N)$  — вектор-столбец, соответствующий неизвестной помехе.

Разность  $\epsilon$  значений между измеряемым значением  $y_n$  и вычисляемым значением  $u_n$  в любой момент времени  $t = nT$  называется невязкой  $\epsilon_n$

$$\epsilon_n = y_n - u_n.$$

С учетом (3.73) для вектора невязки  $\mathbf{E}$  имеем в матричной форме

$$\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \mathbf{B}\mathbf{X}, \quad (3.74)$$



где  $X$  – матрица с неизвестными коэффициентами, соответствующая некоторой оценке параметров  $X_1, X_2$  полезного сигнала.

Наиболее распространенным решением при определении  $X$  является использование метода наименьших квадратов, согласно которому минимизируется квадрат ошибки  $\epsilon$  и критерий  $Q$  оценки имеет вид

$$Q = \sum_{k=1}^n \epsilon_k^2 = \sum_{k=1}^n (Y - BX)^2 = \min. \quad (3.75)$$

Условие (3.75), соответствует критерию  $\partial Q / \partial X = 0$ , и в случае некоррелированной с входным сигналом помехи  $C$  определяем следующую зависимость между искомой оценкой  $X$  и имеющимися в наличии значениями  $y_n$ , соответствующими матрице  $Y$  [19]:

$$X = (B^T B)^{-1} B^T Y = D Y. \quad (3.76)$$

При этом индекс «Т» обозначает операцию транспонирования прямоугольной матрицы  $B$ , т.е. замены ее строк столбцами. В результате произведение  $B^T B$  даёт квадратную матрицу с числом строк и столбцов  $m$ , равным числу неизвестных.

Индекс «-1» означает получение обратной матрицы по отношению к квадратной матрице  $A = B^T B$ , т.е.

$$(B^T B)^{-1} = A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{m1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1m} & A_{2m} & \dots & A_{mm} \end{vmatrix},$$

где  $|A|$  — определитель матрицы;  $A_{11}, \dots, A_{1m}$  — алгебраические дополнения к элементам  $a_{ik}$  матрицы  $A$ .

### 3.7.2. Особенности использования алгоритмов идентификации в релейной защите

При оценке возможности использования того или иного алгоритма необходимо прежде всего учитывать такие критерии как точность, быстродействие, возможность практической реализации вычислений в рамках реальных возможностей ЦРЗ. В

общем случае, при наличии в ЭС протяженных линий электропередачи, а также с учетом нелинейности отдельных элементов как в ЭС, так и в трактах передачи сигналов в ЦРЗ, сигнал помехи  $e_c(t)$  имеет вид

$$e_c(t) = \sum_{p=1}^a C_p \sin(\omega_p t + \varphi_p) + \sum_{q=1}^b C_q e^{-\tau_q t} + \sum_{l=1}^d C_l e^{-\tau_l t} \sin(\omega_l t + \varphi_l). \quad (3.77)$$

В выражении (3.77) индексом  $p$  обозначены незатухающие гармонические составляющие помехи при КЗ, отличающиеся от основной частоты  $\omega_0$ , обусловленные наличием нелинейных элементов (при полностью линейной системе и трактах измерения эти составляющие отсутствуют).

Неизвестными являются как амплитуды  $C_p$ , фазы  $\varphi_p$  частоты  $\omega_p$ , так и число составляющих  $a$ .

Индексом  $q$  обозначены затухающие аperiodические составляющие переходного процесса при КЗ (начальные амплитуды  $C_q$ , постоянные времени  $\tau_q$ , число составляющих  $b$ ).

Индексом  $l$  обозначены затухающие гармоничные составляющие (амплитуды  $C_l$ , фазы  $\varphi_l$ , постоянные затухания  $\tau_l$ , число компонент  $d$ ).

Вполне очевидно, что при полностью неизвестной помехе вида (3.77) удовлетворительные по точности результаты в определении  $X$  из выражения (3.76) можно получить лишь при очень большом числе вычислений, включая операции с матрицами большого ранга. Учитывая, что подавить составляющую помехи можно в общем случае лишь прямым или чаще косвенным образом, вычислив ее параметры, ранг оперируемых матриц в процессе вычислений должен быть, по крайней мере, достаточен для вычисления всех неизвестных параметров в выражении (3.77). По существу, решение должно содержать как одну из частей в косвенном виде спектральный анализ переходного сигнала  $y(t)$  с помехой  $e_c(t)$  по выражению (3.77), что само по себе является задачей, требующей большого объема вычислений [20].

Решение матричного уравнения (3.76) сводится к операциям с имеющимися выборками  $y_n$ , умножаемыми на коэффициенты  $b_k$ , определяемыми операциями с матрицами, т. е. решение имеет в общем случае вид

$$x(k) = \sum_{h=0}^m a_h y(k-h), \quad (3.78)$$

что эквивалентно цифровой фильтрации сигнала  $y(k)$ . С учетом изложенного, порядок эквивалентного цифрового фильтра при учете сигнала помехи в общем виде по выражению (3.77) и соответствующий объем вычислений настолько велики, что реализовать метод идентификации в полном объеме при выполнении ЦРЗ практически затруднительно. При этом существенным является и то, что при учете помехи в общем виде по выражению (3.77), содержащем большее количество неизвестных, требуется соответственно большее количество выборок входного сигнала  $y(nT)$ , что не позволяет получить приемлемое быстродействие ЦРЗ.

Однако идентификация на основе метода наименьших квадратов нашла применение на практике [31] при упрощенном моделировании входного сигнала, учитывающем его основные компоненты.

Искомый сигнал представляется, например как

$$y(nT) = A \exp(-nT/\tau) + B \sin(\omega_0 nT) + C \cos(\omega_0 nT), \quad (3.79)$$

что отражает в простейшем виде переходный процесс в ЭС. В выражении (3.79) имеется четыре неизвестных величины:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\tau$ . Используя три первых члена разложения в ряд Тейлора в первом приближении имеем:

$$\exp\left(-\frac{nT}{\tau}\right) = 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{n^2 T^2}{2\tau^2}. \quad (3.80)$$

С учетом этого, измеряемая величина примет вид

$$y(nT) = A - \frac{AnT}{\tau} + \frac{An^2 T^2}{2\tau^2} + B \sin \omega_0 nT + C \cos \omega_0 nT. \quad (3.81)$$

Введя новые неизвестные

$$X_1 = A; X_2 = -A/\tau; X_3 = A/(2\tau^2); X_4 = B; X_5 = C \quad (3.82)$$

и обозначив для любого номера выборки  $n = 1, \dots, m$

$$b_{n1} = 1; b_{n2} = nT; b_{n3} = n^2 T^2; b_{n4} = \sin \omega_0 nT; b_{n5} = \cos \omega_0 nT,$$



рошенные оценки при небольшом числе неизвестных, определяющих сигнал помехи в выражении (3.77). Это связано, прежде всего, с требованиями быстродействия, которое может быть достигнуто лишь при использовании сравнительно небольшого числа выборок измеряемого сигнала. Первые результаты измерения должны быть получены уже в течение времени, не превышающего  $(0,5-1,0)T_0$ , что ограничивает использование методов адаптивной фильтрации.

### 3.8. Влияние режима электрической системы на динамические свойства релейной защиты

#### 3.8.1. Установившиеся и свободные составляющие в формируемых величинах

Наличие областей излишнего срабатывания и замедленного срабатывания устройств защиты вызвано, в первую очередь, тем, что при КЗ и коммутациях в ЭС возникают переходные процессы в самой ЭС и во входных цепях ЦИО, формирующих сравниваемые величины, в том числе и в цифровых фильтрах. В результате в формируемых в устройствах РЗ величинах  $e_1(nT)$ , ...,  $e_n(nT)$  (см. например, рис. 2.25, рис. 2.29) помимо составляющих основной частоты  $e_{10}(t)$ , ...,  $e_{n0}(t)$  возникают затухающие свободные апериодические и периодические составляющие различных частот  $e_{1c}(t)$ , ...,  $e_{nc}(t)$ , описываемые в общем случае выражением (3.77), которые в дальнейшем будем называть составляющими помехи.

Таким образом, любую сравниваемую величину  $e_p(t)$ , зависящую в общем случае от тока и напряжения контролируемого объекта, можно в общем случае представить в виде

$$e_p(t) = e_p^0(t) + e_{pc}(t), \quad (3.85)$$

где  $e_p^0(t)$  — составляющая основной частоты  $\omega_0$ ;  $e_{pc}(t)$  — составляющая помехи, определяемая в общем случае выражением (3.77).

На рис. 3.25, а пояснены основные факторы, влияющие на образование свободного сигнала помехи  $e_{pc}(t)$  в величине  $e_p(t)$ , формируемой схемой формирования СФ и используемой алгоритмом сравнения АС.

Значения  $u$  и  $i$  в любой ветви ЭС произвольной конфигурации (рис. 3.25) при, в общем случае, несимметричном КЗ в точке  $K$  можно определить, используя метод наложения. При этом каждая величина образуется из составляющей нагрузочного режима, например  $i_n(t)$ , имевшейся до возникновения КЗ, и составляющей аварийного режима  $i_{ав}(t)$ . Составляющая  $i_{ав}(t)$  в рассматриваемой ветви обуславливается включением в месте КЗ  $K$  (при равных нулю напряжениях всех источников питания в ЭС) в общем случае несимметричной трехфазной системы синусоидальных напряжений

$$\underline{U}_F = \underline{U}_K - \underline{U}_{к.н} = \underline{g}\underline{U}_{к.н}, \quad (3.86)$$

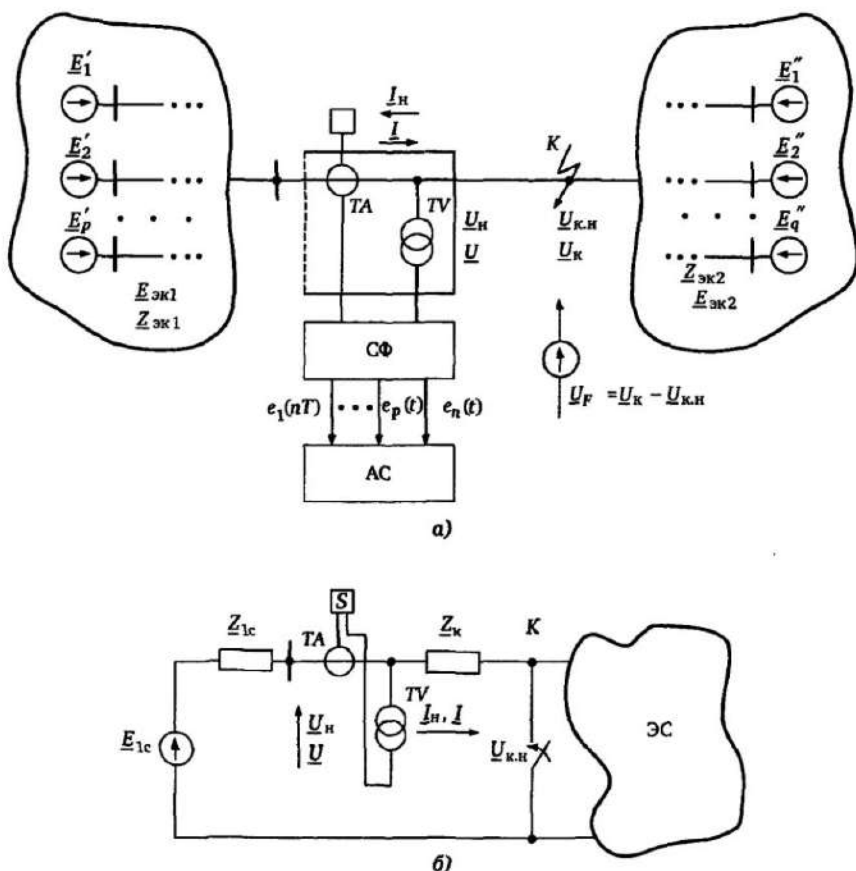


Рис. 3.25. К анализу динамических свойств ЦИО при КЗ в ЭС

где  $\underline{U}_K$  — трехфазная система напряжений в режиме КЗ в точке  $K$ ;  $\underline{U}_{K.H}$  — симметричная трехфазная система напряжений в точке  $K$  в доаварийном режиме.

В отличие от составляющей нагрузочного режима  $i_H(t)$ , являющейся установившейся синусоидальной величиной, аварийная составляющая  $i_{ав}(t)$  содержит установившуюся составляющую основной частоты  $i_{ав}^0(t)$  и затухающую свободную составляющую  $i_c(t)$ . Результирующее значение тока  $i(t)$  в произвольной ветви ЭС при этом равно

$$i(t) = i_H(t) + i_{ав}(t) = i_H(t) + i_{ав}^0(t) + i_c(t) = i_K^0(t) + i_c(t),$$

где  $i_K^0(t) = i_H(t) + i_{ав}^0(t)$  — установившаяся составляющая, основной частоты в режиме КЗ.

С учетом изложенного составляющая помехи  $e_{pc}(t)$  в величине  $e_p(t)$  (рис. 3.25,а) по выражению (3.85) является совокупностью свободных составляющих переходного процесса, обусловленного подключением к точке КЗ  $K$  трехфазного напряжения  $\underline{U}_F$  по выражению (3.86) при равных нулю напряжениях всех источников ( $E'_1 = 0, \dots, E'_p = 0, E''_1 = 0, E'_q = 0$ ). При этом переходный процесс и составляющие помехи  $e_{1c}(t), \dots, e_{pc}(t), \dots, e_{nc}(t)$  в формируемых величинах  $e_1(nT), \dots, e_p(nT), \dots, e_n(nT)$  определяются в соответствии с рис. 3.25,а динамическими параметрами элементов ЭС (линий, генераторов, трансформаторов и т.д.), измерительных трансформаторов тока и напряжения, элементов СФ блоков формирования величин в ЦИО, в том числе промежуточных трансформаторов, аналоговых и цифровых частотных фильтров.

### 3.8.2. Критерий интенсивности сигнала помехи

Для того чтобы качественно оценить возможные области замедления и излишнего срабатывания ЦИО, вносимые динамическими свойствами ЭС, измерительных трансформаторов и самого ЦИО, примем достаточно простой и с физической точки зрения объяснимый критерий оценки по соотношению «помеха — полезный сигнал» (более подробно этот критерий обоснован в [5, 15]).

Динамическим коэффициентом помехи  $k_c$  назовем отношение максимума огибающей  $E_{pc}$  сигнала помехи  $e_{pc}(t)$  к амплитуде установившегося значения  $E_p$  синусоидальной величины основной частоты типа  $E_p = k_u \underline{U} + k_i \underline{I}$ , используемой в общем случае в ЦИО:

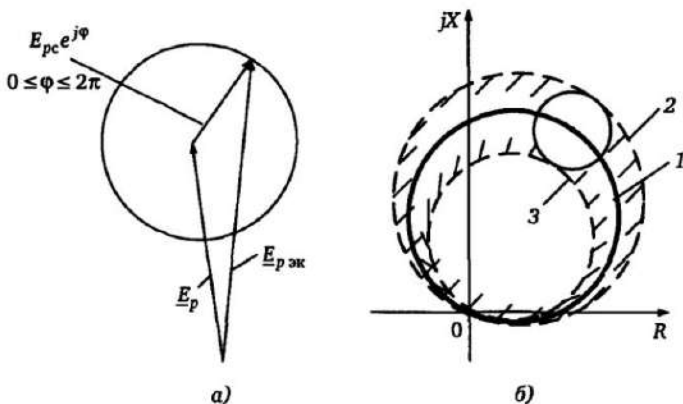


Рис. 3.26. Влияние помехи на отклонение эквивалентного вектора (а) и характеристики срабатывания (б)

$$k_c = \frac{E_{pc}}{|E_p|}. \quad (3.87)$$

Чем больше значение  $k_c$ , тем больше искажения измеряемых величин и, следовательно, характеристик срабатывания ЦИО. Эти искажения определяют области замедления и неселективного действия релейной защиты [5]. По мере затухания переходного процесса уменьшается значение  $e_c(t)$  и, соответственно, коэффициент  $k_c$ , а, следовательно, и отклонение характеристик ЦИО. Указанное поясняет рис. 3.26,а, где для оценки максимальных зон возможных отклонений характеристик ЦИО сигнал помехи  $e_{pc}(t)$  в фиксированный момент времени  $t$  характеризуется вектором  $E_{pc}$  с амплитудой  $E_{pc} = k_c |E_p|$  и произвольной фазой  $\varphi$  в диапазоне  $0—2\pi$ .

Максимально возможные искажения замера определяются отклонением результирующего эквивалентного вектора  $E_{p эк}$  от вектора  $E_p$ , характеризующего полезный сигнал основной частоты. В результате, оперируя эквивалентными векторами  $E_{p эк}$ , можно выделить максимально возможную область отклонений характеристики срабатывания ЦИО, например на рис. 3.26,б, для ЦИО с круговой ХС, вызванную наличием сигнала помехи [5]. При этом расширение характеристики (кривая 2) соответствует зоне неселективной работы, а ее сужение (кривая 3) — замедлению в срабатывании.



Как отмечалось, помеха  $e_c(t)$  прямо пропорциональна возмущающему воздействию  $F_k$  и в соответствии с выражением (3.86), величине  $U_{к.н}$  предаварийного напряжения в месте КЗ. Назовем *удельной помехой*  $e_{pc}^*(t)$  огибающую помехи в формируемой величине  $e_{pc}^*(t)$  (рис. 3.25,а) при возмущающем воздействии  $\underline{U}_p$  по выражению (3.86), соответствующему единичному напряжению  $U_{к.н} = 1$  в месте КЗ в предаварийном режиме [5]. Значение  $e_{pc}^*(t)$  в этом случае не зависит от режима ЭС, характеризуемого значением  $U_{к.н}$ , и определяется только видом КЗ и конфигурацией и динамическими свойствами ЭС, измерительных трансформаторов, а также построением и динамическими свойствами самого ЦИО. С учетом принятого определения  $e_{pc}^*(t)$  следует  $E_{pc}(t) = e_{pc}^*(t)U_{к.н}$ .

Обозначим  $E_{pc}^*(t)$  — максимальное значение огибающей удельного сигнала помехи в сравниваемой величине. Значение динамического коэффициента помехи определится при использовании выражения (3.87):

$$k_c = \frac{E_{pc}^*(t)|U_{к.н}|}{|E_p|}, \quad (3.88)$$

Для эквивалентной схемы замещения ЭС (рис. 3.25,б) справедливы следующие соотношения в нагрузочном режиме ( $U_n, I_n, Z_n$ ):

$$U_{к.н} = E_{1c} - Z_{1c}I_n - Z_k I_n; I_n = U_n/Z_n = E_{1c}/(Z_{1c} + Z_n),$$

откуда получим напряжение в месте КЗ в доаварийном режиме

$$U_{к.н} = E_{1c} \frac{Z_n - Z_k}{Z_n + Z_{1c}}, \quad (3.89)$$

Для формирования величины  $E_p$  в режиме КЗ ( $U, I, Z = U/I$ ) имеем:

$$E_p = k_u U + k_i I = I(k_u Z_k + k_i) = \frac{E_{1c}}{Z_{1c} + Z_k} (k_u Z_k + k_i).$$

С учетом этого, из (3.88) получим значение динамического коэффициента помехи

$$k_c = E_{pc}^* \frac{|Z_{1c} + Z_k| |Z_H - Z_k|}{|k_u Z_k + k_i| |Z_H + Z_{1c}|}. \quad (3.90)$$

### 3.8.3. Области опасных режимов ЭС по критерию интенсивности сигнала помехи

Обозначим:

$$k = E_{pc}^* \frac{|Z_{1c} + Z_k|}{|k_u Z_k + k_i|} \quad (3.91)$$

— параметр, зависящий от места КЗ  $Z_k$  и не зависящий от режима ЭС, характеризуемого параметром  $Z_H$ . Тогда с учетом (3.90) линии постоянной (пиковой) интенсивности сигнала помехи  $k_c = \text{const}$  в плоскости  $Z_H$  для случая КЗ в точке  $Z = Z_k$  определяются соотношением

$$k_c = k \frac{|Z_H - Z_k|}{|Z_H + Z_{1c}|}, \quad (3.92)$$

Пусть  $k_c = k_{c, \text{доп}}$  — допустимое значение интенсивности сигнала помехи в формируемой величине, при котором отклонение характеристики в переходном режиме не превышает заданного значения.

Обозначив  $c = k/k_{c, \text{доп}}$  из (3.92) получим условие  $k_c \geq k_{c, \text{доп}}$  при котором необходимые динамические свойства ЦИО не обеспечиваются:

$$c \frac{|Z_H - Z_k|}{|Z_H + Z_{1c}|} \leq 1. \quad (3.93)$$

В плоскости  $Z_H$ , характеризующей режим ЭС, неравенство (3.93) определяет область, ограниченную окружностью 1 радиуса  $R$  с центром  $Z_0$  (рис. 3.27), находящуюся в общем случае ( $c \neq 1$ ) внутри или вне окружности 1 в зависимости от расположения точек  $Z_k$  и  $-Z_{1c}$  относительно этой окружности:

$$R = \frac{c|Z_{1c} + Z_k|}{|c^2 - 1|}, \quad Z_0 = \frac{Z_{1c} + c^2 Z_k}{c^2 - 1}. \quad (3.94)$$

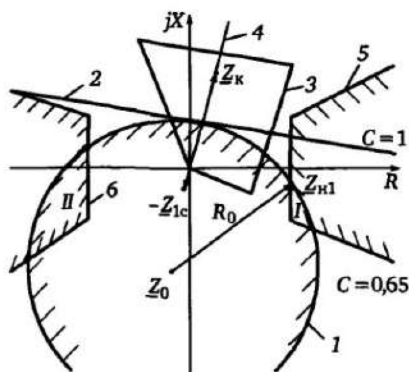


Рис. 3.27. Выделение областей опасных режимов ЭС на основе критерия интенсивности сигнала помехи

Область недопустимых режимов находится по другую сторону окружности относительно точки  $Z_k$ , так как при  $Z_n = Z_k$  условие (3.93) никогда не выполняется. При  $c = 1$  искомая область является полуплоскостью, ограниченной прямой, относительно которой точки  $-Z_{1c}$  и  $Z_k$  являются симметричными (прямая 2 на рис. 3.27).

Полученные соотношения позволяют, в частности, выделить при испытаниях ЦИО режимы ЭС, соответствующие максимальной интенсивности сигнала помехи, при которых целесообразно, в первую очередь, проведение испытаний.

В частности, пример на рис. 3.27 иллюстрирует случай проверки ЦИО с характеристикой 3, когда при КЗ в точке  $Z_k = (10 + j60)$  Ом на протяжённой ВЛ (характеристика 4) при  $Z_{1c} = (2 + j10)$  Ом и режиме ЭС, характеризуемом сопротивлением  $Z_{n1} = (50 - j10)$  Ом, достигнуты предельно допустимые показатели ЦИО по замедлению в срабатывании. При предположении, что замедление в срабатывании обусловлено содержанием сигнала помехи в формируемых величинах, вызванного переходными процессами, можно выделить области нагрузочного режима в плоскости  $Z_n$ , соответствующие большей или меньшей интенсивности помехи, чем при проведенном испытании.

Для этого, приняв в выражении (3.93) соответствующие значения  $Z_k$ ,  $Z_{1c}$  и  $Z_n = Z_{n1}$ , получим значение коэффициента  $c$ :

$$c = \left| \frac{Z_{n1} + Z_{1c}}{Z_{n1} - Z_k} \right| = \left| \frac{50 - j10 + 2 + j10}{50 - j10 - 10 - j60} \right| = 0,644.$$

С учетом соотношений (3.94) и вычисленного коэффициента с имеем  $Z_0 = (10,5 - j59,9)$ ,  $R_0 = 78,3$ , что соответствует окружности 1 на рис. 3.27, проходящей через точку  $Z_{н1}$ . Область режимов  $Z_{н}$ , где интенсивность помех выше, чем при проведенном опыте, находится внутри окружности 1. При возможном расположении вектора нагрузки  $Z_{н}$  в областях 5, 6 наиболее опасными по критерию максимальной интенсивности сигнала помехи являются участки I и II этих областей, охватываемые граничной линией 1. В данном случае целесообразна дальнейшая проверка ЦИО при режиме ЭС, соответствующих этим участкам.

Полученные выше на основе понятий удельного сигнала помехи и интенсивности сигнала помехи соотношения позволяют сформулировать следующие практически важные для анализа и моделирования РЗ положения [5].

*При установке защиты в одной из ветвей ЭС с любым количеством генераторов (рис. 3.25,а) ее поведение в переходном и установившемся режимах при повреждении в данной ветви будет таким же, как и при установке защиты в той же ветви фиктивный двухмашинный ЭС такой же конфигурации с любыми двумя источниками  $E_p'$  и  $E_p''$  и равными нулю напряжениями остальных источников, при условии одинаковости эквивалентных напряжений и кажущихся сопротивлений на входе защиты  $Z_{н}$  для реальной и фиктивной систем.*

Из этого следует, что моделирование и испытание быстродействующих ЦИО в многомашинных ЭС сложной конфигурации можно существенно упростить, сведя многомашинную ЭС к двухмашинной такой же конфигурации. Основной эффект при этом достигается отсутствием необходимости учитывать практически бесконечные сочетания возможных напряжений и фаз отдельных источников и перетоки мощности в отдельных ветвях при моделировании и испытаниях релейной защиты.

## Глава 4

# Токовые и токовые направленные цифровые защиты

### 4.1. Формирование токов и напряжений, измеряемых релейной защитой

#### 4.1.1. Подключение РЗ к измерительным трансформаторам тока и напряжения

Основной функцией измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) является пропорциональное преобразование (уменьшение) токов и напряжений ЭС в величины, из-

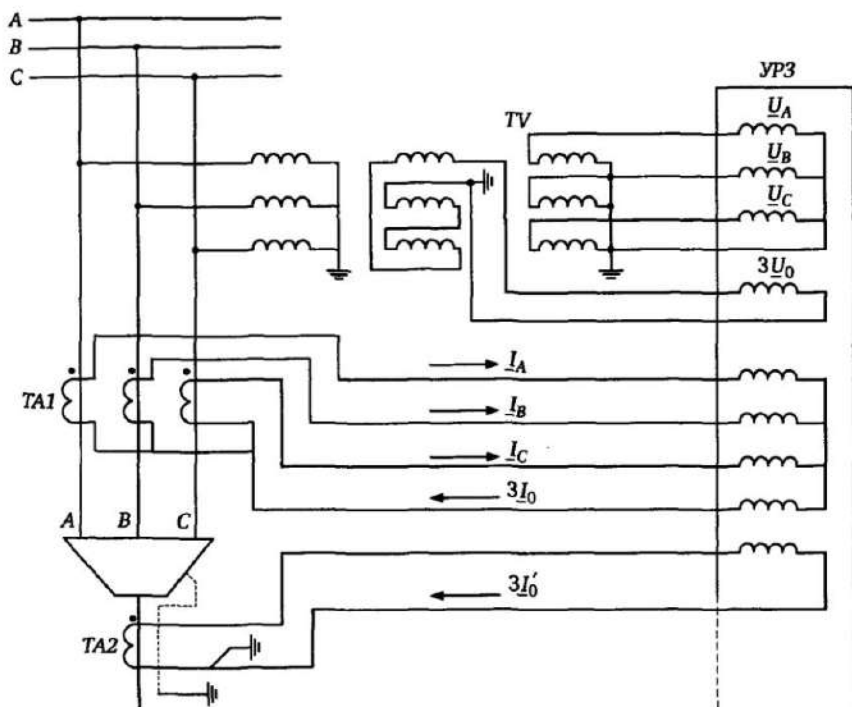


Рис. 4.1. Вариант подключения УРЗ к измерительным трансформаторам тока и напряжения

меряемые релейной защитой. При этом наиболее распространенные номинальные значения вторичных фазных токов, подводимых к РЗ, — 1 А или 5 А, вторичных линейных напряжений — 100 В. Сами устройства РЗ имеют обычно входные преобразователи (промежуточные трансформаторы), обеспечивающие необходимую изоляцию и снижающие измеряемые сигналы до уровней, позволяющих производить их цифровую обработку (см. рис. 1.16). Существуют различные варианты подключения релейной защиты к ТТ и ТН. Один из распространенных вариантов подключения УРЗ к ТТ и ТН (трехфазное исполнение) приведен на рис. 4.1.

В данном случае промежуточные трансформаторы на входе УРЗ подключаются как к фазным токам и напряжениям (полная звезда), так и к токам и напряжениям нулевой последовательности. Использование разомкнутого треугольника в ТН и нулевого провода в ТТ обеспечивает соответственно измерение напряжения и тока нулевой последовательности:

$$3U_0 = U_A + U_B + U_C, \quad 3I_0 = I_A + I_B + I_C.$$

#### 4.1.2. Статические погрешности ТТ и ТН

Для трансформаторов тока и напряжения в общем случае справедлива схема замещения на рис. 4.2,а.

В этой схеме:  $Z'_1 = Z_1 w_2^2 / w_1^2$  — приведенное к вторичной стороне сопротивление первичной обмотки;  $Z'_\mu = Z_\mu w_2^2 / w_1^2$  — приведенное сопротивление ветви намагничивания;  $Z_2$  — сопротивление вторичной обмотки;  $Z_n$  — сопротивление нагрузки;  $I'_1, I_2$  — приведенные первичный и вторичный токи ТТ;  $w_1, w_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток ТТ.

Для идеального ТТ входным сигналом является источник то-

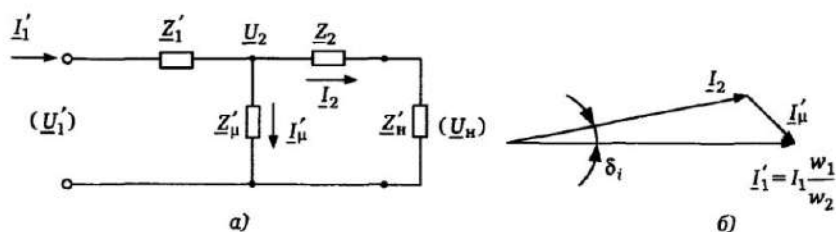


Рис 4.2. Схема замещения (а) ТТ (ТН) и векторная диаграмма (б)

ка, внутреннее сопротивление которого несоизмеримо больше, чем сопротивления  $Z'_1$  и  $Z_2$ , а сопротивление ветви намагничивания  $Z'_\mu$  является бесконечно большим по сравнению с  $Z'_1$ ,  $Z_2$  (ток через  $Z'_\mu$  не протекает). В этом случае из рис. 4.2 имеем  $I_2 = I_1 w_1 / w_2$ . Реальный ТТ отличается от идеального прежде всего тем, что сопротивление ветви намагничивания  $Z'_\mu$  нельзя считать бесконечным по сравнению с  $Z_2$  и  $Z_{\text{н}}$ . Это определяется конечными размерами ТТ и нелинейностью характеристики намагничивания материала сердечника (рис. 4.3, где  $B$  — индукция,  $H$  — напряженность поля).

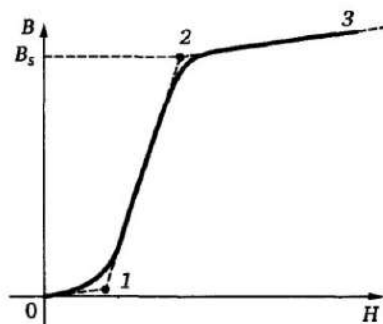


Рис. 4.3. Характеристика намагничивания сердечника трансформатора

В зависимости от величины входного сигнала, значение  $Z'_\mu$ , пропорциональное наклону кривой  $B = f(H)$ , имеет максимальное значение на линейном аппроксимированном участке 1—2 при  $B < B_s$ , где  $B_s$  — индукция насыщения (рис. 4.3). Существенно меньшие значения имеет  $Z'_\mu$  при малых и больших входных сигналах (участки 0—1 и 2—3). Основная погрешность ТТ  $F_i = (I_2 - I'_1) / I'_1$  увеличивается с ростом тока в ветви намагничивания. Чем меньше сопротивление  $Z'_\mu$ , тем больше ток намагничивания и тем больше амплитудные и фазовые отличия тока  $I'_1$  от  $I_2$  и соответствующие погрешности ТТ (см. рис. 4,2,6). Отметим, что на значение и фазу тока  $I'_\mu$  влияет также соотношение между общим сопротивлением во вторичной цепи  $Z_{2\Sigma} = Z_2 + Z_{\text{н}}$  и сопротивлением  $Z'_\mu$ , так как  $I_2 / I'_\mu = Z'_\mu / Z_{2\Sigma}$ , т.е. чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше точность ТТ.

Для ТН входной сигнал поступает от источника напряжения с малым внутренним сопротивлением, и погрешности ТН определяются падением напряжения на сопротивлениях  $Z'_1$  и  $Z_2$ . Так же как и в ТТ, чем меньше сопротивление  $Z'_\mu$ , тем больше погрешность ТН. Однако в данном случае погрешность уменьшается с возрастанием сопротивления нагрузки. В идеальном случае погрешность ТН стремится к нулю при выполнении условий:  $Z'_\mu \gg Z'_1$ ,  $Z_{\text{н}} \gg Z'_\mu$ .

В табл. 4.1 приведены основные показатели, определяющие

Таблица 4.1. Основные показатели измерительных трансформаторов тока и напряжения в статических режимах

Показатель	Трансформатор тока	Трансформатор напряжения
Коэффициент трансформации	$k_{\text{ном}i} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$	$k_{\text{ном}u} = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$
Нагрузка	$Z_{\text{нр}} \cos\varphi_{\text{н}}$	$Z_{\text{нр}} \cos\varphi_{\text{н}}$
Номинальная мощность	$S_{\text{ном}}$	$S_{\text{ном}}$
Погрешность по амплитуде	$F_i \% = \frac{k_{\text{ном}i} I_2 - I_1}{I_1}$	$F_u \% = \frac{k_{\text{ном}u} U_2 - U_1}{U_1}$
Погрешность по углу	$\delta_i = \varphi_{i2} - \varphi_{i1}$	$\delta_u = \varphi_{u2} - \varphi_{u1}$
Эффективная погрешность	$\varepsilon \% = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_{\text{ном}i} i_2 - i_1)^2 dt}$	—
Предельная кратность тока	$k_n = I_{1\text{max}}/I_{1\text{ном}}$ при $F_i = n\%$	—

свойства ТТ и ТН в статическом режиме (при синусоидальных сигналах).

Коэффициент трансформации ТТ (ТН) определяется как отношение номинальных значений токов (напряжений) на первичных и вторичных сторонах.

Нагрузка  $Z_{\text{н}}$  и номинальная мощность  $S_{\text{ном}}$  соответствуют номинальным значениям величин на вторичной стороне ТТ (ТН). Показатели ТТ (ТН) по точности гарантируются при нагрузке, не превышающей номинальное значения.

Погрешности  $F_i\%$  и  $F_u\%$  по амплитуде соответствуют отклонениям модулей вторичных величин относительно их расчетных значений вследствие неидеальности ТТ (ТН) (см. рис. 4.2).

Погрешности по углу  $\delta_i$  и  $\delta_u$  соответствуют фазовым отклонениям вторичных величин ТТ (ТН) (см. рис. 4.2,б).

Эффективная погрешность  $\varepsilon\%$  определяет отклонение действующего значения вторичного тока  $i_2$  от расчетного с учетом несинусоидальности вторичного тока ТТ вследствие нелинейности характеристик ТТ (см. рис. 4.3).

Предельная кратность тока  $k_n$  — важный параметр ТТ, характеризующий границу  $I_{1\text{max}}$  диапазона токов, при которых погрешность ТТ не превосходит заданного значения  $n\%$  (при номинальном значении нагрузки ТТ).

Так, например, значение  $k_n = 20$  при  $n\% = 10$  означает, что



Таблица 4.2. Классы точности трансформаторов тока для РЗ в соответствии со стандартом МЭК (IEC60044-1)

Класс точности	Токовая погрешность при $I = I_{\text{ном}}$ , %	Угловая погрешность при $I = I_{\text{ном}}$ , мин	Токовая погрешность при $I = k_n I_{\text{ном}}$ , %
5 P	$\pm 1$	$\pm 60$	5
10 P	$\pm 3$	—	10

при нагрузке, не превышающей номинальную, погрешность  $F_i\%$  с учетом нелинейности характеристик намагничивания ТТ (рис. 4.3) не превышает 10% в диапазоне первичных токов  $I_1 \leq 20I_{\text{ном}}$ .

При отличии мощности (сопротивления) нагрузки от номинальной предельная кратность тока  $k'_n$  пересчитывается по следующей упрощенной формуле (при активной нагрузке):

$$k'_n = \frac{R_2 + R'_n}{R_2 + R'_n} k_n, \quad (4.1)$$

где  $R_2$  — сопротивление вторичной обмотки ТТ;  $R_n, R'_n$  — сопротивления, соответствующие номинальной и реальной нагрузкам.

В соответствии со стандартом МЭК (IEC60044-1) для трансформаторов тока, используемых в релейной защите (в обозначении добавляется индекс Р), приняты два класса точности (5 или 10%) при токе, соответствующем предельной кратности тока  $k_n$  (см. табл. 4.2).

Так, например, обозначение трансформатора 5P30 означает, что погрешность трансформатора при токах, меньших  $30I_{\text{ном}}$ , не превышает 5%.

#### 4.1.3. Особенности функционирования ТТ в динамических режимах и режимах насыщения

С учетом нелинейности характеристики намагничивания сердечника ТТ, неискаженная передача первичного тока может осуществляться лишь в случае, если индукция в сердечнике ТТ не превышает индукции насыщения  $B_s$  (рис. 4.3). Если принять для упрощения ветвь намагничивания (см. рис. 4.2,а) чисто индуктивной, а сопротивления вторичной ветви ( $R_2, R'_n$ ) активными, то справедливо соотношение

$$u_2 = w_2 S \frac{dB}{dt} = i_2 (R_2 + R_n), \quad (4.2)$$

где  $S$  — сечение сердечника;  $u_2$  — напряжение в ветви намагничивания.

Индукция  $B$  в сердечнике ТТ определяется из выражения (4.2):

$$B = \frac{R_2 + R_n}{w_2 S} \int i_2 dt, \quad (4.3)$$

т.е. индукция растет пропорционально площади, охватываемой кривой тока  $i_2$ .

При синусоидальных токах, соответствующих установившимся режимам ЭС, границы токов  $I'_{1\max}$ , характеризующиеся предельными кратностями токов  $k_n$  (см. выше), достигаются при достаточно значительных токах  $I'_1$  в силу того, что площадь, ограниченная кривой вторичного тока, знакопеременна и накопления индукции в сердечнике не происходит. При КЗ и коммутациях в ЭС могут возникнуть в общем случае затухающие аperiodические и гармонические составляющие в токах и напряжениях, являющиеся реакцией на состоявшееся возмущение. В результате в начальный период после возникновения возмущения токи и напряжения уже не являются синусоидальными.

На рис. 4.4 показан симметричный установившейся режим глубокого насыщения ТТ при активной нагрузке.

В момент  $t_1$  индукция  $B$  достигает значения индукции насыщения  $B_s$ , и в идеальном случае индукция  $B$  дальше не изменяется, что с учетом (4.2) соответствует  $u_2 = 0$ , т.е. ток  $i_2$  в нагрузке отсутствует. Изменение индукции начинает происходить

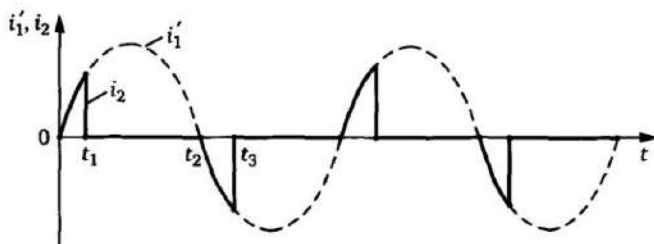


Рис. 4.4. Симметричный режим насыщенного ТТ в режиме выше предельной кратности тока

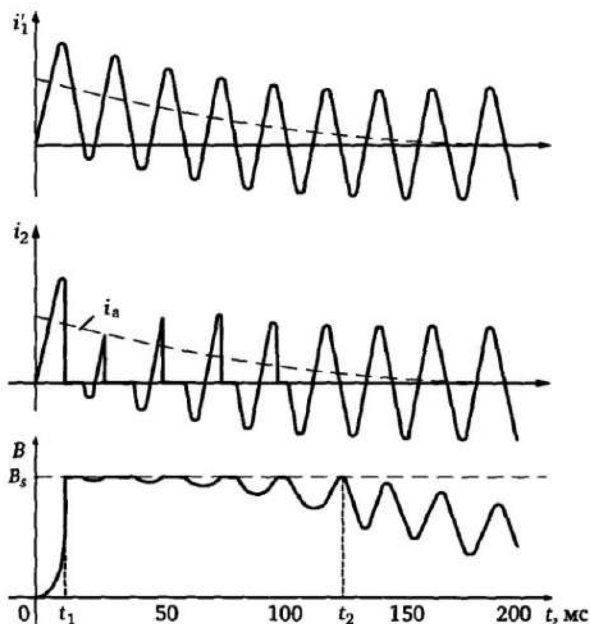


Рис. 4.5. Несимметричный режим насыщенного ТТ при наличии аperiodической составляющей  $i_a$  в первичном токе

лишь при смене знака тока  $i'_1$  (момент  $t_2$ ), но в момент  $t_3$  при новом насыщении  $B = -B_s$  значение  $i_2$  снова становится равным нулю.

Насыщение ТТ и искажение формы вторичного тока может происходить и при первичных токах, значительно меньших токов предельной кратности, в случае присутствия в первичном токе аperiodических составляющих, возникающих в ЭС при КЗ и коммутациях. Эти составляющие являются реакцией ЭС, содержащей элементы с индуктивностью (трансформаторы, воздушные и кабельные линии), на скачкообразное возмущение (КЗ или коммутацию). В результате до затухания возникшего переходного процесса токи и напряжения на входе РЗ содержат в общем случае совокупность аperiodических и затухающих гармонических составляющих, т.е. не являются синусоидальными. Ветвь намагничивания  $Z'_\mu$  (см. рис. 4.2) обладает сравнительно большой индуктивностью и имеет достаточно малое сопротивление для медленно изменяющихся аperiodических составляющих.

ющих. Это приводит к возрастанию тока намагничивания  $i_{\mu}$ , индукции  $B$  и насыщению ТТ при относительно небольших значениях установившейся составляющей первичного тока  $i_1'$ . Процесс насыщения ТТ в этом случае показан на рис. 4.5 [22].

Наличие апериодической составляющей приводит к насыщению ТТ в момент  $t_1$ , когда индукция сердечника достигает значения  $B_s$ . Далее в сравнительно небольшие промежутки времени, когда ток  $i_1$  принимает отрицательные значения, происходит снижение индукции  $B$  и возрастание тока  $i_2$ . Лишь при затухании апериодической составляющей ( $t > t_2$ ) происходит снижение индукции до значения  $B < B_s$  и полноценная передача тока  $i_2$ .

#### 4.1.4. Емкостные трансформаторы напряжения

Для сетей высоких напряжений во многих случаях используются емкостные трансформаторы напряжения (ЕТН) на основе емкостных делителей напряжения (рис. 4.6,а).

Эти трансформаторы содержат емкостный делитель напряжения  $C_1, C_2$ , дроссель  $D$ , компенсирующий емкостные сопротивления делителя, понижающий трансформатор  $T$ .

Упрощенная схема замещения ЕТН, где  $C_T$  — межвитковая емкость трансформатора  $T$  (рис. 4.6,б), соответствует инерционному звену. При скачкообразных изменениях напряжения в ЭС, не только происходит изменение вторичного напряжения  $u_2$  основной частоты, но и возникают свободные составляющие переходного процесса, обусловленного накоплением энергии в

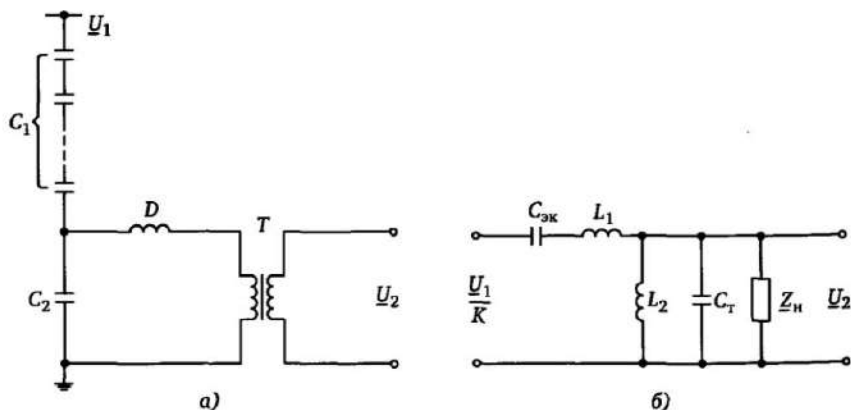


Рис. 4.6. Емкостный трансформатор напряжения (а) и его схема замещения (б)

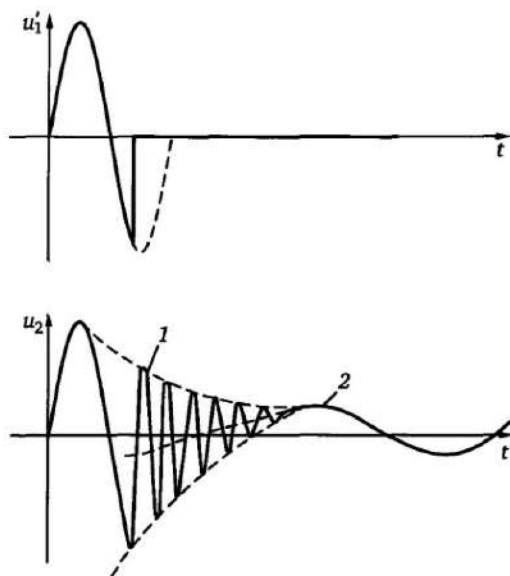


Рис. 4.7. Первичное  $u_1'$  и вторичное  $u_2$  напряжения ЕТН при сбросе напряжения до нуля:  
1, 2 — затухающие высокочастотная и низкочастотная составляющие  
собственных колебаний в ЕТН

элементах ЕТН. При глубоких падениях напряжения на входе ЕТН возникают интенсивные собственные переходные процессы в ЕТН, содержащие высокочастотную и низкочастотную затухающие колебательные составляющие, существенно превосходящие по амплитуде составляющую основной частоты (рис. 4.7). Они на некоторое время существенно искажают измеряемый сигнал и должны учитываться при проектировании быстродействующих УРЗ.

## 4.2. Максимальная токовая защита

### 4.2.1. Основные функции

Основной функцией максимальной токовой защиты (МТЗ) является отключение элемента ЭС по критерию увеличения протекающего через него тока. В общем случае действие МТЗ зависит как от значения тока КЗ, так и от длительности его протекания. Максимальные токовые защиты могут иметь ступенчатую (рис. 4.8,б) и плавно-зависимую (рис. 4.8,г) характеристики срабатывания, а также могут быть комбинацией обоих.

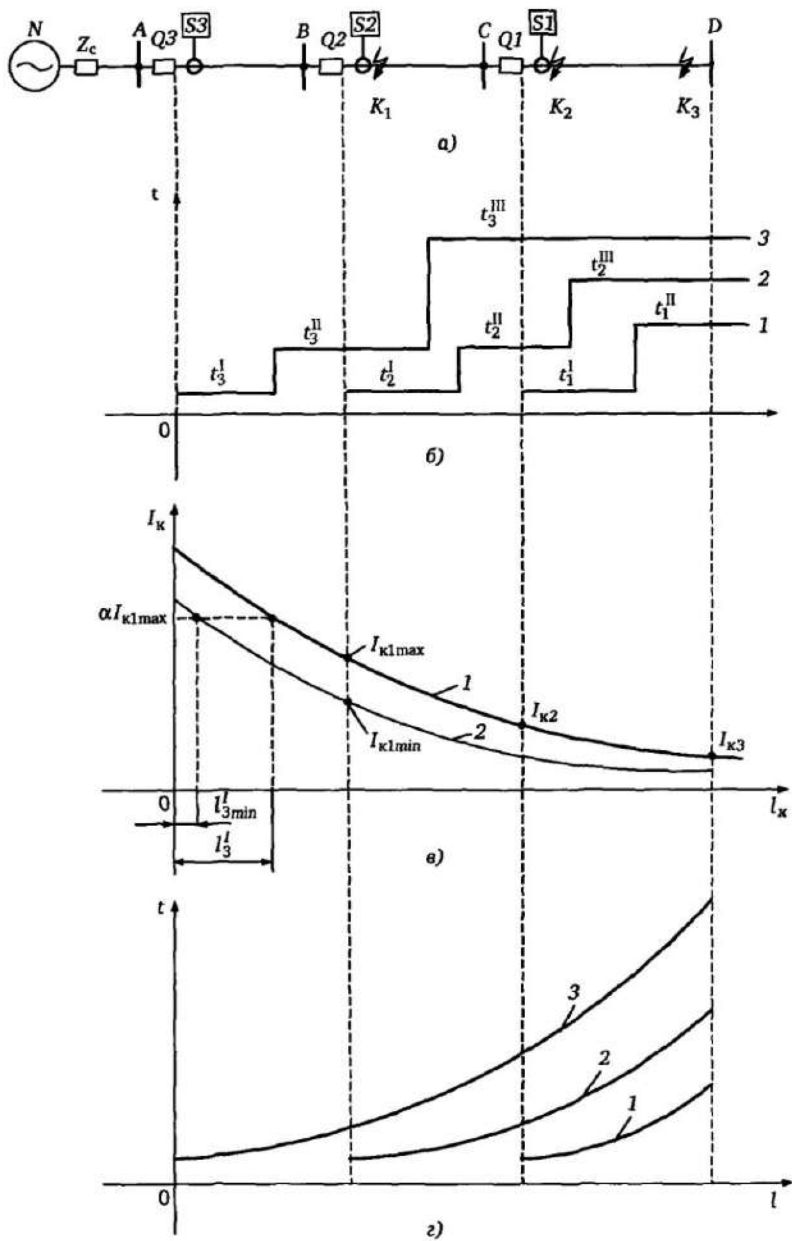


Рис. 4.8. Максимальная токовая защита:  
 а — установка в сети; б — характеристики МТЗ с независимой выдержкой времени;  
 в — зависимость тока КЗ от удаленности повреждения; г — характеристики МТЗ с  
 зависимой выдержкой времени

В частности, МТЗ S3, установленная на шинах подстанции А (рис. 4.8,а) и действующая на выключатель Q3, имеет ступенчатую характеристику срабатывания  $I_3$ , состоящую из трех участков. Первый участок имеет минимальную выдержку времени  $t_3^I$ . Эта часть характеристики МТЗ должна обеспечивать по возможности больший охват участка АВ при КЗ. Однако защита S3 должна быть селективной, т.е. не срабатывать при КЗ на участке ВС. Контрольным случаем является КЗ  $K_1$  в начале участка ВС, при котором защита S3 не должна срабатывать. Следует иметь в виду, что при одном и том же месте и виде КЗ токи, протекающие через защиты, могут существенно различаться в зависимости от режима ЭС. В данном случае на рис. 4.8 токи КЗ изменяются в зависимости от значения напряжения системы  $N$  и эквивалентного сопротивления  $Z_c$ , приведенных к шинам подстанции А. Зависимость значения тока КЗ  $I_k$ , протекающего через защиты, от удаленности места КЗ  $l_k$  от шин подстанции А приведена на рис. 4.8,в (1 — максимальный режим, 2 — минимальный режим). С учетом изложенного, ток срабатывания  $I_3^I$  первой ступени защиты S3 для обеспечения селективности должен соответствовать условию  $I_3^I = \alpha I_{k1 \max}$ , где  $I_{k1 \max}$  — ток КЗ в точке  $K_1$  в начале участка ВС;  $\alpha$  — коэффициент запаса ( $\alpha > 1$ ). Зона, охватываемая первой ступенью защиты S3, легко определится по кривой  $I_k(l_k)$  на рис. 4.8,в. Эта зона равна  $l_3^I$  в максимальном режиме и становится существенно меньше в минимальном режиме ( $l_{3 \min}^I$ ).

Второй участок характеристики защиты S3 можно определить из двух условий. Первое условие — надежный охват конца участка АВ, не охваченного первой ступенью. Указанное означает, что ток срабатывания второй ступени  $I_3^{II}$  должен быть меньше тока КЗ в точке  $K_1$  в начале второго участка в минимальном режиме ЭС ( $I_3^{II} = I_{k1 \min} / \alpha$ ).

Второе условие выбора параметров защиты S3 — обеспечение селективности с учетом того, что при КЗ  $K_1$  в начале второго участка должна работать первая ступень защиты S2 участка ВС с малой выдержкой времени  $t_2^I$ , аналогичная рассмотренной выше первой ступени защиты S3. Данное условие обеспечивается выдержкой времени второй ступени защиты S3  $t_3^{II}$ , большей на ступень селективности  $\Delta t = t_3^{II} - t_2^I$  выдержки времени первой ступени защиты S2.

Третья ступень защиты S3 с выдержкой  $t_3^{III}$  выбирается таким

образом, чтобы действовать селективно по отношению ко вторым и третьим ступеням защит предыдущих участков  $BC$  и  $CD$  (рис. 4.8,б).

Последняя ступень защиты  $S3$  с учетом изложенного должна иметь максимальную выдержку времени, большую на ступень селективности  $\Delta t$  максимальной выдержки времени последних ступеней защит  $S2$  и  $S1$  предыдущих участков  $BC$  и  $CD$ . Для обеспечения максимально возможной чувствительности последней ступени МТЗ ее ток срабатывания  $I_3^{\text{III}}$  выбирается не по условиям КЗ, а по условиям отстройки от максимального рабочего тока, протекающего через защиту в нормальном режиме.

При этом необходимо учитывать и возможные режимы быстрого включения линии после отключения КЗ (автоматическое повторное включение — АПВ), когда при повторном включении вследствие пусковых токов двигателей токи нагрузки могут в первые моменты времени быть больше, чем максимальный установившийся ток нагрузки  $I_{\text{раб max}}$ . Один из возможных случаев поясняет рис. 4.9.

До наступления КЗ через защиту  $S3$  (рис. 4.8,а) протекает ток  $I_{\text{раб max}}$ . При КЗ на участке  $AB$  (рис. 4.8,а) в момент  $t_1$  ток через защиту увеличивается до значения  $I_k$  и в момент  $t_2$  — падает до нуля вследствие отключения защитой выключателя  $Q3$ . Через промежуток времени  $\Delta t_{\text{АПВ}}$  выключатель  $Q3$  снова включается устройством АПВ, и, даже если повреждение устранено, ток через защиту  $S3$  может быть существенно больше рабочего тока  $I_{\text{раб max}}$ . Это происходит вследствие того, что электродвигатели нагрузки, питаемые от шин подстанции существенно затормо-

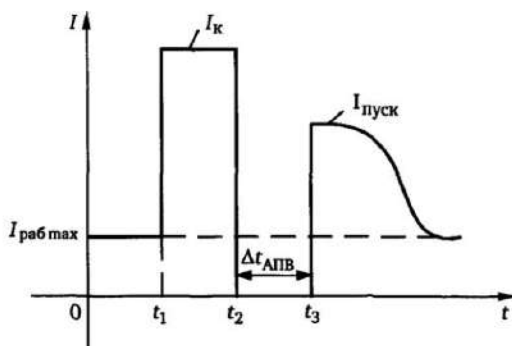


Рис. 4.9. Изменение токов в режиме КЗ с последующим АПВ



зились за время отсутствия напряжения на шинах В. В момент  $t_3$  (рис. 4.9) возникает режим их повторного пуска, сопровождающийся возрастанием суммарного тока через участок АВ до значения  $I_{\text{пуск}}$ , спадающего постепенно до значения  $I_{\text{раб max}}$ . Ступени МТЗ должны быть отстроены от возможности срабатывания после повторного включения линии.

**Учет коэффициента возврата.** Надежное срабатывание УРЗ на грани зоны действия обеспечивается тем, что параметр, определяющий его срабатывание, отличается от параметра возврата. В противном случае действие реле на грани срабатывания неопределенно, что на практике приводит к вибрации (многократному изменению состояний «срабатывание — несрабатывание») в этом режиме. Указанные свойства УРЗ определяются коэффициентом возврата  $k_v$ , который для токовых защит равен отношению тока возврата к току срабатывания.

При выборе параметров ступенчатых защит с селективностью, обеспечиваемой выдержками времени (рис. 4.8,б), необходимо учитывать коэффициент возврата. Например, для МТЗ при отстройке от максимального тока нагрузки необходимо повышение уставки по току в  $1/k_v$  раз, что обеспечивает надежный возврат защиты в исходное состояние без неселективного отключения в условиях рис. 4.9.

Максимальные токовые защиты с зависимой выдержкой времени имеют вместо ступенчатых характеристик одну плавную зависимость характеристики выдержки времени (рис. 4.8,г). Указанное упрощает во многих случаях их использование и дает дополнительные возможности, но не вносит принципиальных отличий в концепцию применения МТЗ.

#### 4.2.2. Построение ступени МТЗ с независимой выдержкой времени

На рис. 4.10 приведена упрощенная схема ступени максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени Т (при включении элемента выдержки времени 5) или же с зависимой от тока выдержкой времени (при включении элемента зависимой от тока выдержки времени 6).

При превышении любым из фазных токов  $I_A, I_B, I_C$  уставки  $I >$  соответствующего компаратора (блоки 1—3) возникает сигнал «Пуск  $I >$ », и при отсутствии блокирующих сигналов запускает-

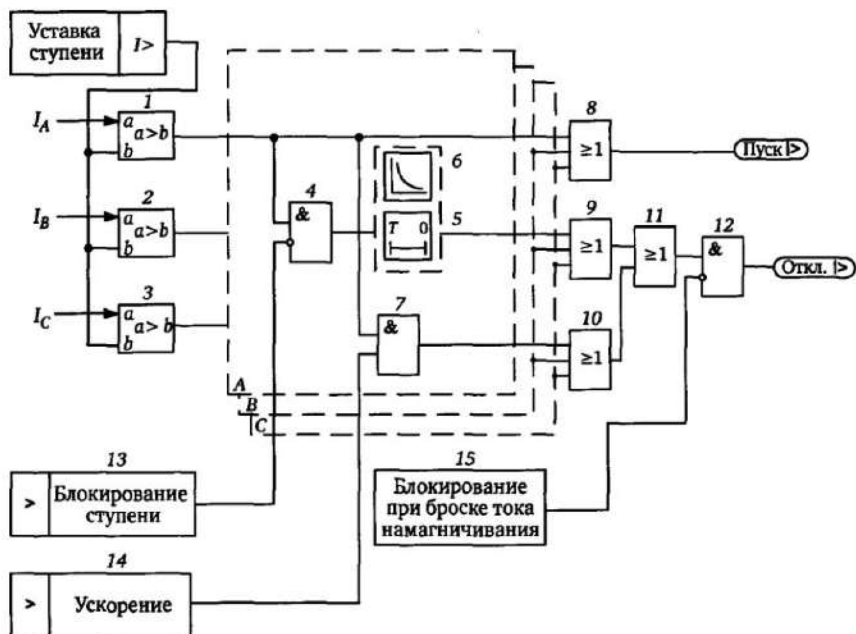


Рис. 4.10. Упрощенная схема максимальной токовой защиты с независимой (элемент 5) или с зависимой (элемент 6) выдержкой времени

ся элемент выдержки времени 5. Через время выдержки ступени  $T$  на выходе схемы 12 возникает сигнал отключения. Ускорение ступени МТЗ (сигнал от блока 14) заключается в исключении выдержки времени  $T$  с помощью элемента 7. Ускорение используется в основном при ручном включении выключателя. В этом случае программируется один из дискретных входов защиты, который по наличию или отсутствию напряжения фиксирует команду на включение выключателя. Ускорение возможно применить также и в циклах АПВ, когда при повторном включении выключателя на КЗ программа АПВ генерирует сигнал на отключение без выдержки времени.

Блокирование любой ступени (элемент 4) может быть осуществлено как внешним контактом, так и в цикле АПВ. Указанное расширяет конкретные возможности применения защиты. Блокирование при броске намагничивающего тока (элемент 12) обеспечивает запрет срабатывания при возрастании тока вследствие включения силового трансформатора (см. ниже).

### 4.2.3. Блокирование МТЗ при броске намагничивающего тока силового трансформатора

Силовые трансформаторы  $T$ , используемые в ЭС, обладают большой индуктивностью  $L$  и сравнительно малым активным сопротивлением  $R$ , что определяет достаточно большую постоянную времени затухания  $\tau = L/R$  собственных переходных процессов в трансформаторе, достигающую десятков секунд. В процессе эксплуатации могут возникать режимы, когда напряжение на входе трансформатора скачкообразно изменяется от нуля (или малых значений) до номинального. Эти состояния поясняют рис. 4.11,а для случая включения трансформатора  $T$  и рис. 4.11,б, когда при КЗ  $K$  на отходящем присоединении напряжение падает, а потом при отключении выключателя  $Q2$  снова восстанавливается до номинального.

Процесс включения трансформатора поясняет упрощенная схема замещения рис. 4.11,в.

При включении трансформатора под напряжение в каждой фазе возникает компенсирующая медленно затухающая апериодическая составляющая тока. В силу того, что характеристика намагничивания трансформатора нелинейна (см. рис. 4.3) происходит его насыщение и искажение формы кривой тока (рис. 4.11,г). В форме кривой тока преобладают четные гармоники, в основном вторая. Токи, протекающие в первые моменты после включения, ограничиваются в основном эквивалентным

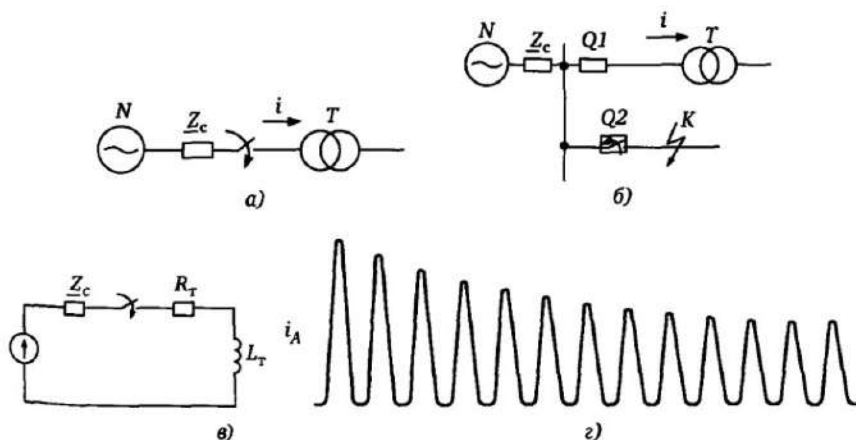


Рис. 4.11. Насыщение силового трансформатора при коммутациях

сопротивлением системы  $Z_c$  (рис. 4.11,а) и могут достигать многократных значений по отношению к номинальному току  $I_{\text{ном}}$  трансформатора (до  $10I_{\text{ном}}$ ). Подобная картина возникает и при отключении КЗ на отходящем присоединении (рис. 4.11,б), приводящем к скачкообразному возрастанию напряжения на входе трансформатора.

Описанный эффект без принятия специальных мер может приводить к неправильному действию токовых защит при включении или коммутации элементов ЭС с трансформаторами в силу существенного возрастания тока. Избежать этого можно либо увеличением уставок токовых защит, что не всегда приемлемо по условию чувствительности к КЗ, либо принятием специальных мер для загробления или блокирования защит при наличии броска намагничивающего тока.

Возможности использования загробления и блокирования основаны на различии форм тока при КЗ и при броске тока намагничивания. В последнем случае наличие постоянной составляющей приводит, например, к увеличению длительности сигналов какой-либо полярности (рис. 4.11,з). Однако данное решение имеет ряд ограничений по возможности применения, прежде всего по диапазону охватываемых токов КЗ.

Использование цифровой техники позволяет принципиально решить указанную проблему на основе гармонического анализа кривых токов отдельных фаз. Насыщение силового трансформатора при включении характеризуется существенным возрастанием доли составляющих токов второй гармоники по отношению к составляющим основной частоты. Указанное позволяет решить задачу прямым способом, задавая границу распознавания режима включения трансформатора путем контроля параметра блокирования  $k_{\text{бл}} = I_{2f}/I$ , где  $I_{2f}$  — амплитуда составляющей тока второй гармоники;  $I$  — амплитуда составляющей тока основной частоты. Данный принцип реализации пояснен на рис. 4.12 при контроле токов фазы А [9].

Блоки 1 и 2 обеспечивают измерение цифровыми методами, например с помощью алгоритма Фурье, амплитуд первой и второй гармонических составляющих в токе  $i_A$ . Уставка по коэффициенту блокирования  $k_{\text{бл}}$  задается блоком 3. Компаратор 4 обеспечивает выявления режима включения трансформатора по условию  $I_{2Af}/I_A \geq k_{\text{бл}}$ . Для повышения надежности функционирования при токах  $I_A$ , больших, чем максимально возможный бро-

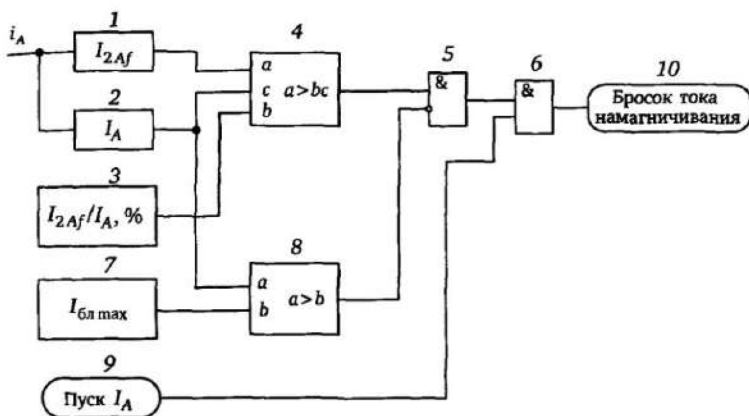


Рис. 4.12. Выявление броска тока намагничивания

сок тока намагничивания, используется параметр  $I_{\text{бл max}}$  (блок 7) и компаратор 8. Это обеспечивает сигнал «Бросок тока намагничивания» и последующее блокирование только в диапазоне токов  $I_A < I_{\text{бл max}}$ . Блок 6 обеспечивает отсечение границы токов снизу, позволяя распознавать включение трансформатора только в случае, если произошел пуск токовой ступени (сообщение 9 «Пуск  $I_A$ »). Блокирующее сообщение о выявлении режима включения трансформатора поступает в тракт отключения МТЗ (см. рис. 4.10, блок 12).

#### 4.2.4. МТЗ с независимой выдержкой времени и регулируемым временем возврата

Возможно использование МТЗ, обладающей временной задержкой на возврат при снижении входного тока ниже уставки срабатывания [28]. В этом случае МТЗ приобретает дополнительные свойства, повышающие, например, его чувствительность при прерывистом токе и улучшающие его согласование с электромеханическими реле, имеющими выдержку времени при возврате. На рис. 4.13 пояснено функционирование реле в этом случае при прерывистом токе.

Сами по себе промежутки времени  $t_1-t_2$ ,  $t_3-t_4$ ,  $t_5-t_6$ , в которые входной ток  $I$  (действующее значение) превышает уставку срабатывания  $I >$  компаратора (рис. 4.13,а), недостаточны для срабатывания МТЗ, так как их длительность меньше уставки  $T$  элемента задержки 2. Этот элемент имеет внутренний счет-

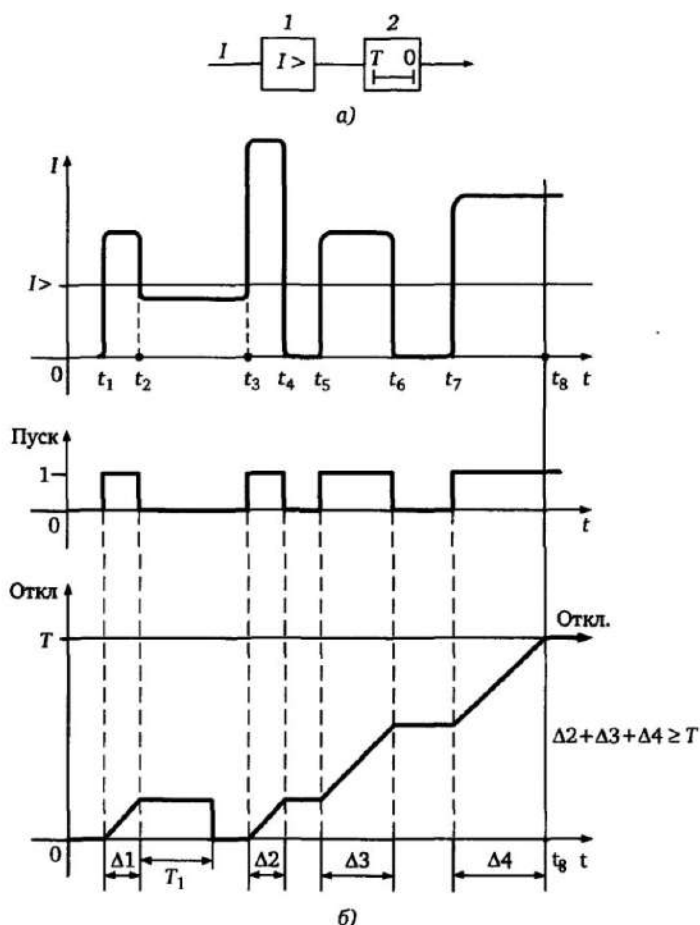


Рис. 4.13. Функционирование МТЗ с устанавливаемым временем возврата при прерывистом токе

чик, сбрасывающий результат через время  $T_1$  (рис. 4.13,б). После первого превышения тока в промежутке  $t_1—t_2$  время во внутреннем счетчике не накапливается, так как в момент  $t_2$  ток снижается и остается меньше уставки срабатывания в промежутке времени  $t_2—t_3$ , большем, чем уставка времени  $T_1$  на возврат счетчика.

При дальнейшем протекании процесса каждый промежуток времени  $t_4—t_5$  и  $t_6—t_7$ , в которые пусковой орган МТЗ возвращается, меньше времени  $T_1$ . Поэтому суммарная выдержка вре-

мени срабатывания пускового органа МТЗ постепенно накапливается, и в момент превышения им значения уставки по времени  $T$  МТЗ срабатывает.

#### 4.2.5. МТЗ с зависимой от тока выдержкой времени (МТЗЗ)

Наличие зависимой от значения тока выдержки времени придает защитной функции новые свойства, которые позволяют эффективно использовать ее, например, на линиях, защищенных плавкими предохранителями, для защит двигателей и в ряде других случаев. Характеристики МТЗЗ определяются, как правило, международными стандартами. Структурная схема МТЗЗ практически совпадает со схемой ступени МТЗ (см. рис. 4.10) с той разницей, что вместо элемента с независимой выдержкой времени 5 используется элемент с зависимой выдержкой времени 6. Основные характеристики МТЗЗ в соответствии со стандартами IEC и ANSI/IEEE можно в большинстве случаев описать выражением:

$$t = \left[ \frac{G}{(I/I_p)^\alpha - 1} + H \right] D, \quad (4.4)$$

где  $G$ ,  $\alpha$ ,  $H$  — постоянные коэффициенты, зависящие от формы требуемой зависимости;  $I$  — ток КЗ;  $I_p$  — уставка МТЗЗ по току;  $D$  — постоянная времени.

Для характеристик стандарта IEC в выражении (4.4) всегда  $H = 0$ .

В качестве примера, на рис. 4.14,а приведены характеристики срабатывания МТЗЗ (тип «INVERSE» в соответствии со стандартом ANSI/IEEE), описываемые в соответствии с (4.4) выражением:

$$t = \left[ \frac{8,9341}{(I/I_p)^{2,0938} - 1} + 0,17966 \right] D.$$

При токе  $I$ , незначительно превышающем ток уставки  $I_p$  ( $I \approx I_p$ ), время срабатывания МТЗЗ в соответствии с выражением (4.4) может достигать достаточно больших значений. Для четкой фиксации в этом режиме состояния МТЗЗ имеется порог

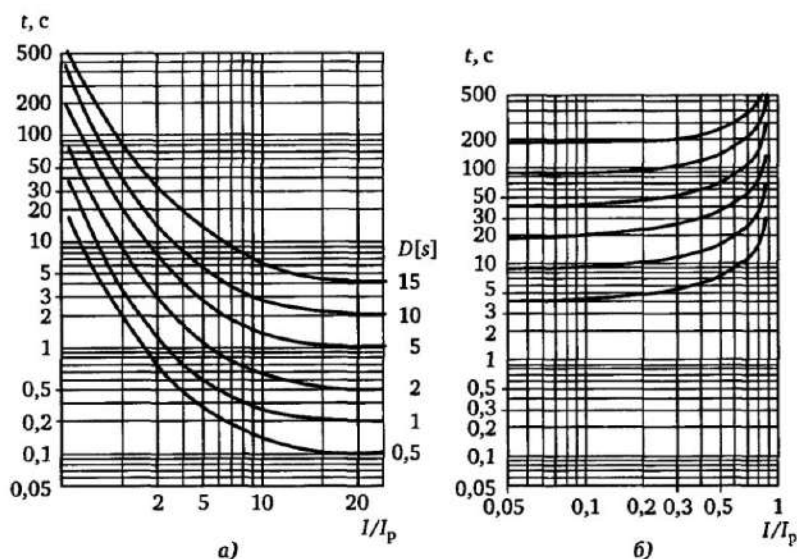


Рис. 4.14. Характеристики срабатывания (а) и возврата (б) МТЗ с зависимой выдержкой времени

срабатывания  $I = 1,1I_p$ , при превышении которого производится пуск данной функции. Универсальным решением является возможность графического (по точкам) задания пользователем необходимой характеристики.

**Характеристики возврата МТЗЗ.** Максимальная токовая защита с зависимой от тока выдержкой времени может выполняться или с мгновенным возвратом, если ток становится меньше порогового значения, или же со специальными характеристиками возврата, обеспечивающими лучшее согласование с электромеханическими реле, а также более эффективную работу при прерывистом токе. В соответствии с нормами IEEE характеристики возврата описываются формулой

$$t_B = \frac{G}{(I/I_p)^\alpha - 1} D, \quad (4.5)$$

где значение  $G$  отличается в общем случае от значений, используемых в выражении (4.4).

На рис. 4.14,б в качестве примера приведены характеристики возврата МТЗЗ.



#### 4.2.6. Использование пусковых и блокирующих сигналов в МТЗ

Имеющиеся в цифровых МТЗ сигналы пуска отдельных ступеней и входы для их блокирования (см. рис. 4.10), позволяют в определенных случаях исключить такой существенный недостаток МТЗ как необходимость для обеспечения селективности увеличения выдержек резервных ступеней защит (см. рис. 4.8,б,г) и расширяют возможности других эффективных решений. В качестве примера, ниже рассматривается два распространенных случая [9].

**Обеспечение защиты сборных шин в радиальных сетях.** На рис. 4.15 показаны радиальная сеть с односторонним питанием через трансформатор  $T$  и с защитой  $S1$ , установленной на питающем вводе.

От сборных шин  $A$  отходят несколько линий с защитами  $S2, S3, S4$ . На рис. 4.15 показан принцип обеспечения защиты шин  $A$ , основанный на том, что в данной радиальной сети при КЗ в начале любой линии, например  $K_1$ , ток КЗ измеряется как защитой  $S1$  питающего конца, так и защитой  $S2$  поврежденной линии. Пусковые выходы МТЗ (см. рис. 4.10, сообщение «Пуск  $I >$ ») всех отходящих линий объединены и подаются на блокирующий вход быстродействующей ступени  $I >>$  защиты  $S1$  пи-

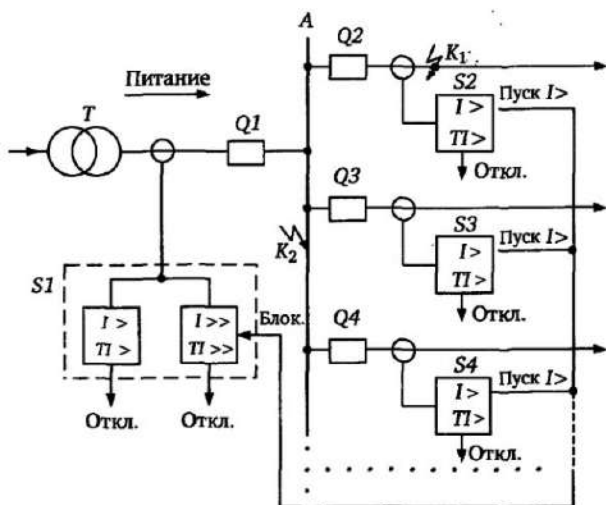


Рис. 4.15. Использование блокирующих сигналов МТЗ для защиты сборных шин

тающей линии (рис. 4.10, блок 13). В результате, при КЗ  $K_1$  в начале отходящей линии появляется сигнал «Пуск  $I>$ », блокирующий отключение питающей линии быстродействующей ступенью, а отключение производится защитой  $S_2$  отходящей линии. При КЗ  $K_2$  на шинах А ни одна из защит отходящих линий не запускается, и КЗ отключается быстродействующей ступенью  $I>>$  защиты  $S1$  питающей линии, так как ее блокирование в этом случае не происходит. Ступень  $I>$  защиты  $S1$ , имеющая большую, чем ступень  $I>>$ , выдержку времени  $T1>$ , обеспечивает резервирование защит отходящих линий. Следует отметить, что для обеспечения селективности быстродействующая ступень защиты  $S1$  должна иметь небольшую временную задержку  $T1>>$ , чтобы не допустить срабатывания до прихода блокирующего сигнала от защит отходящих линий.

**Ускоренное отключение повреждений МТЗ с зависимой выдержкой времени в радиальных сетях.** Данное решение поясняет рис. 4.16, где МТЗ  $S1, S2, S3$  с зависимой выдержкой времени имеют одинаковые уставки по току  $I_p$  и времени отключения.

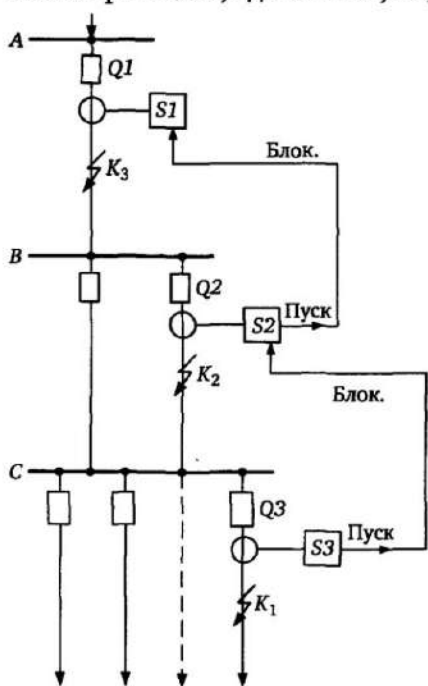


Рис. 4.16. Использование блокирующих сигналов МТЗ в защите радиальных линий

При КЗ  $K_1$  пусковые сигналы без выдержки времени защит  $S3$  и  $S2$  блокируют соответственно тракты отключения защит  $S2, S1$  и КЗ отключается защитой  $S3$ . При КЗ  $K_2$  защита  $S3$  не запускается ввиду отсутствия тока, а пуск от защиты  $S2$  блокирует защиту  $S1$ . Отключение КЗ обеспечивается защитой  $S2$ . При КЗ  $K_3$  запускается и действует на отключение только защита  $S1$ . Таким образом, все защиты имеют одинаковые временные характеристики, и, в отличие от рис. 4.8, не требуется разнесения их выдержек времени для обеспечения селективности. Команда бло-

кировки от защиты  $S2$  к защите  $S1$  передается по каналу «Блок». Команда пуска от защиты  $S2$  к выключателю  $K_2$  передается по каналу «Пуск». Команда пуска от защиты  $S3$  к выключателю  $K_1$  передается по каналу «Пуск». Команда блокировки от защиты  $S3$  к защите  $S2$  передается по каналу «Блок».

кировки вышестоящей защиты должна автоматически сниматься при отказе выключения нижестоящей защиты.

Недостатком подобного решения является отсутствие резервирования КЗ на соседних линиях.

Для согласования работы защит отдельных участков при малых токах КЗ, соизмеряемых с током пуска  $I_p$ , необходимо не допустить случая, чтобы при КЗ на нижестоящем участке запустилась только защита вышестоящего участка, что приведет к неселективному отключению. Для этого каждая нижестоящая защита должна иметь несколько меньшую уставку по току по сравнению с соседней вышестоящей.

Подобное решение может быть применено и для отдельных ступеней МТЗ с независимой выдержки времени.

### 4.3. Токовые защиты на основе измерения симметричных составляющих

#### 4.3.1. Общие положения

Основное преимущество использования симметричных составляющих токов и напряжений заключается в возможности повышения чувствительности и селективности РЗ при выявлении несимметричных повреждений в ЭС. Указанное обусловлено тем, что в нормальном режиме ЭС векторы тока и напряжения практически симметричны, т.е. образуют систему прямой последовательности. Незначительная несимметричность системы векторов (неодинаковость амплитуды и сдвиг углов, отличающийся от  $120^\circ$ ) вызвана отклонениями характеристик элементов ЭС и измерительных трансформаторов в отдельных фазах.

При несимметричных КЗ симметрия фазных величин отсутствует, т.е. возникают составляющие обратной и нулевой последовательностей. Отметим, что составляющие нулевой последовательности возникают в соответствии с выражением (2.25а) только в случае, если система неуравновешенная, т.е. геометрическая сумма токов фаз не равна нулю. Такие условия имеют место при КЗ, связанных с землей. Например при двухфазном КЗ между фазами А и В имеем  $I_A = -I_B$ ,  $I_C = 0$ ,  $I_0 = 0$ , т.е. нулевой последовательности не возникает.

С учетом изложенного, защиты, реагирующие на симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей, не

нуждаются в отстройке уставок от максимальных значений фазных токов в нормальном режиме, что делает их значительно чувствительнее к несимметричным повреждениям в ЭС.

### 4.3.2. Токовая защита обратной последовательности

Так же как и МТЗ, токовая защита обратной последовательности может выполняться со ступенчатой или с зависимой от тока выдержкой времени, т.е. имеет характеристики, приведенные на рис. 4.8,б,г.

На рис. 4.17,а приведен вариант реализации защиты на основе трех ступеней, две из которых имеют независимые от тока  $I_2$  выдержки времени  $TI_2 >$  и  $TI_2 \gg$  (блоки 9 и 10).

Характеристики ступени с зависимой от тока  $I_2$  выдержкой времени обеспечивает блок 8. Текущие вычисляемые цифровые

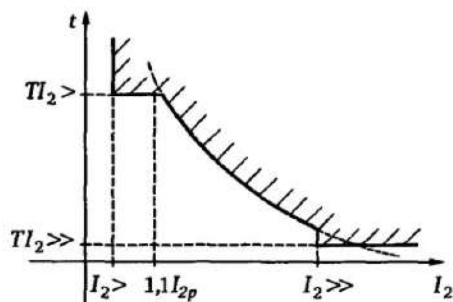
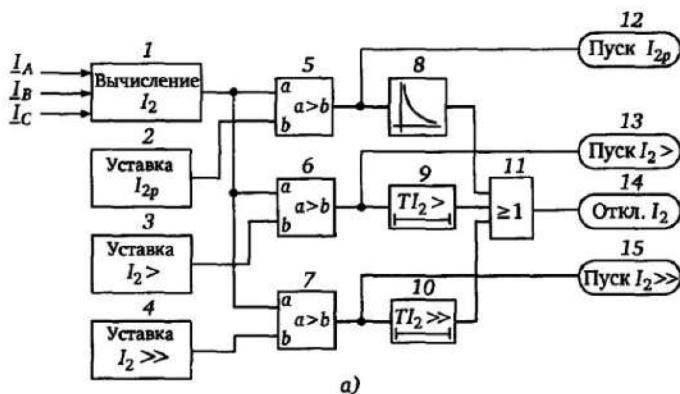


Рис. 4.17. Токовая защита обратной последовательности: а — структура; б — комбинированная характеристика

значения  $I_2$  (блок 1) сравниваются с уставками по току отдельных ступеней (блоки 2—4 и компараторы 5—7), обеспечивая необходимые параметры результирующей комбинированной характеристики (рис. 4.17,б).

Вид зависимых от тока характеристик защиты по  $I_2$  определяется защищаемым объектом. Для защиты электрических машин от перегрева вследствие несимметрии токов используется, например, характеристика вида

$$t = \frac{K}{(I_2/I_{ном})^2}, \quad (4.10)$$

где  $K$  — фактор несимметрии, зависящий от параметров защищаемого объекта;  $I_2/I_{ном}$  — относительное значение тока обратной последовательности.

В этом случае характеристика защиты должна быть комбинированной по типу рис. 4.17,б, причем значение  $I_2 >$  должно соответствовать длительно допустимому току  $I_{2доп}$  несимметрии, при превышении которого запускается зависимая характеристика (4.10). При этом время возврата должно учитывать охлаждение машины и в простейшем случае определяется соотношением:

$$t_v = \frac{K}{(I_{2доп}/I_{ном})^2}, \quad (4.11)$$

где  $I_{2доп}$  — длительно допустимый ток обратной последовательности. Таким образом, возврат в исходное состояние происходит при условии  $I_2 < I_{доп}$  через время  $t_v$ . В практике нашли применение как стандартные характеристики IEC и ANSI/IEEE (аналогично п. 4.2.5), рис. 4.14), так и специальные характеристики.

**Защита обратной последовательности от обрыва фазы двигателя.** Исчезновение тока в одной из фаз, вызванное обрывом цепи питания двигателя, сгоранием плавкого предохранителя или неисправностью коммутационного аппарата, приводит к возникновению тока  $I_2$  вследствие существенной несимметрии токов. Однако значение  $I_2$  может быть достаточно малым, если мал ток нагрузки. Использование чувствительной уставки токовой защиты по  $I_2$  для таких случаев недопустимо вследствие воз-

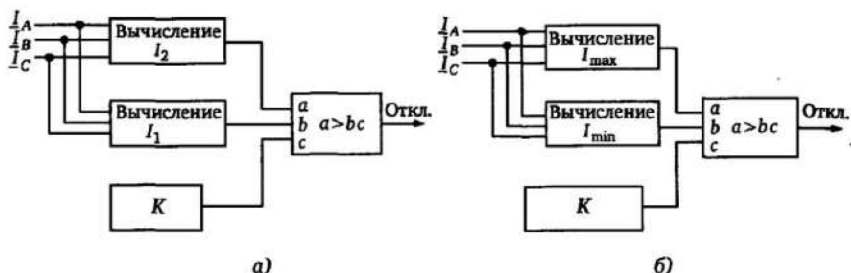


Рис. 4.18. Защита двигателя от обрыва фаз:  
 а — сравнение симметричных составляющих;  
 б — сравнение минимального и максимального тока фаз

возможных небалансов по току при максимальной нагрузке и при пуске двигателя. Поэтому обычная защита по  $I_2$  в данном случае нечувствительна при обрыве фазы в режимах малой нагрузки.

Эффективным является применение критерия отношения токов обратной и прямой последовательностей  $K = I_2/I_1$  (рис. 4.18,а). Этот коэффициент зависит от соотношений между сопротивлениями обратной и нулевой последовательности и не зависит от тока нагрузки. Во избежание неправильного действия при КЗ и коммутациях фаз защита от обрыва фазы должна быть отстроена от этих режимов по времени срабатывания.

Другим возможным решением при осуществлении защиты от обрыва фазы является использование в качестве критерия соотношения между максимальным и минимальным значениями токов отдельных фаз  $K = I_{max}/I_{min}$  (рис. 4.18,б). Этот критерий характеризует возникшую при обрыве фазы несимметрию независимо от абсолютных значений протекающих токов.

#### 4.3.3. Токковая защита нулевой последовательности

Однофазные КЗ являются наиболее распространенным видом КЗ в ЭС. Так как утроенный ток нулевой последовательности равен сумме фазных токов, схема включения ТТ с нулевым проводом (см. рис. 4.1) является фильтром токов нулевой последовательности. Как и для токовых защит обратной последовательности, основным преимуществом использования защиты, реагирующей на ток нулевой последовательности, является возможность повышения чувствительности и снижение выдержки времени при однофазных КЗ вследствие отсутствия необходимой

отстройки от максимального тока нагрузки. В то же время необходимо отстраиваться от максимальных возможных токов небаланса, которые могут протекать в нулевом проводе в режимах как нагрузки, так и внешнего междуфазного КЗ. Техническая реализация ступени защиты нулевой последовательности не имеет существенных отличий от схемы МТЗ (см. рис. 4.10) с той разницей, что вместо фазных токов измеряется утроенный ток нулевой последовательности  $3I_0$ , протекающий в нулевом проводе.

Во многих случаях в кабельных сетях для упрощения схемы и повышения чувствительности используется кабельный трансформатор тока ТА (рис. 4.19), сердечник которого охватывает все жилы кабеля.

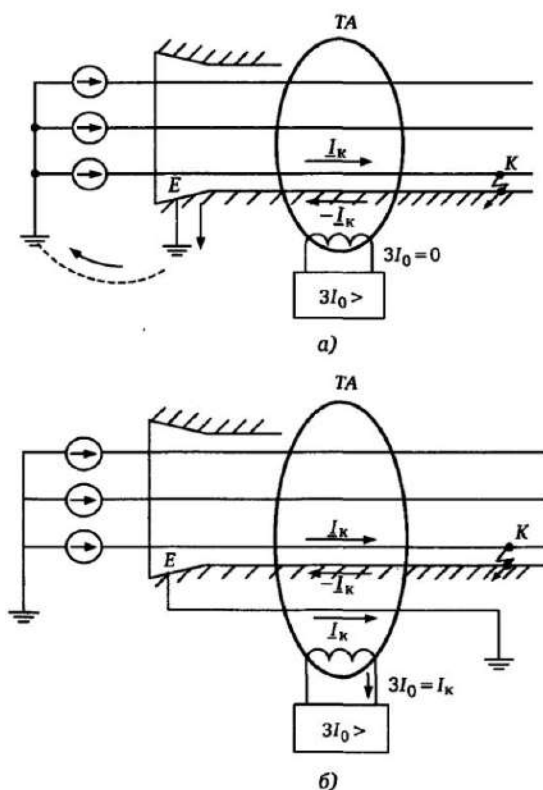


Рис. 4.19. Протекание токов при замыкании фазы кабеля с заземленной оболочкой: а — неправильное заземление; б — правильное заземление

Указанное обеспечивает суммирование магнитных потоков всех фаз и получение вторичного тока, пропорционального току нулевой последовательности.

Отметим, что для кабелей с жилами, заключенными в металлическую оболочку, наиболее вероятным является однофазное повреждение, связанное с замыканием жилы кабеля на оболочку. В этом случае заземление кабельной оболочки должно производиться таким образом, чтобы заземляющий провод также охватывался кабельным трансформатором (рис. 4.19,б). В противном случае при данном замыкании магнитные потоки от фазного тока и тока, протекающего по оболочке, взаимно компенсируются (рис. 4.19,а). Так же, как и МТЗ, реагирующая на фазные токи, токовая защита нулевой последовательности может быть выполнена как с зависимой (см. п. 4.2.5), так и с независимой выдержками времени с характеристиками срабатывания, описываемыми соотношениями (4.4), (4.5).

#### **4.4. Токовые защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с малым током замыкания на землю**

Однофазные замыкания на землю являются наиболее частым видом замыканий в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью (обычно сети с напряжением до 35 кВ).

Ввиду сохранения при замыкании на землю всех линейных напряжений, функционирование элементов сети в этом режиме почти всегда определенное время допускается. Однако необходимо выявление и отключение данного повреждения, прежде всего потому, что потенциал неповрежденных фаз относительно земли возрастает до линейного напряжения (рис. 4.20,б) и увеличивается вероятность пробоя изоляции этих фаз.

Протекание токов при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью (заземляющий элемент  $Z_q$  не подсоединен) иллюстрирует рис. 4.21.

На рис. 4.21 показана защищаемая линия с суммирующим трансформатором  $TA$  и защитой  $S$  в начале линии. Все остальные элементы сети, подключенные к шинам, замещаются другой линией.

При замыкании на землю  $K_1$  фазы  $A$  на защищаемой линии (рис. 4.21,а), потенциал фазы  $A$  как защищаемой линии, так и всех электрически связанных с ней элементов становится равен



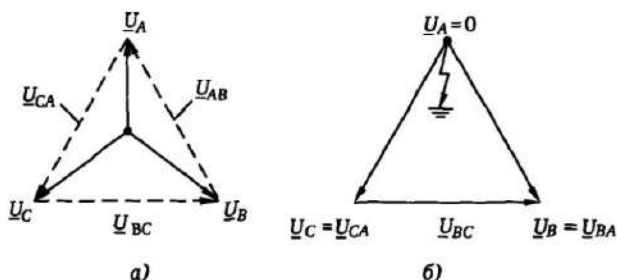


Рис. 4.20. Напряжения в сети с изолированной нейтралью: а — нормальный режим; б — замыкание фазы А на землю

нулю, а потенциалы «здоровых» фаз В и С увеличиваются до линейного напряжения (рис. 4.20, б). Каждая из фаз ЭС обладает определенной емкостью относительно земли ( $C_L$  — емкость защищаемой линии,  $C'_\Sigma$  — эквивалентная емкость остальных элементов).

С учетом этого, потенциал фаз шин В и С относительно земли соответственно равен:  $U_B = E_B - E_A = a^2 E_A - E_A$ ;  $U_C = E_C - E_A = a E_A - E_A$ .

Емкостные токи  $I'_{B\Sigma}$  и  $I'_{C\Sigma}$  от эквивалентных внешних элементов равны:

$$\underline{I}'_{B\Sigma} = j\omega_0 C'_\Sigma (a^2 - 1) \underline{E}_A, \quad \underline{I}'_{C\Sigma} = j\omega_0 C'_\Sigma (a - 1) \underline{E}_A \quad (4.12)$$

Результирующий емкостной ток  $I'_\Sigma = I'_{B\Sigma} + I'_{C\Sigma}$  подтекает к точке замыкания  $K_1$  на защищаемой линии.

Ток, вытекающий из точки  $K_1$  и протекающий через защищаемую линию, имеет противоположную току  $I'_\Sigma$  полярность (направление от линии к шинам на рис. 4.21, а). С учетом выражения (4.12) имеем

$$3\underline{I}_{0} = -\underline{I}'_{\Sigma} = (\underline{I}'_{B\Sigma} + \underline{I}'_{C\Sigma}) = 3j\omega_0 C'_\Sigma \underline{E}_A. \quad (4.13)$$

Емкостные токи  $I_{Bл}$  и  $I_{Cл}$ , подтекающие от фаз поврежденной линии к месту замыкания  $K_1$ , соответственно равны

$$\underline{I}_{Bл} = j\omega C_L (a^2 - 1) \underline{E}_A; \quad \underline{I}_{Cл} = j\omega C_L (a - 1) \underline{E}_A \quad (4.14)$$

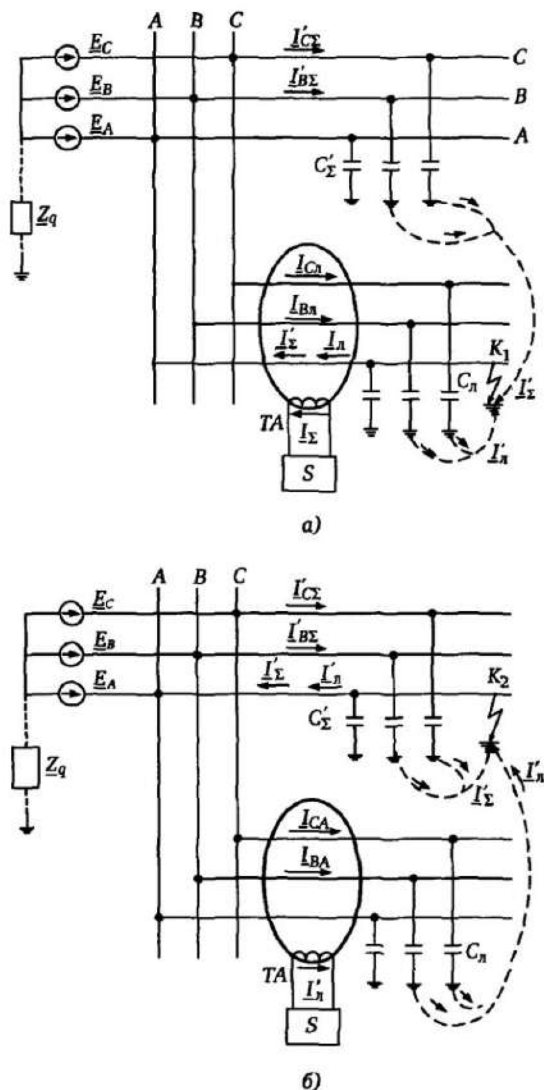


Рис. 4.21. Протекание токов при внутреннем (а) и внешнем (б) замыканиях на землю в цепи с изолированной нейтралью

а суммарный емкостной ток линии  $I'_л = I_{Bл} + I_{Cл}$  по знаку противоположен току  $I_{л'}$ , протекающему к шинам по поврежденной фазе А. С учетом этого, в суммирующем трансформаторе ТА емкостные токи поврежденной линии взаимно компенсируются (рис. 4.21,а), так как  $I_{Bл} + I_{Cл} + I_{л'} = 0$ . Таким образом, при по-

вреждении на защищаемой линии токовая защита нулевой последовательности, реагирующая на сумму токов отдельных фаз, измеряет сумму емкостных токов  $I'_2$  по выражению (4.13), создаваемых всеми внешними по отношению к защищаемой линии элементами ЭС. При замыкании на землю  $K_2$  на любом элементе ЭС вне рассматриваемой линии (рис. 4.21,б) через трансформатор ТА протекают только емкостные токи неповрежденных фаз линии. Утроенный ток нулевой последовательности, измеряемый защитой с учетом выражения (4.14) равен

$$3I_{0} = I_{Вл} + I_{Сл} = -3j\omega_0 C_{л} \underline{E}_A. \quad (4.15)$$

С учетом изложенного, селективную защиту от замыканий на землю можно выполнить, обеспечив отстройку при внешних замыканиях от собственных емкостных токов линии по выражению (4.15). Однако необходимо вводить определенные коэффициенты запаса, учитывающие возможные броски емкостного тока при перемежающемся дуговым замыкании. Также необходима отстройка от небаланса по току  $3I_0$ , обусловленного неидеальностью суммирующего трансформатора, например несимметричности геометрического расположения отдельных жил кабеля. С другой стороны, результирующий емкостной ток от внешних элементов по выражению (4.13), измеряемый защитой при замыкании на защищаемой линии, должен быть с запасом достаточен для срабатывания защиты. Таким образом, селективность защиты, определяемая различием емкостных токов при внешних и внутренних замыканиях на землю, обеспечится лишь при условии, что эквивалентная суммарная емкость внешних элементов существенно больше емкости защищаемой линии. Техническая реализация защиты в этом случае не имеет принципиальных отличий от реализации ступени максимальной токовой защиты (рис. 4.10) с той разницей, что измеряется ток  $3I_0$ .

**Сеть с компенсацией емкостного тока.** В общем случае для уменьшения емкостных токов замыкания на землю нейтраль системы подсоединяется к земле через индуктивное сопротивление  $Z_q$ , компенсирующее емкостное сопротивление сети при КЗ на землю. Данная сеть называется *компенсированной*. Возможно замыкание нейтрали на землю через активное сопротивление с целью распознавания и быстрого отключения замыканий на землю.

Протекающие в этом случае токи показаны на рис. 4.22.

Так как потенциал нейтрали равен  $-\underline{E}_A$ , ток, протекающий через сопротивление  $Z_q$  при замыкании фазы  $A$  на землю, равен  $I_q = -\underline{E}_A/Z_q$ . С учетом выражения (4.13) для емкостного тока, получим суммарный ток замыкания на землю, подтекающий к точке  $K$ :

$$\underline{I}_{\Sigma q} = \underline{I}_q + \underline{I}_{\Sigma} = -\frac{\underline{E}_A}{Z_q} - 3j\omega_0 C_{\Sigma} \underline{E}_A. \quad (4.16)$$

В данном случае  $C_{\Sigma}$  — эквивалентная емкость всех элементов сети, включая и поврежденную линию. Если  $Z_q = j\omega_0 L_q$  — индуктивное сопротивление заземляющей катушки, то выражение (4.16) примет вид:

$$\underline{I}_{\Sigma q} = j\underline{E}_A \left( \frac{1}{\omega_0 L_q} - 3\omega_0 C_{\Sigma} \right).$$

Указанное означает, что при условии полной компенсации

$$\frac{1}{\omega_0 L_q} = 3\omega_0 C_{\Sigma} \quad (4.17)$$

ток в месте замыкания на землю равен нулю. Практически же, учитывая составляющие токов, обусловленные активными составляющими сопротивлений линий (кабелей) и заземляющей катушки, незначительный ток в месте замыкания на землю протекает.

При полной компенсации сети с учетом (4.16) справедливо соотношение

$$\frac{\underline{E}_A}{j\omega L_q} + 3j\omega_0 (C'_{\Sigma} + C_L) \underline{E}_A = 0, \quad (4.18)$$

где  $C'_{\Sigma}$  — эквивалентная емкость внешней сети;  $C_L$  — емкость защищаемой линии.

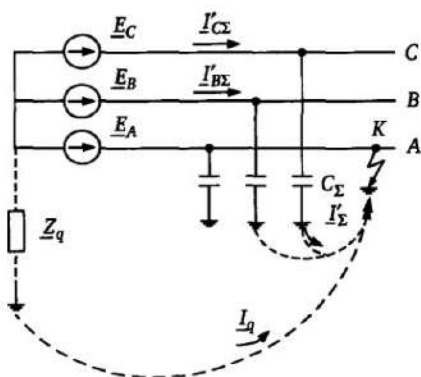


Рис. 4.22. Протекание токов в сети с сопротивлением в цепи нейтрали

Измеряемый защитой ток при КЗ на защищаемой линии при наличии компенсации в этом случае с учетом выражения (4.13) равен

$$3I_{L0} = 3j\omega_0 C'_\Sigma \underline{E}_A + \frac{\underline{E}_A}{j\omega_0 L_q}. \quad (4.19)$$

Преобразовав выражение (4.19), с учетом (4.18) получим, что измеряемый защитой ток при замыкании на землю в полностью компенсированной сети численно равен емкостному току защищаемой линии:

$$3I_{L0} = -3j\omega_0 C_L \underline{E}_A = \underline{I}_L. \quad (4.20)$$

В данном случае емкость внешней цепи уже не определяет, в отличие от выражения (4.13), измеряемый ток нулевой последовательности, который в этих условиях зависит только от емкости поврежденной линии. Таким образом, в компенсированной сети токовая защита, реагирующая только на ток нулевой последовательности, не может быть выполнена, так как при внешнем КЗ и КЗ на защищаемой линии значение тока одно и то же и равно емкостному току защищаемой линии.

Возможно, прежде всего для целей сигнализации, использовать при выявлении замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных сетях тот факт, что при КЗ на защищаемой линии защита измеряет суммарный ток всех оставшихся присоединений, в том числе и высшие гармонические составляющие в токе. Эти составляющие не компенсируются включением индуктивности в нейтраль трансформатора, вследствие чего их относительный уровень достаточно велик при замыканиях на землю на защищаемой линии.

#### 4.5. Защиты на основе контроля напряжения сети

В функции защит, связанных с измерением напряжения, входит выявление режимов, связанных как с понижением, так и с повышением напряжения.

Фиксация понижения напряжения необходима прежде всего в силу следующих причин:

- а) понижение напряжения ввиду возрастания нагрузки в ЭС.

В этом случае защита по напряжению с выдержкой времени может действовать на отключение части нагрузки с целью восстановления напряжения;

б) понижение напряжения при КЗ. В определенных случаях совместное использование фиксации превышения тока и снижения напряжения позволяет получить необходимую селективность защиты (см., например, комбинированные отсечки по току и напряжению [3]);

в) контроль исчезновения (отсутствия) напряжения для устройств автоматического повторного включения.

Фиксация повышения напряжения необходима для защиты элементов ЭС от перенапряжений, которые могут привести к их повреждению.

Измерение симметричных составляющих напряжения прямой последовательности имеет определенные преимущества при фиксации отключения элементов ЭС. Это обусловлено тем, что в зависимости от вида КЗ отдельные фазные или линейные напряжения могут снижаться до нуля, и поэтому исчезновение одного из напряжений не всегда соответствует отключению элемента.

Контроль составляющих напряжения обратной последовательности позволяет получить защиту от включения на трехфазное напряжение с обратным чередованием фаз, приводящее к повреждению вращающихся машин.

Измерение составляющих нулевой последовательности  $3U_0$  необходимо, прежде всего, в устройствах сигнализации при однофазных замыканиях на землю. В частности, при замыкании фазы А ( $\underline{U}_A = 0$ ) на землю с учетом рис. 4.20 при напряжении фазы  $U_\phi = |\underline{U}_A|$  имеем

$$|3\underline{U}_0| = |\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C| = |\underline{U}_{CA} + \underline{U}_{BA}| = |-3\underline{U}_A| = 3U_\phi. \quad (4.21)$$

Необходимо также учитывать возможность неправильного действия защит, контролирующих снижение напряжения при отключениях измерительного трансформатора напряжения и обрыве (неисправности) цепей напряжения, подводимых к защите.

В качестве примера на рис. 4.23,а приведена упрощенная схема двухступенчатой защиты минимального напряжения.

Контролироваться могут фазные и линейные напряжения (в

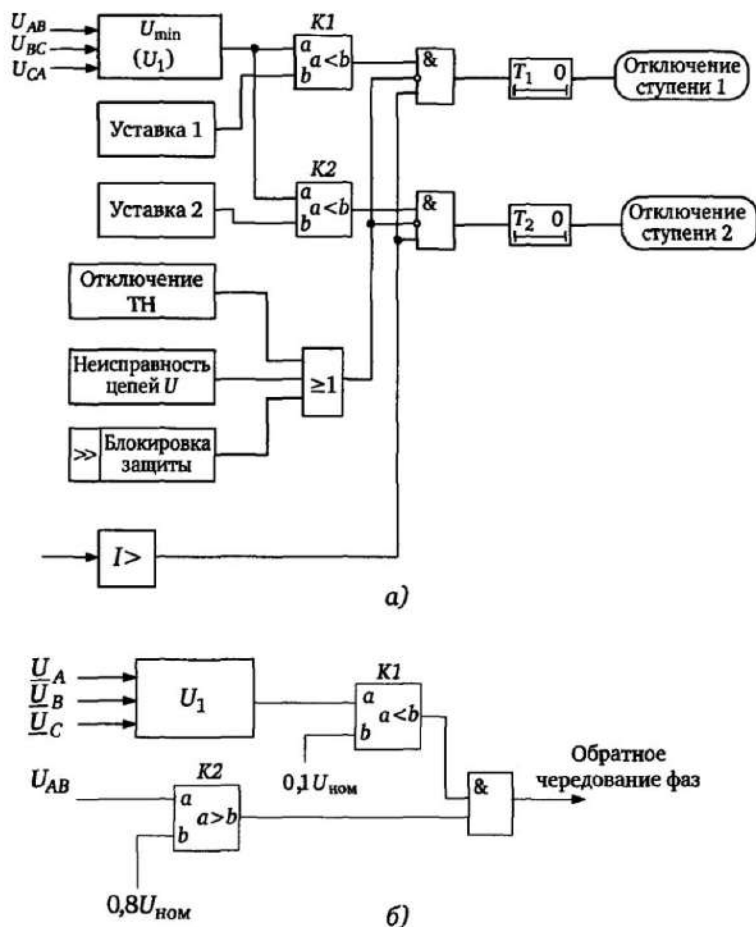


Рис. 4.23. Защита минимального напряжения (а)  
и выявление обратного чередования фаз (б)

этом случае выделяется наименьшее  $U_{\min}$  из напряжений) или напряжение прямой последовательности  $U_1$ . Компараторы  $K1$  и  $K2$  обеспечивают фиксацию уменьшения измеряемого параметра для каждой из ступеней срабатывания соответственно с выдержками времени  $T_1$  и  $T_2$ . Во избежание неправильных действий каждая ступень должна блокироваться при отключении автоматического выключателя в цепях измерительного трансформатора напряжения ТН или при срабатывании устройств контроля исправности цепей напряжения. В случае расположения измерительного трансформатора напряжения на линии необхо-

димо обеспечить возврат защиты минимального напряжения после отключения выключателя линии, когда напряжение на входе защиты становится равным нулю. Для этой цепи состояние выключения контролируется фиксацией протекания тока (блок  $I >$  на рис. 4.23). Значение уставки  $I >$  должно быть достаточно малым, обеспечивая действия защиты при всех возможных видах повреждений.

В защите от повышения напряжения для контроля обычно используется одно из линейных напряжений, так как повышение напряжения обычно происходит в симметричном режиме (может быть использовано напряжение прямой последовательности).

На рис. 4.23,б показан возможный вариант выполнения устройства контроля правильности чередования фаз в цепях напряжения с использованием измерения напряжения прямой последовательности  $U_1$  и одного из линейных напряжений ( $U_{AB}$ ) [28]. При этом компаратор  $K1$  фиксирует снижение напряжения прямой последовательности до определенного уровня, например, до  $0,1U_{ном}$ . Компаратор  $K2$  фиксирует отсутствие существенного снижения одного из линейных напряжений. Выполнение обоих условий означает существенное преобладание напряжения обратной последовательности при одновременном высоком уровне линейного, что соответствует обратному чередованию фаз системы напряжений.

*Контроль напряжения на противоположном конце протяженной линии.* При использовании защит, контролирующих напряжение на протяженных ВЛ, необходимо учитывать поперечную емкостную проводимость линии. Эта проводимость может обуславливать существенное повышение напряжения на противоположном конце малонагруженной линии или в режиме отключения ее противоположного конца. Схема замещения участка линии приведена на рис. 4.24,а.

Связь между напряжением в начале и в конце линии определяется соотношением

$$\underline{U}_b = \underline{U}_a - \left( I_a - \frac{j\omega C}{2} \underline{U}_a \right) (R + j\omega_0 L),$$

где  $R, L, C$  — эквивалентные параметры линии:  $I_a$  — ток в начале линии.



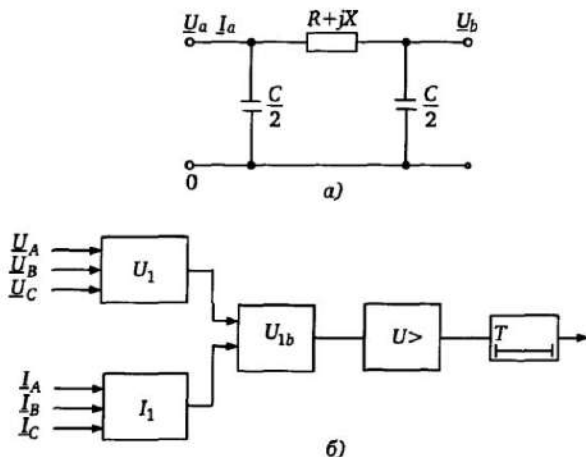


Рис. 4.24. Контроль максимального напряжения прямой последовательности на противоположном конце длинной линии:  
 а — схема замещения длинной линии; б — схема ступени защиты максимального напряжения

Приведенное выражение справедливо и для симметричных составляющих отдельных последовательностей. В частности, на рис. 4.24,б приведена структура контроля повышения напряжения на противоположном конце линии, на котором  $U_1, I_1$  — блоки выделения симметричных составляющих напряжения и тока в начале линии;  $U_{1b}$  — блок расчета напряжения прямой последовательности на противоположном конце линии;  $U >$  — элемент контроля превышения напряжением уставки;  $T$  — элемент задержки.

## 4.6. Направленные токовые защиты

### 4.6.1. Общие положения

Критерий увеличения тока при КЗ, положенный в основу максимальной токовой защиты (см. §4.2), не всегда позволяет решить проблемы обеспечения селективности и чувствительности РЗ. Если в радиальных сетях (см. рис. 4.8,а) эти проблемы в большинстве случаев решаются, то уже в простейших сетях с двусторонним питанием (рис. 4.25,а) обеспечить селективность путем использования только критерия превышения током заданных значений и замедления действия на различных участках становится невозможным.

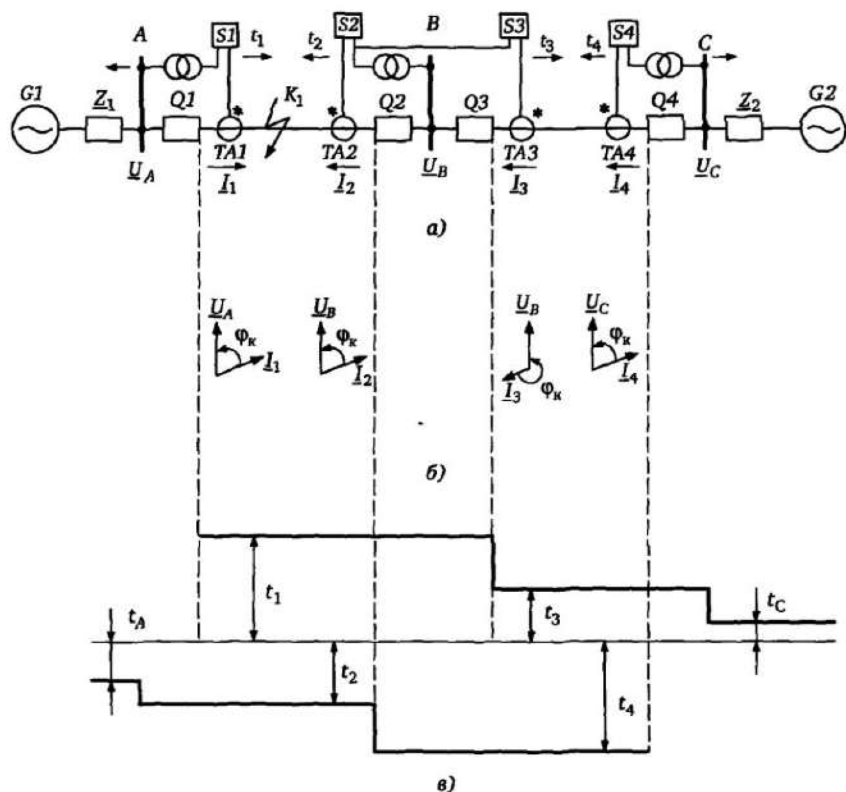


Рис. 4.25. Характеристики выдержки времени направленных токовых защит

Указанное обусловлено тем, что в сети с двусторонним питанием токи КЗ подтекают к месту повреждения с обоих концов защищаемого участка. Функционирование направленной токовой защиты поясняет рис. 4.25, где защиты  $S1$ — $S4$  установлены на каждом из двух концов участков линии с двусторонним питанием. Трансформаторы тока  $TA1$ — $TA4$  ориентированы одинаково относительно шин  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (начала «\*» их обмоток подключены к стороне линии). В качестве простейшего случая рассмотрим угловые соотношения  $\varphi_k$  между фазными токами и напряжениями при трехфазном КЗ на линии  $AB$  в точке  $K_1$  (рис. 4.25,б). Для защит  $S1$ ,  $S2$ ,  $S4$  угол  $\varphi_k$  определится параметрами  $R$  и  $X$  защищаемой линии  $\varphi_k = \arctg X/R$ , так как в этих защитах направление тока при КЗ  $K_1$  от шин в линию. К защи-

те  $S3$  подается ток с углом  $\varphi_k + \pi$  по отношению к напряжению (направление тока от линии к шинам).

Выполним защиты  $S1—S4$  таким образом, чтобы они срабатывали с установленной выдержкой времени  $t_1—t_4$  при превышении порогового значения тока и при направлении токов от шин в линию, т.е. в диапазоне углов  $\varphi$  между  $\underline{U}$  и  $\underline{I}$ , охватывающем угол  $\varphi_k$  и не охватывающем угол  $\varphi_k + \pi$ . Тогда при КЗ  $K_1$  запустятся защиты  $S1, S2, S4$  и первой сработает защита  $S2$ , имеющая меньшую выдержку времени  $t_2$  (рис. 4.25,в). После этого в исходное состояние вернется защита  $S4$ , ввиду того, что после отключения выключателя  $Q2$  токи  $I_2, I_3, I_4$  прекратятся. Защита  $S1$  остается запущенной, и по истечении выдержки времени  $t_1$  ею отключится выключатель  $Q1$ . Отметим, что, если бы свойства направленности у защит не было, то одновременно с другими защитами запустилась бы и защита  $S3$  соседней линии, и произошло бы неселективное отключение выключателя  $Q3$  через время  $t_3$ .

При КЗ на другой линии  $BC$  изменяются по сравнению с рис. 4.25,а направления токов  $I_2$  и  $I_3$ . Теперь блокируется защита  $S2$  и срабатывает защита  $S3$  с меньшей выдержкой времени  $t_3$ , отключая выключатель  $Q3$ . После этого защита  $S1$  возвращается в исходное состояние, а защита  $S4$  срабатывает с выдержкой времени  $t_4$ , отключая выключатель  $Q4$ . Подобным образом функционируют направленные токовые защиты и при КЗ в кольцевых сетях.

Направленные защиты, так же как и ненаправленные, выполняются многоступенчатыми для обеспечения резервирования при отказе защит или выключателей смежных линий. Выдержки времени защит выбираются по встречно-ступенчатому принципу (рис. 4.25,в). Ток пуска защит должен быть отстроен от максимального рабочего тока линии с учетом возможного увеличения тока при включении двигательной нагрузки. Однако токи нагрузки, имеющие направление от линии к шинам, могут не учитываться, так как защита на это направление мощности не реагирует.

Аналогичным образом функционируют направленные многоступенчатые защиты обратной и нулевой последовательностей, реагирующие на угловые соотношения между симметричными составляющими тока  $I_0$  и напряжений  $\underline{U}_0$  нулевой последовательности. Их применение эффективно для защиты сетей с двусторонним (многосторонним) питанием от однофазных КЗ.

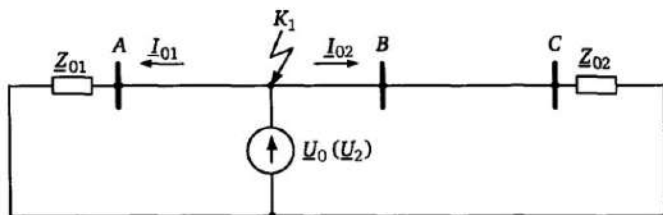


Рис. 4.26. Распределение токов нулевой последовательности

При этом следует иметь в виду, что токи нулевой и обратной последовательностей растекаются от места КЗ по направлению к шинам (источник  $\underline{U}_0$  ( $U_2$ ) находится в месте КЗ, рис. 4.26).

Отсюда следует, что органы выявления направления мощности нулевой или обратной последовательностей должны срабатывать в другом, сдвинутом на  $180^\circ$ , диапазоне углов между симметричными составляющими тока и напряжения по сравнению с органами, использующими фазные токи и напряжения.

#### 4.6.2. Структура токовой направленной защиты

Основное отличие в выполнении направленной токовой защиты от ненаправленной заключается в использовании направленного токового пуска отдельных ступеней вместо блоков 1—3 на рис. 4.10. На рис. 4.27,а приведен вариант выполнения направленного токового пуска.

В данном случае для обеспечения правильного действия реле направления мощности (блоки 4—6) при близких КЗ, сопровождающихся снижением напряжения поврежденной фазы до нуля, используются напряжения неповрежденных фаз (см. п. 2.4.4, табл. 2.1). Действие реле направления мощности разрешается при превышении током заданной уставки  $I >$  (блоки 1—3). В остальном принципиальных отличий от схемы рис. 4.10 не имеется.

Аналогично выполняется пуск направленной защиты нулевой последовательности (рис. 4.17,б). В зависимости от защищаемого объекта (воздушные или кабельные линии, сеть с заземленной или изолированной нейтралью) выбираются характеристики реле направления мощности (рис. 4.27,в). Характеристики реле направления мощности нулевой (обратной) последователь-

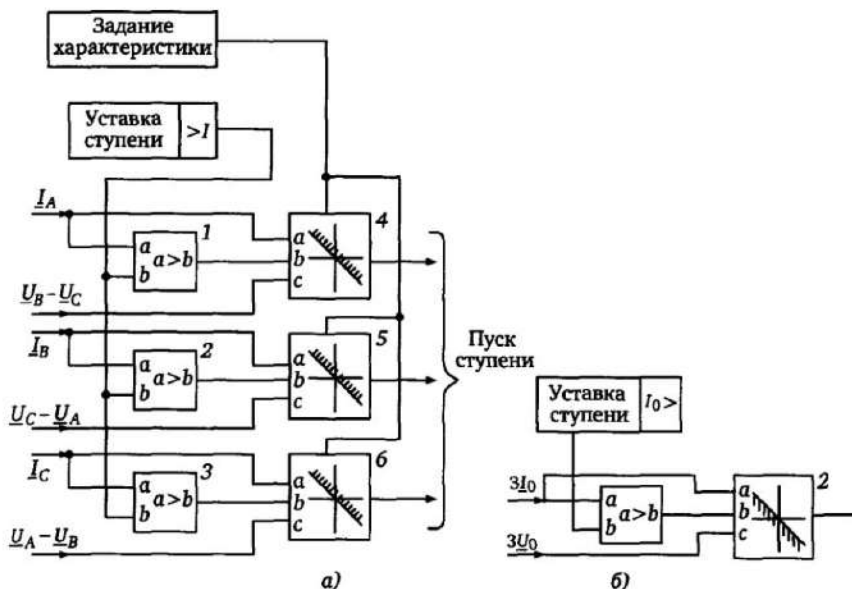


Рис. 4.27. Пуск ступеней в направленной токовой защите от междуфазных КЗ (а) и в направленной токовой защите нулевой последовательности (б), возможные виды характеристик направленной токовой защиты (в)

ности выбираются с учетом фазовых соотношений между токами и напряжениями нулевой (обратной) последовательности (рис. 4.26), практически сдвинутыми на  $180^\circ$  в сравнении с характеристиками для фазных величин.

Средства блокирования при броске намагничивающего тока силовых трансформаторов в необходимых случаях также должны использоваться аналогично ненаправленным защитам (см. п. 4.2.3, рис. 4.10).

Все вышеуказанное относится к защитам как со ступенчатой,

так и с зависимой от тока выдержкой времени. При этом могут быть использованы те же характеристики выдержки времени (например, рис. 4.14), что и для ненаправленных защит (см. п. 4.2.5).

#### 4.6.3. Чувствительная направленная токовая защита нулевой последовательности сетей с изолированной нейтралью

Как показано в §4.4, в сетях с изолированной нейтралью применение защиты от замыканий на землю, реагирующей на ток  $3I_0$ , возможно лишь при условии, что суммарная емкость сети значительно больше емкости поврежденной линии. В компенсированных сетях применение такой защиты вообще невозможно ввиду практической одинаковости тока  $3I_0$  при внешних КЗ и КЗ на защищаемой линии. Существенно повысить эффективность токовой защиты нулевой последовательности в этих случаях позволяет использование дополнительных критериев, таких как измерение направления мощности нулевой последовательности и реактивной (активной) мощности.

**Защита сетей с изолированной нейтралью.** Определим фазовые соотношения между током  $3I_0$  и напряжением  $3\underline{U}_0$  при КЗ  $K_1$  на защищаемой линии (см. рис. 4.21,а) и КЗ  $K_2$  на другой линии (рис. 4.21,б).

С учетом выражений (4.13) и (4.21) для случая КЗ на защищаемой линии имеем (рис. 4.28,а):

$$3I_0 = 3j\omega_0 C'_\Sigma \underline{E}_A = -j3\underline{U}_0 \omega_0 C'_\Sigma. \quad (4.22)$$

При КЗ на другой линии с учетом выражений (4.15) и (4.21)

$$3I_0 = j3\underline{U}_0 \omega_0 C_\Delta, \quad (4.23)$$

чему соответствует диаграмма на рис. 4.28,б. В первом случае ток  $3I_0$  отстает от напряжения  $3\underline{U}_0$  на  $90^\circ$ , а во втором опережает его на тот же угол.

В дальнейшем при описании характеристик реле направления мощности нулевой последовательности будем использовать систему координат, в которой вектор напряжения  $3\underline{U}_0$  всегда совпадает с осью абсцисс. Тогда активная составляющая  $3I_{0R}$  вектора тока  $3I_0 = 3I_{0R} + j3I_{0X}$  также совпадает с осью абсцисс,

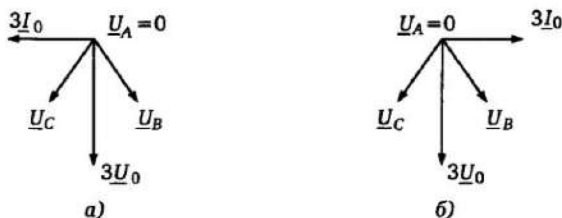


Рис. 4.28. Фазовые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности:  
 а — замыкание на защищаемой линии; б — замыкание на другой линии

реактивная составляющая  $3I_{0X}$  совпадает с осью ординат (рис. 4.29,а).

С учетом соотношений (4.22), (4.23) фиксацию замыканий на землю можно выполнять с помощью реле направления мощности с характеристикой рис. 4.29,а (область срабатывания заштрихована), описываемой соотношением:

$$\pi \leq \varphi = \arg \frac{3I_0}{3U_0} \leq 2\pi. \quad (4.24)$$

Чтобы несколько заглубить реле и отстроиться от возможных небалансов трансформаторов тока и помех в условиях отсутствия КЗ возможно измерение значения реактивной составляющей тока КЗ  $3I_{0X}$ . При этом фиксация КЗ в зоне произойдет, если вектор  $3I_0$  находится в пределах заштрихованной области, ограниченной прямой 1 (рис. 4.29,б). Таким образом фиксируется не только угол  $\varphi$  между векторами  $3I_0$  и  $3U_0$ , но и значение

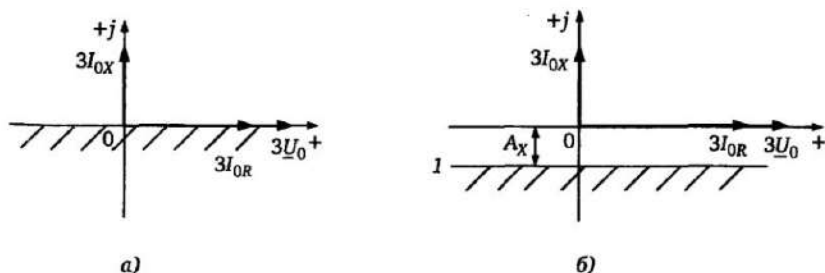


Рис. 4.29. Характеристики реле направления мощности (а) и реле активного тока (активной мощности) для сетей с изолированной нейтралью (б)

реактивной составляющей  $3I_{0x}$ , которое при  $\varphi = -90^\circ$  равно полному току  $3I_0$ . Характеристика 1 (рис. 4.29,б) соответствует следующему алгоритму срабатывания

$$3I_0 \sin\varphi < -A_x, \quad (4.25)$$

где  $A_x$  — уставка реле по току срабатывания.

Следует отметить, что условие (4.25) соответствует контролю значения и знака реактивной мощности нулевой последовательности  $Q = U_0 I_0 \sin\varphi$ , так как напряжение  $\underline{U}_0$  при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью в первом приближении постоянно.

**Компенсированная сеть.** В компенсированной сети, как показано в §4.4, селективное выявление замыкания на землю затруднительно из-за полной компенсации тока замыкания на землю. Однако практически полной компенсации не происходит ввиду наличия составляющей активного сопротивления  $R_q$  в полном сопротивлении дугогасящей катушки  $\underline{Z}_q = R_q + j\omega L_q$  и составляющей  $R'_\Sigma$  в полном сопротивлении  $\underline{Z}'_\Sigma$ , определяющем ток  $I'_\Sigma$  от другой линии (см. рис. 4.21). При замыкании на защищаемой линии (см. рис. 4.21,а) определяющим будет являться дополнительный фазовый сдвиг тока  $3I_0$ , определяемый активной составляющей тока в дугогасящей катушке.

Выражение (4.19) для измеряемого тока с учетом соотношений

$$C'_\Sigma = C_\Sigma - C_n; \quad \omega_0^2 L_q^2 \gg R_q^2$$

примет в этом случае вид

$$\begin{aligned} 3I_0 &= 3j\omega_0(C_\Sigma - C_n)\underline{E}_A + \frac{\underline{E}_A}{R_q + j\omega L_q} \approx \\ &\approx 3j\omega_0(C_\Sigma - C_n)\underline{E}_A + \frac{\underline{E}_A R_q}{\omega_0^2 L_q^2} - j \frac{\underline{E}_A}{\omega_0 L_q}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Так как сеть компенсирована и условие компенсации (4.17) выполняется, то выражение (4.26) упрощается

$$3I_0 = \frac{\underline{E}_A R_q}{\omega_0^2 L_q^2} - 3j\omega_0 C_n \underline{E}_A,$$



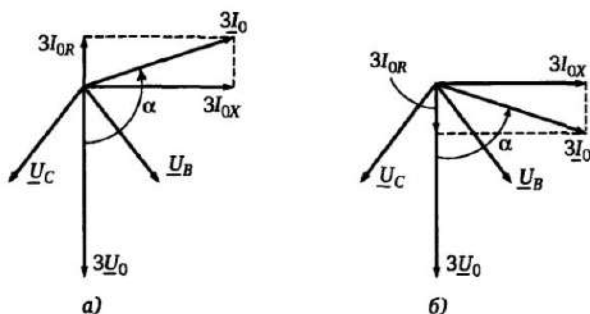


Рис. 4.30. Фазовые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности в сети с компенсированной нейтралью: а — замыкание на защищаемой линии; б — замыкание на другой линии

откуда, с учетом  $3\underline{U}_0 = -3\underline{E}_A$ , получим окончательно при замыкании на защищаемой линии

$$3\underline{I}_0 = -\frac{\underline{U}_0 R_q}{\omega_0^2 L_q^2} + 3j\omega_0 C_{л} \underline{U}_0 = 3\underline{I}_{OR} + j3\underline{I}_{OX}. \quad (4.27)$$

Соответствующая выражению (4.27) векторная диаграмма приведена на рис. 4.30,а.

В соответствии с выражением (4.27) и диаграммой на рис. 4.30,а вектор  $3\underline{I}_0$  опережает вектор  $3\underline{U}_0$  при замыкании на защищаемой линии на угол  $\alpha > 90^\circ$  ввиду наличия противоположной по знаку по отношению к  $3\underline{U}_0$  активной составляющей  $3\underline{I}_{OR}$ .

При внешнем замыкании на землю (замыкание на другой линии, характеризуется эквивалентной емкостью  $C'_\Sigma$  на рис. 4.21,б) учтем при определении тока  $3\underline{I}_0$  как емкость  $C'_\Sigma$ , так и эквивалентное активное сопротивление  $R'_\Sigma$ .

Суммарный ток нулевой последовательности от фаз В и С (рис. 4.21,б) с учетом выражений (4.12), (4.13) определится в этом случае соотношением

$$3\underline{I}_0 = \frac{(a^2 - 1)\underline{E}_A}{R'_\Sigma - jX'_{C\Sigma}} + \frac{(a - 1)\underline{E}_A}{R'_\Sigma - jX'_{C\Sigma}}, \quad (4.28)$$

где  $X'_{C\Sigma} = 1/(\omega_0 C'_\Sigma)$ .

Учитывая, что  $(X'_{C\Sigma})^2 \gg (R'_\Sigma)^2$  и  $3\underline{U}_0 = -3\underline{E}_A$ , из выражения (4.28) получим

$$3I_{\underline{0}} = -\frac{3E_A}{R'_\Sigma - jX'_{C\Sigma}} \approx \frac{3U_0 R_\Sigma}{(X'_{C\Sigma})^2} + j\frac{3U_0}{X'_{C\Sigma}} = 3I_{OR} + j3I_{OX}. \quad (4.29)$$

Векторная диаграмма, соответствующая выражению (4.29), приведена на рис. 4.30,б, из которого видно, что при внешнем замыкании на землю ток  $3I_{\underline{0}}$  опережает напряжение  $3\underline{U}_0$  на угол  $\alpha$ , меньший  $90^\circ$ , вследствие знака активной составляющей тока линии  $3I_{OR}$ , которая в данном случае совпадает по фазе с напряжением  $3\underline{U}_0$ .

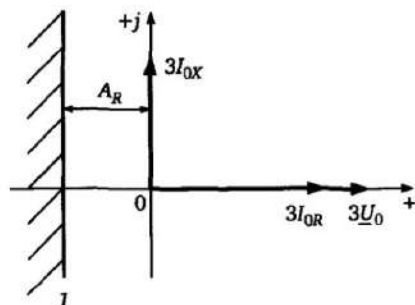


Рис. 4.31. Характеристика реле «активного тока» (активной мощности) для компенсированных сетей

Как видно из приведенных соотношений и диаграмм, отличие замыкания на землю на защищаемой ВЛ от внешнего замыкания заключается в различных знаках активной составляющей  $3I_{OR}$  тока  $3I_{\underline{0}}$  при проекции его на вектор  $3\underline{U}_0$ . С учетом этого, измерение знака и значения составляющей  $3I_{OR}$  («активного тока») позволяет выявить поврежденную линию при замыкании на землю в сети с компенсированной нейтралью.

При этом реагирование на определенное значение  $3I_{OR}$  активной составляющей тока  $3I_{\underline{0}}$  или, что эквивалентно, на активную мощность позволяет отстроиться от возможных небалансов по цепям тока при измерении  $3I_{\underline{0}}$ . Характеристика реле активного тока приведены на рис. 4.31.

Условие его срабатывания (заштрихованная область, ограниченная прямой 1) имеет вид:

$$3I_0 \cos\varphi < -A_R, \quad (4.30)$$

где  $A_R$  — уставка по активной составляющей тока  $3I_{\underline{0}}$ .

При использовании реле активной мощности выражение (4.30) преобразуется в форму

$$U_0 I_0 \cos\varphi < -P_0,$$

где  $P_0$  — уставка по активной мощности.

#### 4.6.4. Использование двустороннего измерения направления мощности

Во многих случаях, целесообразна фиксация направления мощности при КЗ не только в зоне действия, но и в противоположной области — зоне недействия. Наличие порога действия по току для реле направления мощности, реагирующего на полные величины (компараторы 1—3 на рис. 4.27,а) или на активную или реактивную составляющие тока дает возможность получить реле направления мощности двустороннего действия. При этом фиксируется три возможных состояния: КЗ в положительном направлении; КЗ в отрицательном направлении; отсутствие КЗ или условий для измерения направления мощности. Пример характеристики двустороннего реле направления мощности при использовании полных токов и напряжений приведен на рис. 4.32,а.

Примем  $\varphi_{м.ч}$  — угол максимальной чувствительности, равноудаленный от границ зоны действия в положительном направлении. Условия срабатывания, соответствующие характеристике в положительном направлении (рис. 4.32,а) с учетом общего выражения (2.26) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{м.ч} - \pi/2 \leq \varphi \leq \varphi_{м.ч} + \pi/2; \\ I \geq I_{уст}. \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

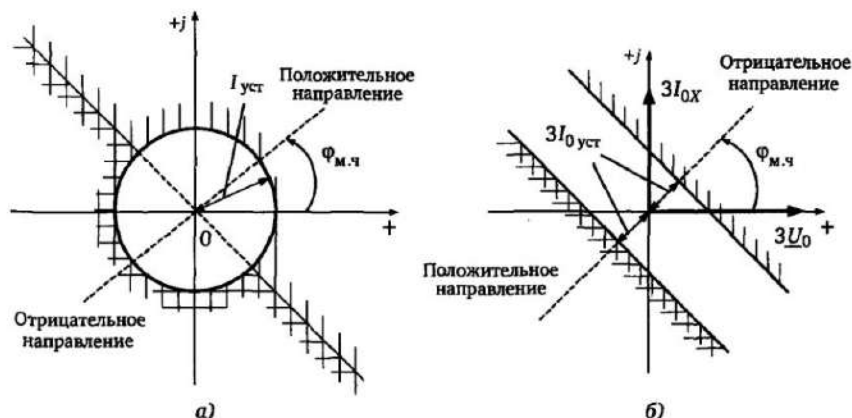


Рис. 4.32. Общий случай характеристик реле направления мощности двустороннего действия:

а — реагирование на полные токи; б — реагирование на составляющие нулевой последовательности

Для реле с характеристикой в отрицательном направлении:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{м.ч} + \pi/2 \leq \varphi \leq \varphi_{м.ч} + 3\pi/2; \\ I \geq I_{уст}. \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

Примем аналогичное определение угла максимальной чувствительности  $\varphi_{м.ч}$  для реле, реагирующих на активную и реактивную составляющие тока нулевой последовательности (активную и реактивную мощности) в сетях с малым током замыкания на землю. Характеристика общего вида, объединяющая реле активной и реактивной мощности (рис. 4.29,б и 4.31), приведена на рис. 4.32,б. Характеристика срабатывания описывается в общем случае условием

$$3I_0 \cos(\varphi - \varphi_{м.ч}) \geq 3I_{0уст}. \quad (4.34)$$

В частности для реле реактивного тока (рис. 4.29,б) имеем  $\varphi_{м.ч} = 3\pi/2$ , откуда из (4.34) получим

$$3I_0 \sin\varphi \leq -3I_{0уст},$$

что идентично выражению (4.25). Для реле активного тока (рис. 4.31) необходимо в (4.34) принять  $\varphi_{м.ч} = \pi$ , что приводит к выражению (4.30) при  $A_R = 3I_{0уст}$ .

Значение  $\varphi_{м.ч}$ , от которого зависит расположение характеристик на рис. 4.32, определяется в общем случае параметрами защищаемой сети и предъявляемыми к УРЗ требованиями.

**Принцип «обратного блокирования».** В качестве примера на рис. 4.33 показана возможность использования двустороннего измерения направления мощности для быстрого отключения коротких замыканий в сетях с двусторонним питанием [9].

На трех участках линии с выключателями Q1—Q6 установлены защиты S1—S6. Каждая из защит содержит ненаправленную токовую ступень  $I>$ , действующую с небольшой выдержкой времени на отключение соответствующего выключателя, а также органы выявления направления мощности. От шин подстанции В питаются потребители, подключенные через выключатели Q7, Q8 с ненаправленными токовыми защитами S7, S8. Защиты S1—S6 имеют реле направления мощности двустороннего действия, фиксирующие положительное (от шин в линию)

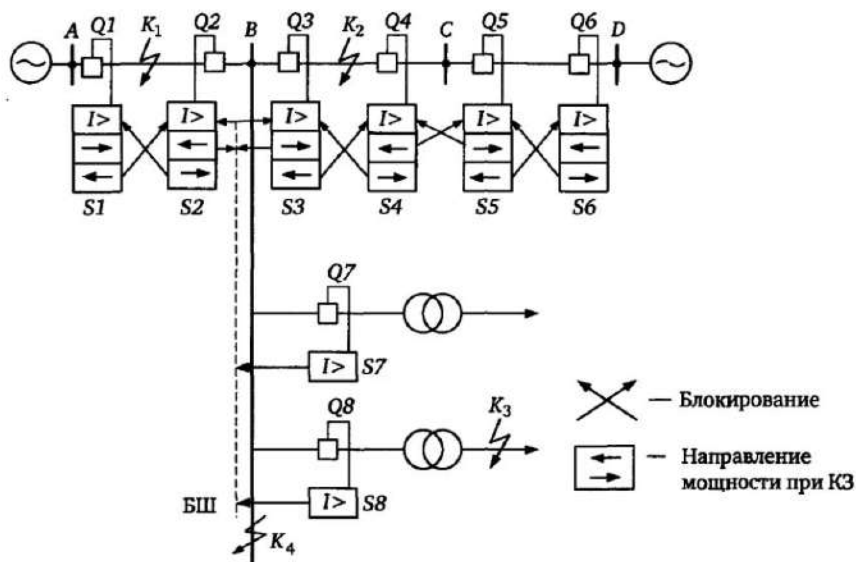


Рис. 4.33. Обеспечение селективности в сетях с двухсторонним (кольцевым) питанием на основе принципа «обратной блокировки»

или отрицательное направление мощности. Предполагается, что расстояние между местами установки смежных защит позволяет обеспечить обмен сигналами между ними. Защиты  $S1-S2$ ,  $S2-S3$ ,  $S3-S4$ ,  $S4-S5$ ,  $S5-S6$  обмениваются блокирующими сигналами. Для защит, установленных по концам линии ( $S1-S2$ ,  $S3-S4$ ,  $S5-S6$ ), каждый блокирующий сигнал генерируется при направлении мощности от линии к шинам (фиксация внешнего повреждения). Для смежных защит ( $S2-S3$ ,  $S4-S5$ ) блокирующий сигнал генерируется при направлении мощности от шин в линию (внутреннее КЗ). При этом для всех защит элементов, подсоединенных к шинам  $B$ , организована блокирующая шина БШ; обеспечивающая блокирование защит  $S2$ ,  $S3$  питающих присоединений при подаче на нее сигналов от реле направления мощности защит  $S2$  и  $S3$  (направление мощности в линию) или при действии защит  $S7$ ,  $S8$  присоединений потребителей.

Указанный обмен сигналами дает принципиальную возможность выполнения быстродействующей селективной защиты отдельных участков линий и сборных шин.

При КЗ  $K_1$  на участке  $AB$  каждая из защит  $S3-S6$  блокирова-

на предыдущей по номеру защитой, вследствие направления мощности от линий к шинам. При КЗ  $K_2$  на линии  $BC$  защита  $S1$  блокирована сигналом от  $S2$ , защита  $S2$  — сигналом от  $S3$  (через  $БШ$ ). По тем же условиям блокированы защиты  $S5$  и  $S6$  (соответственно сигналами от  $S4$  и  $S5$ ).

При КЗ  $K_3$  на отходящей линии защита  $S2$  блокирует  $S1$ ,  $S4$  блокирует  $S5$ , а  $S5$ — $S6$ . Защиты  $S2$  и  $S3$  блокируются сигналом от защиты  $S8$  через  $БШ$ , т.е. в этом случае срабатывает только защита  $S8$ .

При КЗ  $K_4$  на шинах  $B$  защиты  $S2$  и  $S3$  являются незаблокированными вследствие отсутствия запуска защит  $S7$ ,  $S8$  отходящих линий и отсутствия блокирующих сигналов от защит  $S1$  и  $S4$ . Указанное обеспечивает отключение питающих шины  $B$  линий. Остальные защиты  $S1$ ,  $S4$ ,  $S5$ ,  $S6$  являются заблокированными до отключения КЗ.

## Глава 5

### Защита от тепловой перегрузки

#### 5.1. Общие положения

Одним из основных физических факторов, приводящих к повреждению электрооборудования при коротких замыканиях и перегрузках, является повышение температуры защищаемого объекта вследствие роста тепловой энергии, выделяемой протекающим током. Рассмотренные в гл. 4 токовые защиты, как и другие виды защит, производят сравнительно быстрое отключение объекта при КЗ, обеспечивая при этом как защиту объекта от последствий длительного протекания тока, так и селективность отключения. При этом повышение температуры контролируется лишь косвенно по значению и длительности протекания тока и не учитывает температурные свойства объекта и температуру окружающей среды. В то же время температура отдельных элементов энергосистем, прежде всего обмоток двигателей, генераторов, трансформаторов, а также кабельных и воздушных

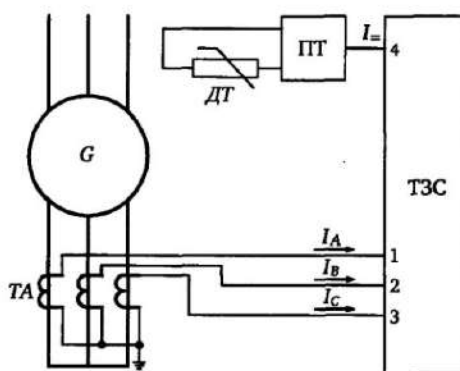


Рис. 5.1. Температурная защита статора (ТЗС) генератора:  
1—3 — входы измерения эффективных значений фазных токов; ДТ — датчик температуры; ПТ — преобразователь температуры с выходным сигналом постоянного тока  $I_{\Sigma}$ , линейно зависящим от температуры; 4 — вход измерения температуры

линий, может недопустимо возрастать и в режимах отсутствия КЗ, например вследствие возрастания тока нагрузки. Недостаточная чувствительность и точность РЗ в этом режиме также приводит к повреждениям защищаемых элементов. Одним из эффективных средств защиты объектов от тепловых перегрузок является температурная защита на основе тепловой модели объекта, что позволяет контролировать непосредственно температуру объекта и сравнительно просто учитывать процессы нагрева и охлаждения при изменяющемся токе. Важным показателем при этом является текущая абсолютная температура материала объекта, зависящая непосредственно и от температуры окружающей среды. Поэтому наиболее точные результаты могут быть получены при вводе в устройство защиты данных о внешней температуре. Эти данные могут быть получены от термодатчиков, установленных вблизи защищаемого объекта, которые фиксируют текущую температуру окружающей среды. В качестве примера на рис. 5.1 показаны сигналы, используемые в тепловой модели температурной защиты статора генератора [9].

## 5.2. Тепловая модель измерения температуры

Процесс нагревания и охлаждения инерционного (накапливающего тепло) элемента можно упрощенно отразить электрической моделью, изображенной на рис. 5.2.

В дальнейшем принимаются следующие обозначения:

$P$  — генерируемая тепловая мощность, кал/с;

$P_C$  — мощность, определяемая тепловой емкостью объекта;

$C_t$  — тепловая емкость контролируемого элемента, кал/град;

$t^o$  — текущая температура объекта;

$t_{окр}^o$  — температура окружающей среды;

$R_t$  — термическое сопротивление между объектом и окружающей средой, град·с/кал;

$P_R$  — тепловая мощность, выделяемая в сопротивлении  $R_t$ .

Закон, аналогичный закону Ома, связывает перепад температур на сопротивлении  $R_t$  с потоком мощности  $P_R$ :

$$P_R = \frac{t^o - t_{окр}^o}{R_t}. \quad (5.1)$$

При этом мощность  $P_C$ , определяемая тепловой емкостью объекта  $C_t$ ,



$$P_C = C_t \frac{dt^\circ}{dt}, \quad (5.2)$$

где  $t$  — текущее время.

С учетом схемы замещения на рис. 5.2 и соотношения  $P = P_C + P_R$  для генерируемой тепловой мощности получим основное уравнение нагрева:

$$P = C_t \frac{dt^\circ}{dt} + \frac{t^\circ - t^\circ_{\text{окр}}}{R_t}. \quad (5.3)$$

Обозначим:  $\Delta t^\circ_{\text{ном}} = t^\circ - t^\circ_{\text{окр}}$  — температурный перегрев объекта при номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$ ;  $t^\circ_{\text{ном}}$  — температура объекта при номинальном токе.

При этом справедливо соотношение

$$P_{\text{ном}} = \frac{\Delta t^\circ_{\text{ном}}}{R_t}. \quad (5.4)$$

С учетом (5.4) уравнение нагрева (5.3) можно представить в виде:

$$\frac{P}{P_{\text{ном}}} = R_t C_t \frac{d}{dt} \left( \frac{t^\circ}{\Delta t^\circ_{\text{ном}}} \right) + \frac{t^\circ - t^\circ_{\text{окр}}}{\Delta t^\circ_{\text{ном}}}. \quad (5.5)$$

Так как выделяемая мощность пропорциональна квадрату тока, то уравнение (5.5) можно записать в виде:

$$\frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} = R_t C_t \frac{d}{dt} \left( \frac{t^\circ}{\Delta t^\circ_{\text{ном}}} \right) + \frac{t^\circ - t^\circ_{\text{окр}}}{\Delta t^\circ_{\text{ном}}}. \quad (5.6)$$

Для упрощения введем относительные величины, приняв за базовые номинальный ток  $I_{\text{ном}}$ , перегрев  $\Delta t^\circ_{\text{ном}}$  объекта при номинальном токе и постоянную времени нагрева объекта  $\tau$ :

$$I_p = \frac{I}{I_{\text{ном}}}; \quad \tau = R_t C_t; \quad \theta = \frac{t^\circ - t^\circ_{\text{окр}}}{\Delta t^\circ_{\text{ном}}}. \quad (5.7)$$

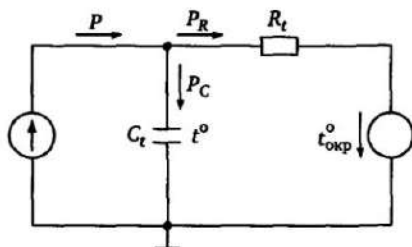


Рис. 5.2 Тепловая модель контролируемого объекта

Тогда уравнение нагрева примет вид

$$I_p^2 = \tau \frac{d\theta}{dt} + \theta. \quad (5.8)$$

Переходя с учетом обозначений (5.7) от относительных величин к абсолютным, из (5.8) имеем уравнение нагрева:

$$\frac{dt^o}{dt} + \frac{1}{\tau} t^o = \frac{1}{\tau} \left( \Delta t_{\text{ном}}^o \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} + t_{\text{окр}}^o \right). \quad (5.9)$$

Решением уравнения (5.8) является текущее значение относительной температуры  $\theta = \theta(t)$ :

$$\theta(t) = Ae^{-t/\tau} + B.$$

Обозначим относительную температуру объекта в момент начала отсчета ( $t = 0$ )  $\theta_{t=0} = \theta_0$  и относительную установившуюся температуру ( $t = \infty$ )  $\theta_{\text{уст}}$ . При этом в установившемся режиме (при  $d\theta/dt = 0$ )  $\theta_{\text{уст}} = I_p^2$ .

С учетом этого и обозначений (5.7) решение уравнения (5.8) имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_0 + (I_p^2 - \theta_0)(1 - e^{-t/\tau}). \quad (5.10)$$

Выражение (5.10) позволяет контролировать текущую температуру объекта при известных значениях начальной температуры, температуры окружающей среды и протекающего тока.

Пусть  $\theta_{\text{доп}}$  — относительная допустимая температура объекта. Приняв в выражении (5.10)  $\theta(t) = \theta_{\text{доп}}$ , получим время  $t_{\text{ср}}$ , за которое температура объекта возрастает до значения  $\theta_{\text{доп}}$ :

$$t_{\text{ср}} = \tau \ln \left( \frac{I_p^2 - \theta_0}{I_p^2 - \theta_{\text{доп}}} \right). \quad (5.11)$$

Переходя к абсолютным величинам с учетом принятых в (5.7) обозначений получим:

$$t_{\text{ср}} = \tau \ln \left( \frac{\Delta t_{\text{ном}}^o \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} - (t_0^o - t_{\text{окр}}^o)}{\Delta t_{\text{ном}}^o \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} - (t_{\text{доп}}^o - t_{\text{окр}}^o)} \right), \quad (5.12)$$

где  $t_0^{\circ}$  — температура в момент  $t = 0$ .

Таким образом, зная перегрев объекта при номинальном токе  $\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}$ , начальную температуру объекта  $t_0^{\circ}$ ; температуру окружающей среды  $t_{\text{окр}}^{\circ}$ , можно определить допустимое время отключения при токе  $I$ , исходя из возрастания температуры до значения  $t_{\text{доп}}^{\circ}$ .

При реализации цифровой защиты необходимо пользоваться не решением (5.11) при постоянном значении тока  $I_p$ , а общим численным решением дифференциального уравнения нагрева и охлаждения (5.8), описывающим любые изменения тока. Для малых отрезков времени  $\Delta t$  уравнение (5.8) примет вид

$$I_p^2 = \tau \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \theta = \tau \frac{\theta(t) - \theta(t - \Delta t)}{\Delta t} + \theta(t - \Delta t),$$

откуда получим

$$\theta(t) = \theta(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\tau} [I_p^2 - \theta(t - \Delta t)]. \quad (5.13)$$

Это уравнение является упрощенной тепловой моделью процесса нагрева, позволяющей вычислять текущую температуру  $\theta(t)$  на основе предшествующей температуры  $\theta(t - \Delta t)$ . При этом значение относительной температуры окружающей среды  $\theta_{\text{окр}}$  либо принимается известным, либо вводится непрерывно в программу с помощью преобразователя температуры ПТ, отслеживающего температуру окружающей среды (см. рис. 5.1).

Рассмотрим распространенный случай, когда по объекту предварительно длительно протекает ток  $I_{\text{пред}}$ , который в момент  $t = 0$  возрастает до значения  $I$ .

Отношение длительно допустимого перегрева  $t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ} = \Delta t_{\text{доп}}^{\circ}$  к перегреву при номинальном токе  $\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}$  пропорционально отношению квадратов токов  $I_{\text{доп}}$  и  $I_{\text{ном}}$ , т.е.

$$\frac{\Delta t_{\text{доп}}^{\circ}}{\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}} = \frac{t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ}}{\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}} = \frac{I_{\text{доп}}^2}{I_{\text{ном}}^2} = k^2, \quad (5.14)$$

где  $I_{\text{доп}}$  — ток, соответствующий допустимому перегреву объек-

та  $t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$ ;  $t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$  — температура окружающей среды, соответствующая  $I_{\text{доп}}$ .

Аналогичные соотношения справедливы для перегрева при предшествующем токе  $I_{\text{пред}}$ :

$$\frac{t_0^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}}{\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}} = \frac{I_{\text{пред}}^2}{I_{\text{ном}}^2}. \quad (5.14а)$$

Подстановка приведенных соотношений в выражение (5.12) дает тепловую характеристику защиты в рассматриваемом случае

$$t_{\text{ср}} = \tau \ln \left( \frac{\frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2} - \frac{I_{\text{пред}}^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2}}{I^2 \frac{(t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ}) + (t_{\text{окр}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ})}{\Delta t_{\text{ном}}^{\circ}}}} \right) =$$

$$= \tau \ln \left( \frac{\frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2} - \frac{I_{\text{пред}}^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2}}{\frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2} - \frac{t_{\text{окр}}^{\circ} - t_{\text{окр. доп}}^{\circ}}{k^2 \Delta t_{\text{ном}}^{\circ}} - 1} \right), \quad (5.15)$$

где  $k$  — отношение максимально допустимого тока  $I_{\text{доп}}$  (при окружающей температуре  $t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$ ) к номинальному току.

Отметим, что коэффициент  $k$  и соответствующий ему допустимый ток  $I_{\text{доп}}$  соответствуют лишь определенной окружающей температуре  $t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$ , т.е. в зависимости от окружающей температуры значение  $k$  в выражении (5.15) будет изменяться. В общем случае остается справедливым выражение (5.12). В случае, если температура окружающей среды  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  равна температуре  $t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$  при токе  $I_{\text{доп}}$ , выражение (5.15) упрощается:

$$t_{\text{ср}} = \tau \ln \left( \frac{\frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2} - \frac{I_{\text{пред}}^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2}}{\frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2} - 1} \right), \quad (5.16)$$

Выражение (5.16) получено из (5.12) с учетом (5.14) и (5.14а).

### 5.3. Элементы реализации цифровой тепловой защиты

На рис. 5.3 представлена структура тепловой защиты [9].

К блоку 1, осуществляющему решение дифференциального уравнения нагрева, подводится текущие цифровые действующие значения контролируемых фазных токов  $I_A, I_B, I_C$ . При этом для вычисления текущей температуры используется уравнение (5.9).

По аналогии с выражением (5.13) имеем решение для текущей температуры  $t^o(t)$ :

$$t^o(t) = t^o(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\tau} \left[ \Delta t_{\text{НОМ}}^o \frac{I^2}{I_{\text{НОМ}}^2} + t_{\text{ОКР}}^o - t^o(t - \Delta t) \right], \quad (5.17)$$

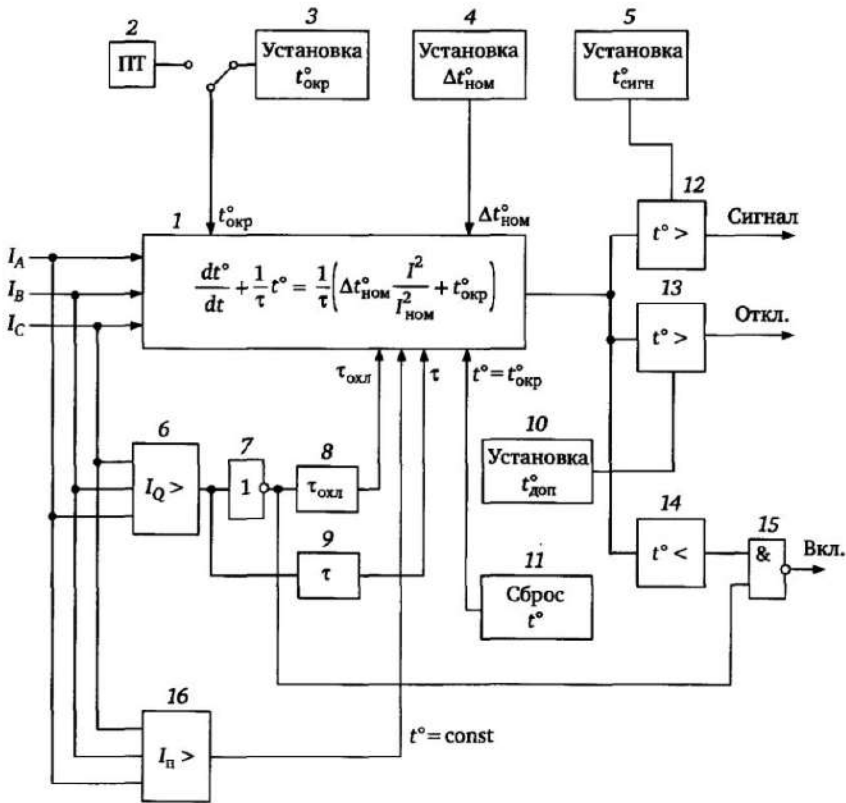


Рис. 5.3. Структура тепловой защиты

где  $\Delta t$  — интервал между соседними вычислениями (0, 1, ..., 10 с).

Обычно контролируются все фазные токи, т.е. решение уравнения (5.17) проводится для каждого тока отдельно. Указанное обусловлено тем, что данная защита может функционировать и в несимметричных режимах нагрузки и в режиме КЗ. Значение окружающей температуры  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  может вводиться от преобразователя температуры ПТ или жестко устанавливаться (блок 3). Возможен сброс текущей температуры  $t^{\circ}$  при тестовых испытаниях до температуры  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  (блок 11).

Отключение производится блоком 13, сравнивающим текущее значение температуры  $t^{\circ}$  с допустимым значением  $t_{\text{доп}}^{\circ}$ .

Для целей сигнализации возможно использование вместо  $t_{\text{доп}}^{\circ}$  температуры сигнализации  $t_{\text{сигн}}^{\circ} < t_{\text{доп}}^{\circ}$  (блок 12). Сигнализация производится при превышении текущей температурой значений  $t_{\text{сигн}}^{\circ}$  через время, определяемое выражением (5.12) при замене  $t_{\text{доп}}^{\circ}$  на  $t_{\text{сигн}}^{\circ}$ .

#### Учет различия постоянных времени нагрева и охлаждения.

Для вращающихся машин и объектов с искусственной вентиляцией постоянные времени нагрева и охлаждения зависят от режима работы объекта. Так, для двигателей охлаждение более эффективно во время работы, чем во время останова. Тепловая постоянная времени нагрева  $\tau$  численно равна времени, необходимому для достижения 63% перепада температуры  $\Delta t^{\circ}$ , вызванного изменением режима (рис. 5.4,а). Соотношения для постоянной времени охлаждения  $\tau_{\text{охл}}$  показаны на рис. 5.4,б.

Учет различия постоянных времени может быть осуществлен фиксацией режима объекта (включен или отключен) по состоянию вспомогательного контакта выключателя Q или по умень-

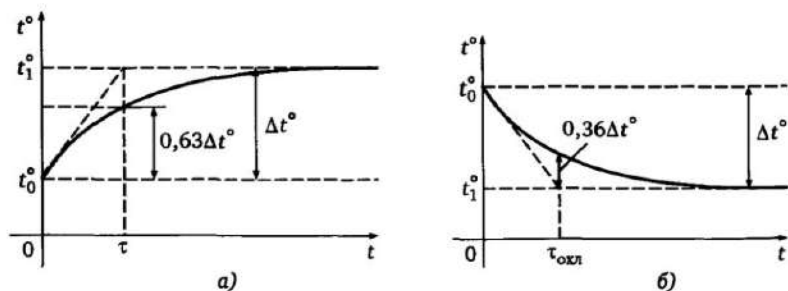


Рис. 5.4. Кривые нагрева (а) и охлаждения (б) объекта

шению тока в объекте ниже заданного уровня  $I_Q = (0,05+0,1)I_{ном}$  в блоке 6 (см. рис. 5.3). При снижении тока ниже значения  $I_Q$  значение  $\tau$  в рабочей модели изменяется на большее значение  $\tau_{охл}$ .

Блок 16 используется в специальных защитах электродвигателей и фиксирует пусковой режим (превышение тока пуска  $I_{п}$ ). На это время расчетная температура принимается постоянной.

**Упрощенный контроль повторного включения.** Отключенный тепловой защитой объект нет смысла сразу включать снова, так как он быстро снова отключится вследствие недостаточного охлаждения и повторного возрастания температуры. Поэтому целесообразно установить критерий охлаждения, при выполнении которого дается разрешение на повторное включение. В простейшем случае таким критерием является условие снижения текущей температуры до значения температуры включения

$$t_{вкл}^o \leq k_{охл} t_{доп}^o, \quad (5.18)$$

где  $k_{охл} = t_{вкл}^o / t_{доп}^o$  — коэффициент охлаждения, характеризующий допустимую температуру включения.

Время  $t_{вкл}^o$  через которое температура объекта спадает после отключения до значения  $t_{вкл}^o$ , определится из выражения (5.12) при  $I = 0$  и замене температуры  $t_0^o$  в начальный момент на температуру  $t_{доп}^o$  в момент отключения, а температуры  $t_{доп}^o$  на  $t_{вкл}^o = k_{охл} t_{доп}^o$ . В результате получим промежуток времени  $\Delta t_{вкл}$ , по истечении которого допустимо включение объекта

$$\Delta t_{вкл} = \tau_{охл} \ln \frac{t_{доп}^o - t_{окр}^o}{k_{охл} t_{доп}^o - t_{окр}^o}, \quad (5.19)$$

На рис. 5.3 контроль температуры включения обеспечивается блоком 14 ( $t_0^o <$ ), причем разрешение на включение происходит при фиксации отключенного состояния объекта (блоки 6, 7, 15).

**Сигнализация предположительного времени отключения.** Помимо текущей температуры тепловая модель может вычислить предположительное время  $\Delta t_{ср}$  до отключения объекта. Это время вычисляется также на основе выражения (5.12) при замене начальной температуры  $t_0^o$  на вычисляемое из уравнения (5.17) текущее значение  $t^o(t)$ . Вычисляемое время предположи-

тельного отключения  $\Delta t_{\text{ср}}$  непрерывно уменьшается, и в момент срабатывания имеем  $t^{\circ}(t) = t_{\text{доп}}^{\circ}$  и  $\Delta t_{\text{ср}} = 0$ .

Начало измерения в этом случае наступает при условии положительности знаменателя дроби в левой части выражения (5.12), т. е. при условии

$$\Delta t_{\text{ном}}^{\circ} \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} > t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}.$$

**Учет токов обратной последовательности.** Для электрических машин с роторной обмоткой составляющие обратной последовательности  $I_2$  в токе статора вызывают существенно большие потери энергии по сравнению с составляющими прямой последовательности. Эффект дополнительного разогрева объекта может быть учтен в тепловой модели в первом приближении увеличением расчетного фазного тока  $I$  до значения  $I_{\text{эк}}$ , соответствующего дополнительным тепловым потерям, вызываемым составляющей  $I_2$ :

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{I^2 + k_2^2 I_2^2}, \quad (5.20)$$

где  $k_2$  — коэффициент, учитывающий дополнительный разогрев от составляющей  $I_2$ .

Таким образом, в расчетную тепловую модель в этом случае вместо  $I$  вводится ток  $I_{\text{эк}}$ , зависящий от относительного значения симметричной составляющей  $I_2$ .

**Использование максимально допустимого тока  $I_{\text{max}}$  в тепловой модели.** Распространенным является случай, когда максимально допустимая температура объекта  $t_{\text{доп}}^{\circ}$  неизвестна, но известен максимально допустимый ток  $I_{\text{доп}} = k I_{\text{ном}}$ , при котором допускается длительная работа объекта. Значения тока и соответствующего коэффициента  $k$  задаются при фиксированной окружающей температуре  $t_{\text{окр. доп}}^{\circ}$ . Характеристики срабатывания в этом случае определяются выражениями (5.15) и (5.16). Уравнение тепловой модели в этом случае не содержит абсолютных значений температур и получится преобразованием уравнения

$$(5.17) \text{ путем введения переменной } \theta' = \frac{t^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}}{k^2 \Delta t_{\text{ном}}^{\circ}} = \frac{\theta}{k^2} :$$



$$\frac{d\theta'}{dt} + \frac{1}{\tau}\theta' = \frac{\Delta t}{\tau} \frac{I^2}{k^2 I_{\text{ном}}^2}. \quad (5.21)$$

Срабатывание тепловой защиты наступает при условии  $\theta' \geq 1$ , т. е. при  $t^0 - t_{\text{окр}}^0 \geq k^2 \Delta t_{\text{ном}}^0$ , что соответствует перегреву при максимально допустимом токе  $I_{\text{доп}}$ .

#### 5.4. Токовая защита и контроль числа включений электродвигателя

**Токовый контроль пуска двигателя.** Непосредственный контроль пуска двигателя может быть осуществлен путем измерения значения фазного тока и времени его протекания. При этом может быть выявлено и блокирование (останов ротора). Для контроля времени пуска используется обратнoзависимая квадратичная токовая характеристика срабатывания [9], отражающая потери энергии  $I^2 t$ ,

$$t = \left( \frac{I_{\text{п}}}{I} \right)^2 T_{\text{п}}, \quad (5.22)$$

где  $I_{\text{п}}$  — «номинальный» пусковой ток двигателя;  $T_{\text{п}}$  — допустимое время отключения при токе  $I_{\text{п}}$ ;  $I$  — измеряемый ток двигателя.

Структурно токовый контроль пуска двигателя поясняет рис. 5.5.

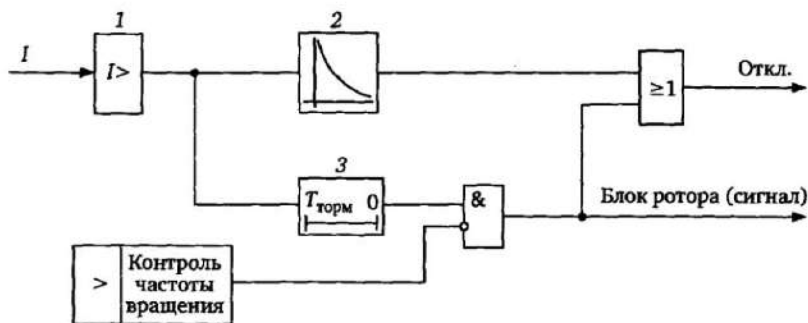


Рис. 5.5. Контроль времени пуска двигателя

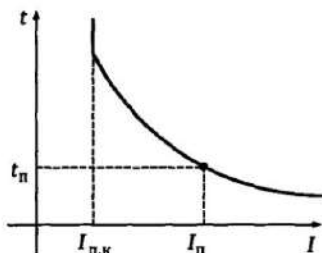


Рис. 5.6. Характеристика токового контроля пуска двигателя

Характеристика срабатывания приведена на рис. 5.6.

Возникновение режима пуска выявляется в блоке 1 (см. рис. 5.5) контроля значения тока  $I > I_{п.к}$ . При выборе значения тока контроля пуска  $I_{п.к}$  необходимо обеспечение двух требований:

- значение  $I_{п.к}$  должно быть меньше тока пуска двигателя с учетом различных возможных режи-

мов пуска;

- значение  $I_{п.к}$  должно быть отстроено от кратковременных повышений мощности двигателя в нормальном режиме работы.

Элемент 2 обеспечивает выдержку времени отключения в соответствии с характеристикой рис. 5.6. С помощью элемента задержки 3 с уставкой  $T_{\text{торм}}$  происходит отключение при блокировании (заклинивании) ротора. Пуск элемента выдержки времени 3 происходит также при превышении током значения  $I_{п.к}$ . Отключение происходит, если к моменту истечения выдержки времени  $T_{\text{торм}}$  имеется сигнал от датчика числа оборотов ротора о заклинении ротора.

**Предотвращение перегрева ротора при многократных пусках двигателя.** Выполнение тепловой (температурной) защиты двигателя может быть также основано на моделировании нагрева и охлаждения двигателя (см. § 5.2). Это позволяет достаточно точно контролировать его тепловое состояние с учетом различия постоянных времени нагрева и охлаждения в общем случае при непрерывно изменяющемся токе с учетом температуры окружающей среды.

Определенные особенности в выполнении защиты двигателя по сравнению с другими объектами ЭС вносит наличие ротора, имеющего значительно меньшую постоянную времени нагрева чем у статора. Поэтому, если в стационарных режимах нагрузки можно считать температуру всех частей двигателя примерно одинаковой и осуществлять ее контроль на основе тепловой модели (см. рис. 5.3), то в момент пуска двигателей во многих случаях необходим дополнительный контроль, учитывающий возможность перегрева ротора.

Прежде всего, это касается многократных пусков двигателя,

во время каждого из которых вследствие малой тепловой инерционности ротора происходит существенное увеличение его температуры. Быстрый рост температуры ротора при многократных пусках требует специальных мер по ограничению числа его пусков в течение определенного диапазона времени.

Диаграммы на рис. 5.7 поясняют процесс нагрева обмотки ротора при многократных пусках двигателя (случай трех пусков). Усредненная температура обмотки ротора приведена в относительных единицах в соответствии с выражением (5.7). С момента включения двигателя температура ротора  $\theta_p$  растет, отслеживая изменение тока двигателя в соответствии с уравнением тепловой модели (5.8) при постоянной времени нагрева  $\tau$ . При отключенном двигателе температура также изменяется в соответствии с уравнением (5.8), но при постоянной времени  $\theta_{охл}$ . Температура обмотки ротора в момент нагрева распределяется неравномерно [29] (температура наружных стержней может быть существенно выше температуры внутренних стержней). Поэтому для контроля усредненной температуры ротора необходима определенная пауза в процессе вычисления температуры  $\theta_p$  с минимальной длительностью  $T_{выр}$ , в процессе которой температура отдельных частей ротора выравниваются. В течение этой паузы расчет температуры не производится, и температура ротора принимается неизменной. Во время паузы  $T_{выр}$  запуск двига-

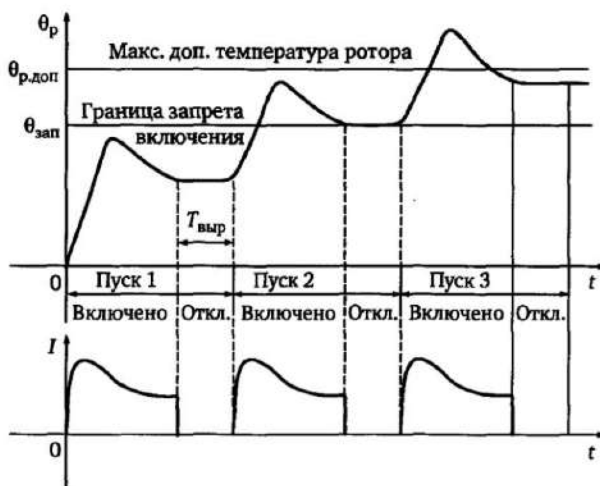


Рис. 5.7. Изменение температуры ротора при многократных включениях

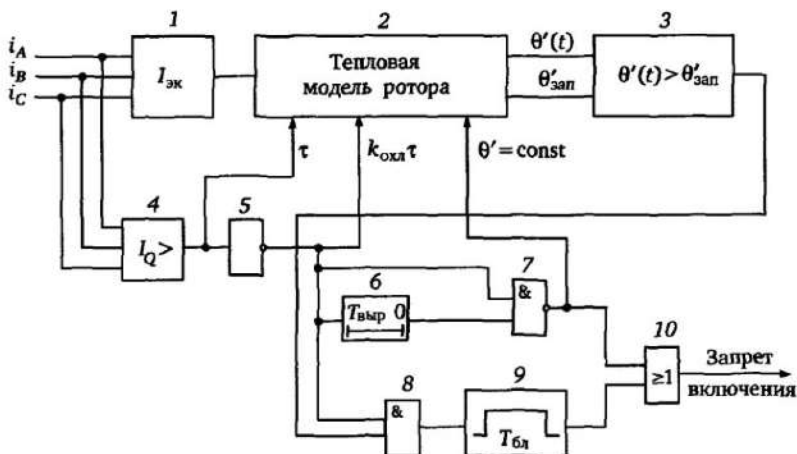


Рис. 5.8. Структурная схема блокирования сигнала включения двигателя [9]

тателя не допускается. Помимо указанного изготовителем двигателей дается минимальная длительность отключенного состояния (длительность блокирования сигнала включения  $T_{бл}$ ), в течение которой существует запрет включения двигателя.

Таким образом, для надежной эксплуатации двигателя необходима контрольная функция (блокирование повторного включения), следящая за температурой ротора, рассчитывающая не только температуру ротора, но и границу запрета включения  $\theta_{зап}$ . При достижении температурой значения  $\theta_{зап}$  запрещается следующий пуск двигателя, так как он приводит к перегреву ротора. Структура функции блокирования повторного включения приведена на рис. 5.8 [9].

В блоке 1 формируется эквивалентный ток  $I_{эк}$  для ввода в расчетную тепловую модель. Более близкое приближение к реальным условиям нагрева дает учет эффективных значений высших гармоник и дополнительного влияния токов обратной последовательности в соответствии с выражением (5.20). В зависимости от состояния двигателя (включен или отключен), контролируемого пороговым элементом  $I_Q >$  (блок 4), в расчетную тепловую модель (блок 2) вводятся значения  $\tau$  (постоянная нагрева) или  $\tau_{охла}$  (постоянная охлаждения). Тепловая модель рассчитывает текущую температуру ротора  $\theta(t)$  и границу запрета включения двигателя  $\theta_{зап}$  (см. ниже). Останов расчета текущей температуры для учета процесса выравнивания температуры в

роторе обеспечивается элементом задержки  $T_{\text{выр}}$ . Это происходит после снижения тока ниже значения  $I_Q$ , когда подаются сигнал остановки расчета ( $\theta' = \text{const}$ ) к тепловой модели и сигнал запрета включения двигателя через элементы 7 и 10. По истечении времени  $T_{\text{выр}}$  оба сигнала прекращаются. Сигнал запрета на включение возникает также при превышении расчетной температурой ротора границы запрета включения (блок 3). Этот сигнал существует промежуток времени, ограниченный временем запрета включения  $T_{\text{зап}}$  (блок 9).

**Расчетные параметры защиты ротора при многократных включениях.** Принципиальным вопросом при выполнении защиты ротора от перегрева является нахождение постоянной времени тепловой модели  $\tau_p$  и температурной границы запрета включения  $\theta_{\text{зап}}$  (см. рис. 5.7) на основе технических данных электродвигателя [9, 30].

Примем следующие обозначения:

$t_{\text{доп}}^{\circ}$  — допустимая температура перегрева ротора;

$t_{\text{зап}}^{\circ}$  — граница запрета включения двигателя вследствие ожидаемого перегрева ротора при новом включении;

$t_{\text{max}}^{\circ}$  — максимальная температура ротора, достигаемая при длительном протекании пускового тока;

$T_{\text{п}}$  — максимально допустимое время запуска двигателя;

$\tau_p$  — постоянная времени нагрева ротора;

$n_x$  — число допустимых следующих друг за другом пусков двигателя из «холодного» состояния;

$n_r$  — число допустимых следующих друг за другом пусков двигателя из «горячего» состояния (горячим состоянием является состояние длительного режима работы при номинальной нагрузке).

Если  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  — температура окружающей среды, то по аналогии с (5.21) рассмотрим в дальнейшем относительные значения температур  $\theta'$ :

$$\theta' = \frac{t^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}}{t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}}.$$

Характеристика нагрева имеет при этом вид, приведенный на рис. 5.9, и соответствует нескольким следующим друг за другом пускам двигателя из холодного состояния (в рассматриваемом примере  $n_x = 5$ ).

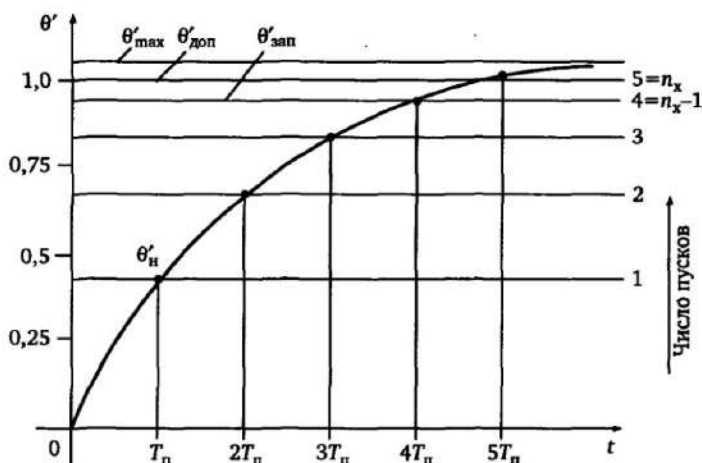


Рис. 5.9. Нагрев ротора при пяти последовательно следующих пусках

Относительные температуры  $\theta'$  на рис. 5.9 соответствуют приведенным выше абсолютным температурам  $t_{\text{доп}}^0$ ,  $t_{\text{зап}}^0$ ,  $t_{\text{макс}}^0$ .

При этом первый запуск разогревает ротор до значения  $\theta'_{\text{ном}}$ , соответствующего температуре ротора при длительном номинальном токе, а остальные четыре запуска производятся из «горячего» состояния. Таким образом, в данном случае  $n_x = 5$ ,  $n_r = 4$  ( $n_x - n_r = 1$ ).

Поэтому можно приравнять температуры, достигаемые при  $n_x$  «холодных» и  $n_r$  «горячих» запусках [30]. С учетом этого и экспоненциального характера нагрева по аналогии с выражением (5.10) получим конечную допустимую температуру при пуске из «холодного» состояния (относительная начальная температура  $\theta'_{t=0} = 0$ ):

$$\theta'_{\text{доп}} = \theta'_{\text{макс}} (1 - e^{-n_x T_n / \tau_p}). \quad (5.23)$$

При пуске из «горячего» состояния относительная начальная температура  $\theta'_{t=0} = \theta'_{\text{ном}}$  и изменение температуры определяется выражением

$$\theta'_{\text{доп}} = (\theta'_{\text{макс}} - \theta'_{\text{ном}}) (1 - e^{-n_x T_n / \tau_p}) + \theta'_{\text{ном}}. \quad (5.24)$$

Значения температур на рис. 5.9 и постоянной времени ро-

тора  $\tau_p$  обычно неизвестны. На основе известных параметров ( $I_{\text{ном}}$ ,  $I_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{п}}$ ,  $n_x$ ,  $n_r$ ) необходимо определить коэффициенты теплового уравнения нагрева (охлаждения) ротора для контроля его перегрева. Для этого используем следующие соотношения между пусковым  $I_{\text{п}}$  и номинальным  $I_{\text{ном}}$  токами и вызываемыми ими перегревами

$$\theta'_{\text{max}} = \frac{t_{\text{max}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}}{t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}} = \left( \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}} k_p} \right)^2, \quad (5.25)$$

где коэффициент  $k_p$  определяет изменение тока, соответствующее температуре перегрева ротора  $t_{\text{доп}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}$ .

Тогда перегрев ротора при длительной нагрузке (достижение «горячего» состояния) определится соотношением

$$\theta'_{\text{ном}} = \left( \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}} k_p} \right)^2 = \frac{1}{k_p^2}. \quad (5.26)$$

Учитывая, что  $\theta'_{\text{доп}} = 1$ , из уравнения (5.23) получим значение  $k_p$ , соответствующее нагреву ротора до допустимого значения перегрева:

$$\theta'_{\text{доп}} = 1 = \left( \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}} k_p} \right)^2 (1 - e^{-n_x T_{\text{п}} / \tau_p}),$$

откуда

$$k_p = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}} \sqrt{1 - e^{-n_x T_{\text{п}} / \tau_p}}. \quad (5.27)$$

В выражении (5.27) неизвестными являются  $\tau_p$  и  $k_p$ , которые находятся приравниванием температур, достигаемых запуском двигателя  $n_x$  раз из «холодного» и  $n_r$  раз из «горячего» состояний [30]. В результате с учетом соотношений (5.23) — (5.26) имеем

$$\theta'_{\text{доп}} = \left( \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}} k_p} \right)^2 (1 - e^{-n_x T_{\text{п}} / \tau_p}) = \left( \frac{I_{\text{п}}^2}{I_{\text{ном}}^2 k_p^2} - \frac{1}{k_p^2} \right) (1 - e^{-n_x T_{\text{п}} / \tau_p}) + \frac{1}{k_p^2}.$$

Совместное решение уравнений (5.27) и (5.28) дает следующие приближенные значения  $\tau_p$  и  $k_p$ :

$$\tau_p = (n_r - n_x) T_n \frac{I_n^2}{I_{ном}^2}; \quad (5.29)$$

$$k_p \approx \sqrt{\frac{n_x}{n_x - n_r}}. \quad (5.30)$$

Таким образом, для контроля текущей температуры ротора можно использовать решение дифференциального уравнения (5.21), где значения  $\tau = \tau_p$  и  $k = k_p$  определяются соотношениями (5.29), (5.30). При этом решение уравнения для текущей температуры  $\theta'(t)$  имеет вид

$$\theta'(t) = \theta'(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\tau_p} \left[ \frac{I^2}{k_p^2 I_{ном}^2} - \theta'(t - \Delta t) \right]. \quad (5.31)$$

Отметим, что значения параметров  $n_x$  и  $n_r$  должны соответствовать определенной температуре окружающей среды, при которой происходит эксплуатация двигателя. В зависимости от того, включен или отключен двигатель, применяются две различные постоянные  $\tau$  в решении уравнения (5.31):  $\tau_p$  — в режиме включенного двигателя и  $\tau_{охл} = k_{охл} \tau_p$  — режиме отключенного двигателя (см. рис. 5.8).

Значение температуры запрета повторного включения двигателя  $\theta'_{зап}$ , необходимое для блокирования включения двигателя, определяется на основе выражения (5.23), исходя из того, что запрет включения должен произойти перед последним пуском ( $n = n_x - 1$ )

$$\theta'_{зап} = \frac{I_n^2}{I_{ном}^2 k_p^2} \left[ 1 - e^{-(n_x - 1)/\tau_p} \right]. \quad (5.32)$$

Упрощенное выражение, применимое в практике, получится при замене экспоненты нагрева прямолинейной зависимостью.

В этом случае, учитывая, что  $\theta'_{доп} = 1$ , имеем



$$\theta'_{\text{зап}} \approx \theta'_{\text{доп}} \frac{n_x - 1}{n_x} = \frac{n_x - 1}{n_x}. \quad (5.33)$$

С учетом изложенного, сигнал запрета включения, возникающий сразу же после отключения двигателя, контролируемого блоком 4 (см. рис. 5.8), будет снят через время разрешения включения:

$$T_{\text{разр}} = T_{\text{выр}} - T_{\text{вкл}},$$

где  $T_{\text{выр}}$  — длительность остановки расчета температуры в тепловой модели для учета выравнивания температуры ротора;  $T_{\text{вкл}}$  — время снижения температуры ротора отключенного двигателя от имевшейся температуры в момент отключения  $\theta'_{\text{откл}}$  до значения  $\theta'_{\text{зап}}$ :

$$T_{\text{вкл}} = \tau_{\text{окл}} \ln \left( \frac{\theta'_{\text{откл}}}{\theta'_{\text{зап}}} \right).$$

## Глава 6

# Цифровые дифференциальные защиты

### 6.1. Дифференциальные защиты на основе непосредственного сравнения токов

Под дифференциальными защитами с непосредственным сравнением токов будем понимать защиты объектов (например, коротких линий, трансформаторов, генераторов, двигателей, реакторов), выполняемые на основе дифференциальной схемы соединения выходов трансформаторов токов на отдельных концах объекта.

На рис. 6.1 пояснен указанный принцип дифференциальной защиты отдельных элементов объектов ЭС, основанный на измерении дифференциального тока в измерительном элементе  $D$ .

Там же показаны направления токов при КЗ в защищаемой зоне  $K_1$ , охваченной измерительными трансформаторами тока  $TA1$ ,  $TA2$ . Ток  $I_d$ , протекающий в дифференциальной цепи, равен геометрической сумме токов в измерительных трансформаторах тока, установленных по концам объекта. Поэтому при КЗ внутри защищаемой зоны  $K_1$ , когда измеряемые токи  $I_1$ ,  $I_2$  незначительно различаются по фазе, —  $I_d$  достаточно большой ток, соизмеримый с суммой эффективных значений этих токов или равный этой сумме при совпадении токов по фазе. При КЗ вне зоны  $K_2$ , охватываемой дифференциальной защитой (внешнее КЗ), геометрическая сумма токов (рис. 6.1, в) в идеальном случае отсутствия погрешностей ТТ равна нулю (в соответствии с законом Кирхгофа вытекающий ток равен сумме втекающих токов). Такие же соотношения справедливы и для многоконцевых объектов (рис. 6.1, г и д).

Указанное различие дифференциальных токов при внешних и внутренних повреждениях лежит в основе дифференциальной защиты и позволяет выполнить релейную защиту объекта, имеющую абсолютную селективность (см. §1.6).

Можно выделить два основных фактора, связанных со свойствами силовых трансформаторов и измерительных трансфор-

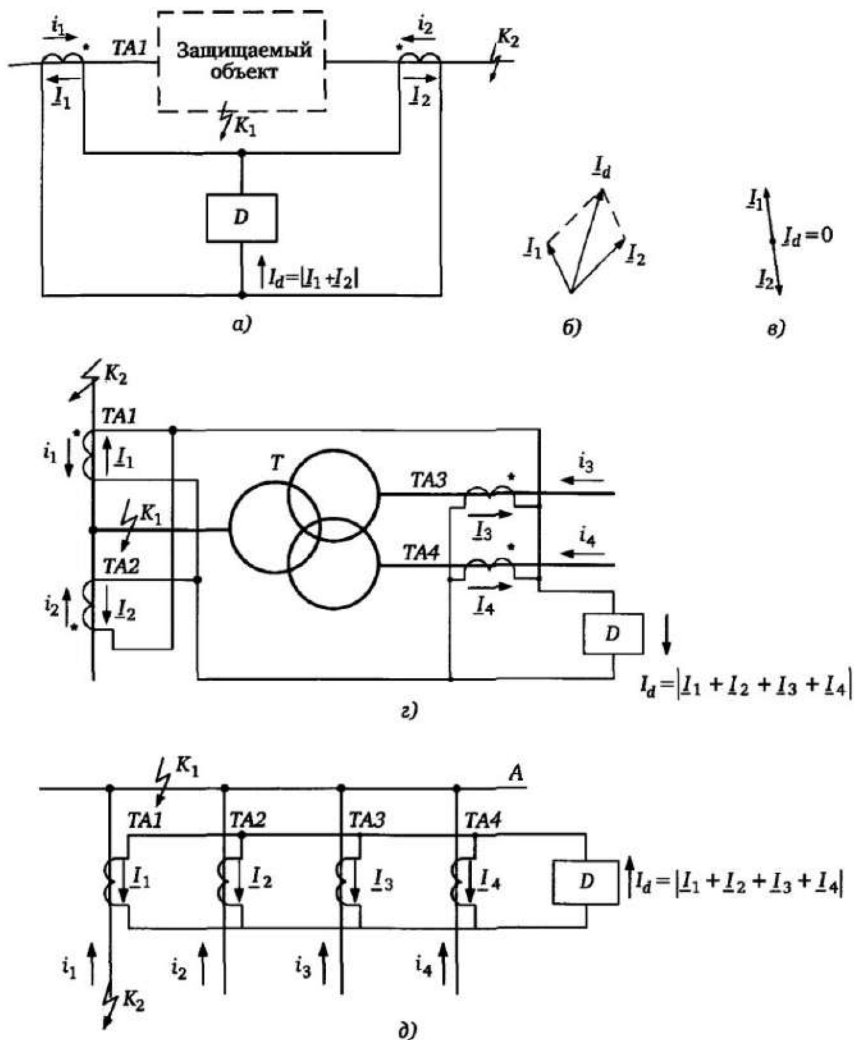


Рис. 6.1. Принцип действия дифференциальной защиты отдельных объектов: а — защита объекта с двумя группами трансформаторов тока; б, в — диаграммы токов при внутреннем КЗ  $K_1$  и внешнем  $K_2$ ; г — защита трехобмоточного трансформатора; д — защита сборных шин

маторов тока, препятствующих обеспечению необходимой селективности дифференциальной защиты при коммутациях и внешних повреждениях.

**Неидеальность измерительных трансформаторов тока.** Трансформаторы тока по концам объекта в идеальном случае

должны иметь коэффициенты передачи, обеспечивающие полный баланс (практическое отсутствие тока в дифференциальной цепи) в режиме нагрузки и при внешних повреждениях. В режиме нагрузки этот баланс может быть с достаточно большой точностью обеспечен выбором коэффициентов трансформации ТТ. В режимах внешних повреждений, сопровождающихся большими токами с возможным наличием апериодических составляющих во многих случаях происходит насыщение ТТ (см. §4.1). Трансформаторы тока по концам объекта в общем случае неодинаковы по типу и имеют различные характеристики. Поэтому насыщение ТТ при внешних КЗ может привести к возникновению существенного тока небаланса в дифференциальной цепи и, как следствие, без принятия специальных мер к неселективному действию защиты.

**Коммутации силовых трансформаторов.** При включении силовых трансформаторов и реакторов ток намагничивания существенно увеличивается вследствие нелинейного переходного процесса (см. §4.1). Этот ток (см. рис. 4.11,з) достаточно медленно затухает, что обусловлено достаточно большой постоянной времени первичной цепи силового трансформатора. Дифференциальная защита воспринимает этот эффект, возникающий при включении, как внутреннее КЗ, так как растет только ток в первичной цепи силового трансформатора и, следовательно, дифференциальный ток. Похожий эффект имеет место и при отключении КЗ на отходящих присоединениях (см. рис. 4.11,б).

Для обеспечения правильной работы дифференциальной защиты в рассмотренных режимах требуются специальные меры, обеспечивающие, прежде всего, предотвращение неселективного действия при внешних повреждениях и коммутациях, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока и возрастанием дифференциального тока.

## **6.2. Дифференциальные защиты с использованием торможения сравнимаемыми токами**

### **6.2.1. Принцип выполнения**

Рассматриваемый ниже наиболее распространенный в ЦРЗ принцип основан на том, что при внутренних КЗ дифференциальный ток  $I_d$  имеет достаточно большое значение в силу того, что суммарные токи незначительно различаются по фазе. Если

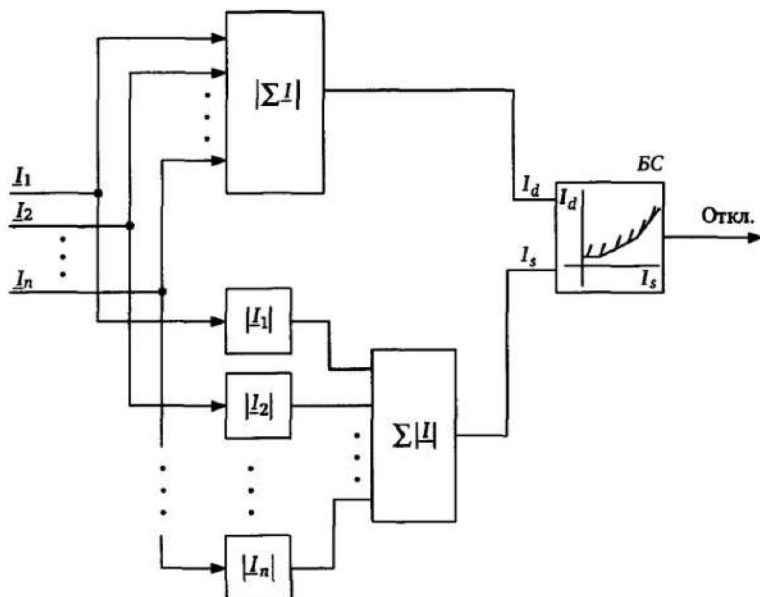


Рис. 6.2. Структура алгоритма торможения сравниваемыми токами

пропорционально загружать уставку срабатывания  $I_{dуст}$  с увеличением сравниваемых токов (торможение), то эта мера препятствует неселективному срабатыванию при внешних КЗ, которые могут произойти вследствие нарушения баланса токов из-за неодинакового насыщения трансформаторов тока. В то же время, этого загрубления не должно быть достаточно, чтобы препятствовать срабатыванию дифференциальной защиты при внутренних КЗ.

Функционирование данного алгоритма поясняется на рис. 6.2.

Из сравниваемых токов по концам объекта  $I_1 \dots I_n$  формируется дифференциальный ток  $I_d = \Sigma I$  с абсолютным значением  $I_d = |\Sigma I|$  и тормозной ток  $I_s$ , равный сумме абсолютных значений сравниваемых токов  $I_s = \Sigma |I|$ . В блоке сравнения *BC* производится сравнение дифференциального и тормозного токов.

В простейшем случае условие срабатывания (появление отключающего сигнала на выходе *BC*) при коэффициенте торможения  $k < 1$  описывается соотношениями

$$I_d \geq kI_s, \quad I_d \geq I_{dуст} \quad (6.1)$$

или для многоконцевого объекта

$$|I_1 + I_2 + \dots + I_n| \geq k(|I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|), \quad I_d \geq I_{d\text{уст}}, \quad (6.2)$$

где  $I_{d\text{уст}}$  — начальный порог срабатывания дифференциальной защиты.

Свойства защиты удобно анализировать, используя плоскость  $I_d, I_s$ . Условию (6.1) соответствует характеристика срабатывания 1 на рис. 6.3 (область срабатывания заштрихована).

С ростом токов КЗ растет значение тормозного тока  $I_s$  и соответственно значение тока  $I_d$ , при котором защита срабатывает (заштрихованная область срабатывания лежит выше характеристики 1). В качестве примера рассмотрим соотношение между  $I_d$  и  $I_s$  для двухконцевого объекта с токами внутреннего КЗ  $I_{к1} = 1$ ;  $I_{к2} = 2$  (относительные значения), совпадающими по фазе, и токами внешнего КЗ  $I'_{к1} = -I'_{к2} = 1,2$ , противоположными по фазе. В этом случае при КЗ в зоне

$$I_d = I_{к1} + I_{к2} = 3;$$

$$I_s = I_{к1} + I_{к2} = 3.$$

При внешнем КЗ

$$I_d = I'_{к1} - I'_{к2} = 0;$$

$$I_s = I'_{к1} + I'_{к2} = 1,2 + 1,2 = 2,4.$$

Рабочая точка *a* при внутреннем КЗ имеет координаты (3, 3) и лежит в области срабатывания на прямой 2 ( $I_d = I_s$ ) с углом наклона  $45^\circ$  (см. рис. 6.3).

Отметим, что при совпадении фаз токов при внутреннем КЗ рабочая точка всегда лежит на данной прямой, так как в этом случае справедливо соотношение

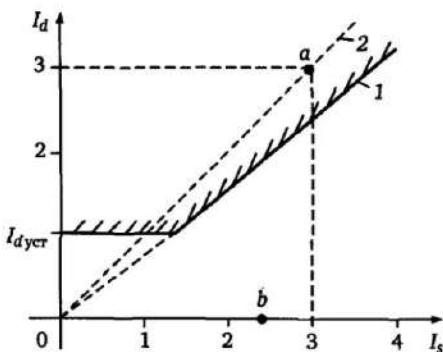


Рис. 6.3. Тормозная характеристика срабатывания дифференциальной защиты

$$I_d = |I_1 + I_2 + \dots + I_n| =$$

$$= I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_s.$$

При внешнем КЗ в идеальном случае  $I_d = 0$ , и рабочая

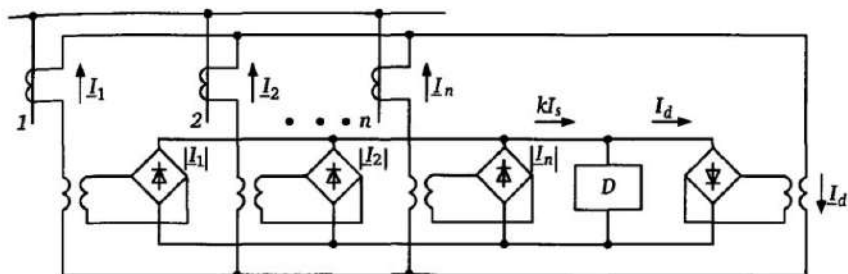


Рис. 6.4. Вариант реализации дифференциальной защиты с торможением

точка  $b$  с координатами  $(2,4; 0)$  лежит в области несрабатывания на оси абсцисс. Таким образом, характеристика срабатывания дифференциальной защиты с торможением (см. рис. 6.3) по алгоритму (6.1) для обеспечения надежного срабатывания всегда должна располагаться ниже прямой с наклоном  $45^\circ$  ( $k < 1$ ). Принцип реализации рассмотренного алгоритма показан упрощенно на рис. 6.4 [8], где измерительный элемент  $D$  фиксирует значение и знак протекающего тока.

В качестве тормозного тока  $I_s$  в структурной схеме алгоритма на рис. 6.2 может быть использован вариант выделения максимального из сравниваемых токов, т.е. в этом случае

$$I_s = \max(|I_1|, |I_2|, \dots, |I_n|). \quad (6.3)$$

Чувствительность дифференциальной защиты к внутренним КЗ и степень отстройки от внешних КЗ можно оценивать по расположению рабочих точек  $a$  и  $b$  относительно характеристики срабатывания  $I$  (см. рис. 6.3). Чем выше находится рабочая точка  $a$  по отношению к тормозной характеристике  $I$ , тем больше чувствительность к внутренним КЗ. При внешних КЗ рабочая точка  $b$  должна находиться по возможности ниже характеристики  $I$ . С учетом этого показателя чувствительности дифференциальной защиты можно улучшить путем изменения наклона тормозной характеристики в зависимости от диапазона нахождения тормозного тока (рис. 6.5).

Так, при малых токах насыщение ТТ отсутствует, и поэтому начальную часть характеристики  $I$  можно приподнять и выполнить параллельной оси абсцисс (наклон  $k_1 = 0$ ), так как устав-

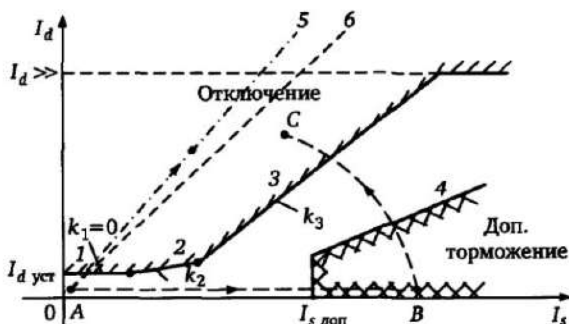


Рис. 6.5. Комбинированная тормозная характеристика дифференциальной защиты с областью дополнительного торможения

ка  $I_{d \text{ уст}}$  определяется лишь небалансом токов в нагрузочном режиме. Это повышает чувствительность защиты при малых токах КЗ. Участок 2 характеристики определяется токами КЗ при сравнительно небольшом насыщении ТТ и поэтому имеет небольшой наклон  $k_2$ . Участок 3 соответствует значительному насыщению ТТ при больших токах. Поэтому характеристика 3 имеет больший наклон  $k_3$ . Рассмотренная комбинированная характеристика обеспечивается заданием соответствующего уравнения срабатывания цифрового алгоритма защиты  $I_d = f(I_s)$ .

Следует отметить, что наличие тормозной характеристики без принятия дополнительных мер не всегда обеспечивает отстройку дифференциальной защиты от внешних КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением одного из трансформаторов тока. В этом случае вторичный ток этого ТТ близок к нулю, и рабочая точка по мере увеличения насыщения устремляется вверх (участок  $BC$  на рис. 6.5) вследствие возрастания дифференциального тока.

Одним из эффективных решений, препятствующих срабатыванию защиты в этом случае, является введение области дополнительного торможения (область ограничена характеристикой 4 на рис. 6.5 [9]). При этом используется свойство трансформаторов тока не насыщаться мгновенно даже при возникновении большого тока КЗ. Указанное означает, что трансформаторы тока должны быть выбраны так, чтобы в начальный промежуток времени (не менее нескольких миллисекунд) правильно передавать мгновенные значения тока. Поэтому при внешнем КЗ в начальные моменты времени дифференциальный ток достаточ-



но мал, и рабочая точка перемещается от точки  $A$  в нагрузочном режиме к точке  $B$ , находящейся вблизи оси абсцисс (см. рис. 6.5). Это состояние рабочей точки в начальный момент времени фиксируется областью дополнительного торможения, ограниченной характеристикой 4 (фиксация внешнего КЗ).

При попадании рабочей точки в эту область отключение блокируется на заданное время. Указанное обеспечивает предотвращение неправильного действия дифференциальной защиты при дальнейшем насыщении трансформаторов тока и движении вследствие этого рабочей точки от положения  $B$  к положению  $C$  в область срабатывания. Блокирование снимается, если зафиксировано, что рабочая точка переходит в область вблизи линии отключения (в область между линией КЗ 5 с углом наклона  $45^\circ$  и линией 6 возврата блокирования). Указанным снятием блокирования обеспечивается возможность отключения при внутреннем КЗ, возникшем непосредственно после внешнего КЗ и приведшем к дополнительному возрастанию дифференциального тока  $I_d$  (нахождению рабочей точки в области между прямыми 5 и 6).

Другим критерием торможения может быть наличие постоянной составляющей в дифференциальном токе при внешних КЗ. Указанное обуславливается различной степенью насыщения трансформаторов тока и, соответственно, различной степенью передачи аperiodической составляющей в первичном токе во вторичную цепь. Наличие определенного уровня постоянной составляющей в дифференциальном токе фиксируется с помощью цифровой обработки сигнала, после чего в соответствии с алгоритмом торможения происходит заграбление защиты.

**Блокирование при включении трансформаторов.** Включение силового трансформатора может сопровождаться большим током намагничивания, вызывающим насыщение трансформатора, и соответственно искажение формы тока подключаемой стороны (см. рис. 4.11). Указанное приводит, вследствие несоответствия первичного и вторичного токов трансформатора, к возрастанию дифференциального тока  $I_d$ . Использование цифровой обработки сигналов позволяет контролировать процентный состав отдельных гармонических составляющих в дифференциальном токе. Увеличение второй гармонической составляющей  $I_{2f}\% \geq I_{2уст}$  является эффективным критерием выявления броска намагничивающего тока и блокирования действия защи-

ты на отключение. Критерием для блокирования может служить также увеличение процентного содержания нечетных высших гармоник, например, третьей  $I_{3f}\%$ , или пятой  $I_{5f}\%$ , в дифференциальном токе, свидетельствующее о стационарном (симметричном) насыщении силового трансформатора.

Так как вычисление процентного состава гармонических составляющих в дифференциальном токе требует определенного времени, отключение от дифференциальной защиты должно быть (обычно на половину периода основной частоты) замедлено во избежание неселективного действия при внешних КЗ или включении под нагрузку до окончания вычислений.

Для того, чтобы ускорить отключение при внутренних КЗ, сопровождающихся большими токами, которых не может быть при включениях трансформатора или при внешних КЗ, вводится обычно грубая дифференциальная ступень  $I_d \gg$  (см. рис. 6.5), действующая при больших токах независимо от значений постоянной составляющей и высших гармонических в дифференциальном токе.

**Трехфазное выполнение дифференциальной защиты.** Дифференциальные защиты выполняются обычно пофазно, когда измерение происходит отдельно для каждой фазы. При использовании суммирующих трансформаторов возможно трехфазное выполнение дифференциальной защиты. Суммирующий трансформатор СТ имеет три первичные обмотки  $w_1, w_2, w_3$  с различными числами витков, подключаемые к трансформаторам тока различных фаз (один из возможных вариантов включения суммирующего трансформатора показан на рис. 6.6).

Указанное обеспечивает ток  $I_\Sigma$  во вторичной обмотке  $w_4$  при симметричных и любых видах несимметричных КЗ. Вторичные обмотки суммирующих трансформаторов по концам защищае-

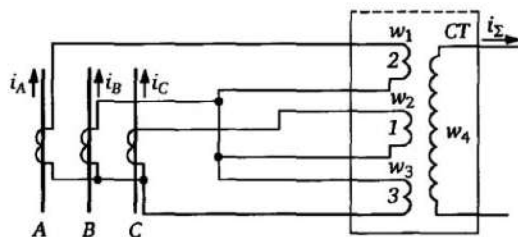


Рис. 6.6. Вариант включения суммирующего трансформатора

мого объекта включаются по дифференциальной схеме для формирования тока  $I_d$  аналогично схемам включения на рис. 6.1. Для варианта включения рис. 6.6 вектор тока  $I_\Sigma$  во вторичной обмотке суммирующего трансформатора  $CT$  определится с учетом соотношения между витками отдельных обмоток выражением

$$I_\Sigma = 2I_A + I_C + 3(I_A + I_B + I_C) = 5I_A + 3I_B + 4I_C.$$

### 6.2.2. Основные функциональные блоки дифференциальной защиты

Основные функциональные блоки варианта цифровой дифференциальной защиты показаны на рис. 6.7 (для одной фазы) [9].

В блоке 1 цифровой обработки сигналов (токов по концам защищаемого объекта) происходит формирование цифровых зна-

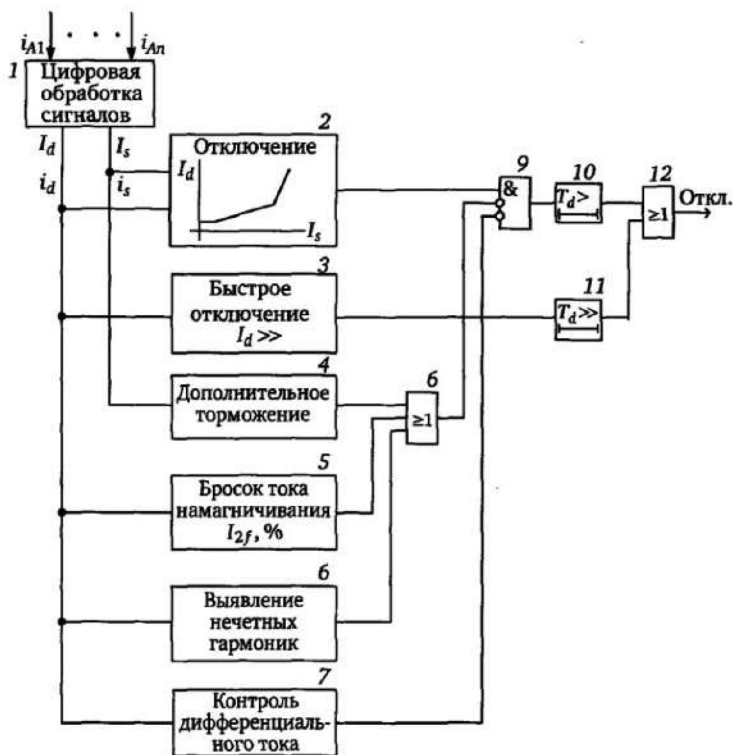


Рис. 6.7. Основные функциональные элементы дифференциальной защиты

чений дифференциального тока  $I_d$  и тормозного тока  $I_s$

$$I_d = |I_1 + I_2 + \dots + I_n|; \quad I_s = |I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|.$$

При этом указанные токи для выполнения дальнейших функций представляются как текущими интегрированными величинами, характеризующими амплитуды соответствующих векторов, так и текущими цифровыми мгновенными значениями, что необходимо для гармонического анализа дифференциального тока.

Блок 2 формирует основную характеристику отключения  $I_d = f(I_s)$  (рис. 6.3 и 6.5), обеспечивающую защиту с абсолютной селективностью с торможением от суммы абсолютных значений токов.

Превышение дифференциальным током  $I_d$  определенного, достаточно большого значения  $I_d \gg$  во многих случаях позволяет однозначно выявить внутреннее повреждение. Указанное определяется тем, что при внешнем повреждении в отличие от внутреннего ток сквозного КЗ ограничивается, по крайней мере, сопротивлением защищаемого объекта (трансформатора, линии). Поэтому превышение током  $I_d$  достаточно большого значения дифференциального тока  $I_d \gg$  (см. рис. 6.5) соответствует КЗ в защищаемой зоне, т.е. в этом случае не требуется использования тормозной характеристики отключения. Критерием в данном случае может служить превышение эффективного  $I_d$  или мгновенного  $i_d$  дифференциального тока определенного значения, соответствующего уставке  $I_d \gg$ , что обеспечивается блоком 3 быстрого отключения (рис. 6.7).

Блок 4 формирует функцию дополнительного торможения при внешних КЗ, фиксируя в первые моменты времени после возникновения КЗ, когда трансформаторы тока еще не насыщены, попадание замера в область дополнительного торможения 4 (см. рис. 6.5). Попадание в эту область происходит, если дифференциальный ток в первый момент мал, что позволяет зафиксировать внешнее КЗ. Указанное позволяет при последующем насыщении трансформаторов тока и вхождении рабочей точки в область отключения блокировать с помощью блока 9 отключение на заданное время.

Блок 5 на основе гармонического анализа дифференциального тока выявляет увеличение процентного содержания амплитуды второй гармонической составляющей, что характеризует

режим насыщения трансформатора при включении. В этом случае отключение по основному каналу дифференциальной защиты (блок 2) блокируется с помощью схемы И (блок 9) при превышении заданного соответствующей уставкой уровня  $I_{2f}\%$ . Отметим, что канал быстрого отключения (блок 3), действующий при больших значениях дифференциального тока при этом не блокируется.

При повышении напряжения, подводимого к силовому трансформатору, повышается индукция и происходит симметричное насыщение, характеризуемое повышением относительного уровня нечетных гармоник в токе, прежде всего третьей  $I_{3f}\%$  или пятой  $I_{5f}\%$ . Для выявления этого состояния используется блок 6, контролирующий относительное значение нечетных гармоник в дифференциальном токе и блокирующий основной канал отключения при повышенном содержании нечетных гармоник.

Блок 7 контроля исправности токовых цепей измеряет дифференциальный ток  $I_d$  и блокирует отключение по основному каналу, если значение  $I_d$  превышает в течение заданного времени (обычно несколько секунд) установленное значение  $I_{dн}$ , меньшее начального порога срабатывания  $I_{дуст}$ . Контролируемое при этом возрастание тока небаланса  $I_{дн}$  характеризует режим неисправности в цепях, формирующих дифференциальный ток. Отсутствие указанного блокирования может привести к неселективному отключению в режиме неисправности в цепях тока при возникновении внешних КЗ.

### **6.2.3. Чувствительность и селективность дифференциальных защит с непосредственным сравнением токов**

Учитывая сравнительно небольшие значения начального порога срабатывания  $I_{дуст}$  в выражении (6.1), срабатывание дифференциальной защиты двухконцевого объекта с достаточной точностью описывается в случае возникновения КЗ соотношением

$$\frac{|I_1 + I_2|}{|I_1| + |I_2|} \geq k, \quad (6.4)$$

где  $k < 1$ . В идеальном случае при внутреннем КЗ и совпадении фаз токов  $I_1$  и  $I_2$  по концам объекта условие (6.4) всегда выпол-

няется, так как сводится к условию  $k < 1$ . Чем меньше значение  $k$ , тем чувствительнее защита, так как с большим запасом выполняется условие (6.4), что справедливо также и в случае определенного расхождения фаз токов. С другой стороны, уменьшать значение  $k$ , т.е. делать характеристику 1 на рис. 6.3 более полой, можно лишь до определенного предела во избежание излишнего срабатывания, так как необходимо учитывать возможность увеличения разницы токов и их фазового сдвига вследствие насыщения ТТ при внешних КЗ с большими сквозными токами. Выбор коэффициента  $k$  производится с учетом обоих указанных факторов.

При внутренних КЗ фазовый сдвиг между токами может быть достаточно большим с учетом разницы углов результирующих сопротивлений источников питания относительно места КЗ, влияния режима нагрузки и сопротивления в месте КЗ.

В частности, при сравнительно большом перетоке мощности по линии в режиме нагрузки и возникшем однофазном внутреннем КЗ аварийная составляющая тока КЗ, а, следовательно, и дифференциальный ток могут быть невелики при относительно большом эквивалентном сопротивлении нулевой последовательности системы или переходном сопротивлении в месте КЗ. В этом случае токи нагрузки  $I_{н1}$  и  $I_{н2}$ , протекающие по линии (рис. 6.8,а) могут быть соизмеримы по величине с аварийными составляющими токов однофазного замыкания  $I_{к1ав}$  и  $I_{к2ав}$  в месте КЗ.

Результирующие токи КЗ  $I_{к1}$  и  $I_{к2}$  в поврежденной фазе (рис. 6.8,б) по обеим сторонам линии имеют при этом значительный угол расхождения фаз  $\varphi$ , вызванный влиянием токов нагрузки. Указанное приводит к существенному загромождению дифференциальной защиты. Так, например, при равных значениях фазных токов  $I_{к1}$  и  $I_{к2}$  и сдвиге их на  $90^\circ$  значение коэффициента торможения  $k$  по выражению (6.4) для обеспечения срабатывания должно быть с запасом меньше  $k = |1 + j|/2 = 1/\sqrt{2} = 0,707$ .

Определим граничную линию срабатывания, соответствующую алгоритму (6.4) в комплексной плоскости отношений сравниваемых токов  $I_1/I_2 = m$ .

Обозначив

$$m = |I_1/I_2|; \quad \varphi = \arg(I_1/I_2), \quad (6.5)$$

из (6.4) получим условие срабатывания дифференциальной защиты

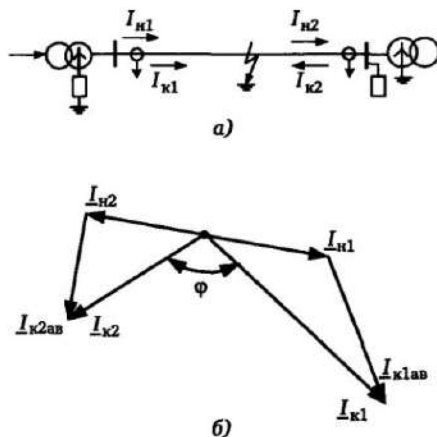


Рис. 6.8. Однофазное КЗ в нагруженной линии

$$\frac{|me^{j\varphi} + 1|}{m+1} \geq k. \quad (6.6)$$

Граничные значения  $m$ , соответствующие срабатыванию дифференциальной защиты, получим, приняв в (6.6) знак равенства и решив полученное уравнение относительно  $m$ :

$$m_{1,2} = \frac{k^2 - \cos\varphi}{1 - k^2} \pm \sqrt{\frac{(\cos\varphi - k^2)^2}{(1 - k^2)^2} - 1}. \quad (6.7)$$

На рис. 6.9 в качестве примера на основе выражения (6.7) построены граничные линии срабатывания дифференциальной защиты в комплексной плоскости отношений сравниваемых токов  $m = I_1/I_2$ .

Характеристики 1 и 2 соответствуют значениям коэффициента торможения  $k = 0,6$  и  $k = 0,9$ . Области срабатывания защищены и находятся вне граничных линий. Одностороннее питание места повреждения ( $I_1 = 0$  или  $I_2 = 0$ ) соответствует значению  $m = 0$  или  $m = \infty$ . Указанные точки находятся в заштрихованных зонах вне граничной линии. Точка  $m = -1$  (внешнее КЗ при отсутствии насыщения трансформаторов тока) всегда находится внутри граничной линии (вне области срабатывания). Поведение защиты при внешнем КЗ, сопровождающемся насы-

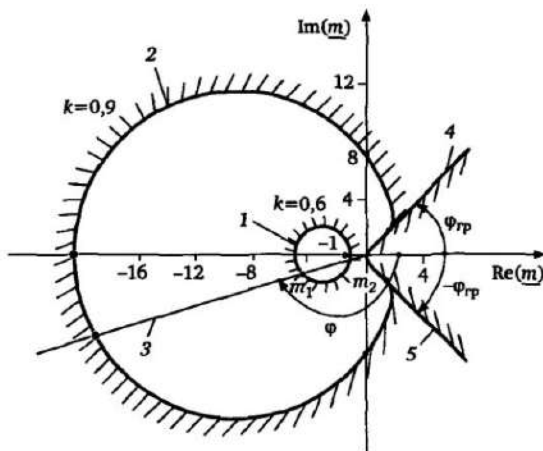


Рис. 6.9. Характеристики срабатывания дифференциальной защиты с торможением сравниваемыми токами

щением трансформаторов тока с углом между токами  $\varphi$ , отличающимся от  $180^\circ$ , оценивается по точкам  $m_1$  и  $m_2$  пересечения граничной линии 1 (при  $k = 0,6$ ) с прямой 3, соответствующей углу  $\varphi$  (рис. 6.9). В частности, в области

$$m_2 < m = \frac{I_1}{I_2} < m_1,$$

находящейся внутри граничной линии 1, защита не срабатывает. При большем различии вторичных токов вследствие насыщения ( $I_1/I_2 > m_1$  или  $I_1/I_2 < m_2$ ) происходит срабатывание защиты при внешних КЗ вследствие насыщения трансформаторов тока. Значения  $m_1$  и  $m_2$  определяются непосредственно из выражения (6.7).

**Критерий надежного несрабатывания при внешних КЗ.** Для обеспечения надежного несрабатывания при внешних КЗ, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока, значение коэффициента торможения  $k$  должно быть выбрано с учетом изложенного таким образом, чтобы выполнялись условия

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{внеш}} &< \frac{k^2 - \cos \varphi_{\text{внеш}}}{1 - k^2} + \sqrt{\frac{(\cos \varphi_{\text{внеш}} - k^2)^2}{(1 - k^2)^2} - 1}; \\ m_{\text{внеш}} &> \frac{k^2 - \cos \varphi_{\text{внеш}}}{1 - k^2} - \sqrt{\frac{(\cos \varphi_{\text{внеш}} - k^2)^2}{(1 - k^2)^2} - 1}. \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$



В выражении (6.8)  $m_{\text{внеш}}$  и  $\varphi_{\text{внеш}}$  — отношение модулей вторичных токов и угол между ними при максимальном насыщении трансформаторов тока соответственно.

**Критерий надежного срабатывания при внутренних КЗ.** Коэффициент торможения  $k$  должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечить надежное срабатывание при внутренних КЗ с учетом максимально возможного расхождения фаз токов по концам объекта (см., например, рис. 6.8,б).

Для каждого коэффициента торможения  $k$  существуют максимальные граничные углы расхождения фаз токов  $\varphi_{\text{гр}}$ , ограничивающие область безусловного срабатывания защиты (см. рис. 6.9). Указанное означает, что в определенном диапазоне углов  $\varphi$  между сравниваемыми токами  $I_1$  и  $I_2$  при внутреннем КЗ, ограничивающем область  $\varphi_{\text{гр}}$ , защита срабатывает независимо от соотношения между модулями токов.

Условие  $\varphi = \varphi_{\text{гр}}$  соответствует сокращению зоны несрабатывания до нуля, т.е., условию  $m_1 = m_2$ . Указанное обеспечивается при равенстве нулю или отрицательному значению выражения под корнем в (6.7), что соответствует условию

$$\cos \varphi < 2k^2 - 1. \quad (6.9)$$

Из выражения (6.9) определяется область углов  $\varphi$  безусловного срабатывания дифференциальной защиты при внутренних КЗ:

$$-\varphi_{\text{гр}} < \varphi < \varphi_{\text{гр}}, \quad (6.10)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{гр}} &= \arccos(2k^2 - 1) \text{ при } k > 1/\sqrt{2}; \\ \varphi_{\text{гр}} &= \pi + \arccos(2k^2 - 1) \text{ при } k < 1/\sqrt{2}. \end{aligned}$$

Область безусловного срабатывания, заштрихованная на рис. 6.10, не зависит от соотношений между токами и определяется только коэффициентом торможения  $k$ .

Зная угол  $\varphi$  между сравниваемыми токами при внутреннем КЗ, можно определить коэффициент торможения  $k$ , при котором будет обеспечиваться надежное срабатывание защиты. Так, например, при максимальном угле расхождения токов внутрен-

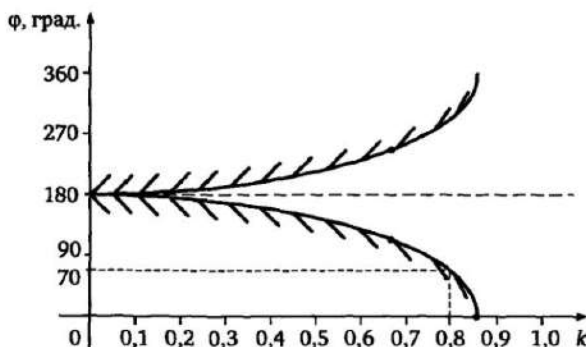


Рис. 6.10. Характеристика безусловной чувствительности дифференциальной защиты

него КЗ  $\varphi = 70^\circ$  срабатывание защиты при КЗ в зоне обеспечивается независимо от соотношения между ними при коэффициенте торможения  $k < 0,8$  (см. рис. 6.10). Дифференциальный ток должен при этом превышать максимальный порог срабатывания дифференциальной защиты  $I_{дуст}$  по выражению (6.1).

В отдельных случаях, когда выбранный по условию безусловного срабатывания коэффициент торможения  $k$  не удовлетворяет требованию (6.8) отстройки от внешних КЗ с насыщением трансформаторов тока, возможно увеличение коэффициента торможения, т.е. выход за зону безусловного срабатывания. В этом случае важным становится соотношение между токами при внутреннем КЗ  $m_{внутр}$ , причем, чем больше различие токов, тем надежнее обеспечиваются условия срабатывания.

Рабочая точка  $m_{внутр}$  должна лежать в этом случае вне граничной линии срабатывания (см. рис. 6.9), что обеспечивается условиями:

$$m_{внутр} > \frac{k^2 - \cos \varphi_{внутр}}{1 - k^2} + \sqrt{\frac{\cos \varphi_{внутр} - k^2}{(1 - k^2)^2} - 1};$$

$$m_{внутр} < \frac{k^2 - \cos \varphi_{внутр}}{1 - k^2} - \sqrt{\frac{\cos \varphi_{внутр} - k^2}{(1 - k^2)^2} - 1}.$$

### 6.3. Дифференциальные защиты с торможением от расчетной погрешности

Основным недостатком защит с торможением от сравниваемых токов (см. § 6.2) является недостаточная чувствительность при внутренних КЗ, сопровождающихся расхождением по фазе сравниваемых токов. Это обусловлено самим принципом торможения, при котором тормозная величина  $I_s$  пропорциональна току КЗ независимо от того, имеется небаланс токов, могущий привести к срабатыванию при внешних КЗ, или нет (см. рис. 6.2). Указанное приводит к существенному загроблению дифференциальной защиты.

Принцип выполнения дифференциальной защиты с торможением от расчетной погрешности [9], используя дифференциальный ток  $I_d$ , не использует торможение, пропорциональное сумме абсолютных значений сравниваемых токов или максимальному из них. Он основан на возможности цифровой защиты рассчитать максимально возможные погрешности измерения  $F_{T1}(I_1), F_{T2}(I_2), \dots, F_{Tn}(I_n)$  в текущий момент, вносимые каждым из сравниваемых токов  $I_1, I_2, \dots, I_n$  с учетом нелинейности характеристик измерительных трансформаторов и других факторов, например, текущего отклонения частоты, неточности измерения и т.п.

Все рассчитанные погрешности складываются, образуя максимально возможный расчетный небаланс  $\Delta I_F$  (максимально возможный дифференциальный ток), и формируется тормозная величина, соответствующая расчетному небалансу, т.е. уставка по дифференциальному току  $I_d$  загробляется на величину  $\Delta I_F$ . Таким образом, тормозная характеристика в данном случае определяется текущим расчетным небалансом, равным дифференциальному току ( $I_d = \Delta I_F$ ), т.е. представляет собой участок прямой 1 с наклоном  $45^\circ$  (рис. 6.11).

Указанное позволяет произвести адаптацию уставки защиты к текущим значениям сравниваемых токов с учетом харак-

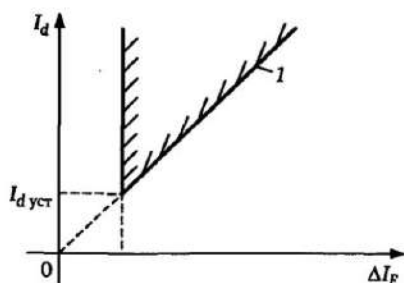


Рис. 6.11. Характеристика срабатывания дифференциальной защиты с торможением от расчетного сигнала помех

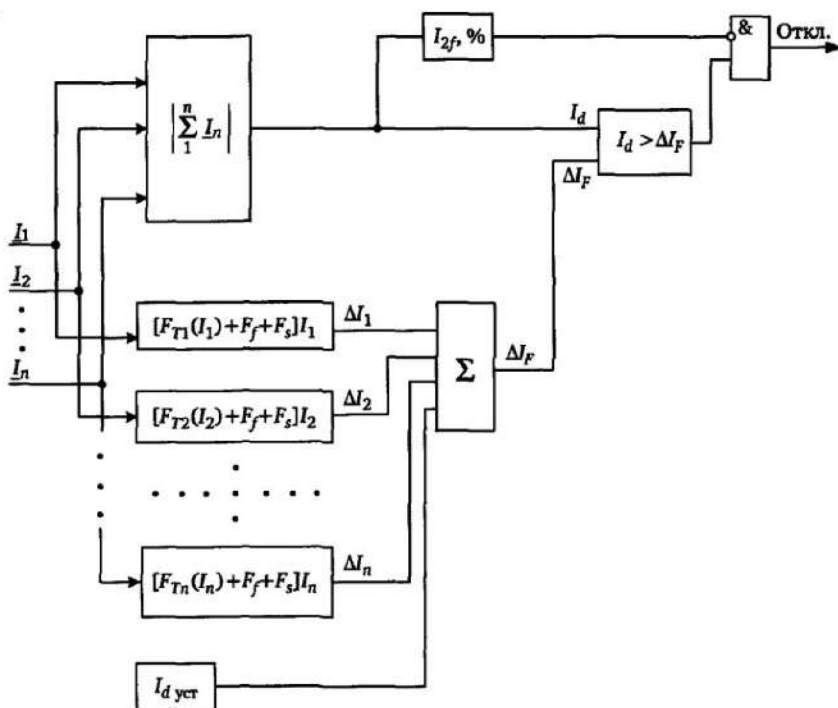


Рис. 6.12. Структура алгоритма цифровой дифференциальной защиты с торможением от расчетной погрешности

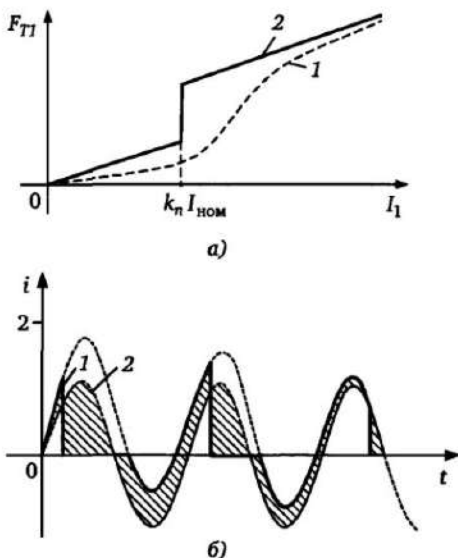
теристик трансформаторов тока, обеспечив существенно большую чувствительность дифференциальной защиты. Увеличение чувствительности происходит благодаря введению существенно меньшей тормозной величины, соответствующей лишь максимальному небалансу при внешнем КЗ с текущими значениями подводимых токов.

Структура алгоритма с торможением от расчетной погрешности приведена на рис. 6.12.

Из сравниваемых токов  $I_1, I_2, \dots, I_n$  формируется дифференциальный ток  $I_d = \left| \sum_1^n I_n \right|$  и рассчитываются максимально воз-

можные расчетные погрешности  $\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_n$  соответственно для каждого тока. Каждая из указанных погрешностей, например  $\Delta I_1$  для тока  $I_1$ , определяется как сумма отдельных погрешностей, зависящих от различных факторов

Рис. 6.13. Реальная (1) и расчетная (2) характеристики погрешности  $F_{TI}(I_1)$  трансформатора тока (а); формирование тормозной составляющей, учитывающей искажение формы сигнала при насыщении ТТ (б)



$$\Delta I_1 = [F_{TI}(I_1) + F_f + F_s] I_1. \quad (6.11)$$

При этом  $F_{TI}(I_1)$  — максимально возможная погрешность, вносимая нелинейностью характеристики трансформатора тока  $TI$  при текущем значении тока  $I_1$  (рис. 6.13,а). Данная погрешность определяется на основе измеряемого защитой текущего значения тока  $I_1$  и аппроксимируемой в сторону увеличения расчетной погрешности характеристики  $F_{TI}(I_1)$  трансформатора тока (характеристика 2 на рис. 6.13,а).

Эта характеристика также рассчитывается самим алгоритмом защиты на основе вводимых в защиту параметров, характеризующих трансформатор тока и, прежде всего, предельную кратность тока  $k_n$  и ток  $k_n I_{ном}$ , при котором достигается заданная погрешность трансформатора тока (см. п. 4.1.2). Погрешность  $F_f$  в выражении (6.11) характеризует максимально возможные отклонения замера тока  $I_1$  при отклонении частоты  $f$  от номинальной и также рассчитывается самим алгоритмом защиты на основе измеряемых текущих значений  $I_1$  и  $f$ . Погрешность  $F_s$  соответствует другим возможным погрешностям, например, погрешностям синхронизации при передаче цифрового значения вектора тока на другой конец объекта с помощью цифровых кодов.

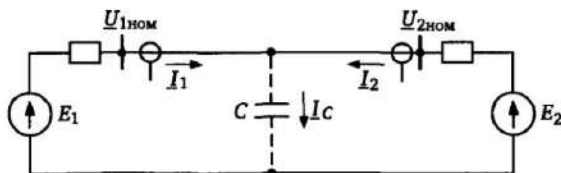


Рис. 6.14. К расчету небаланса, вносимого емкостным током линии

Результирующий расчетный небаланс (расчетная погрешность) характеризуется значением тока  $\Delta I_F = \sum_1^n \Delta I_n$ . Дифференциальный ток срабатывания защиты (уставка) растет пропорционально расчетному небалансу  $\Delta I_F$  (см. рис. 6.11), что обеспечивает адаптивность торможения. Начальный ток срабатывания  $I_{дуст}$  соответствует начальному небалансу, не зависящему от сравниваемых токов, определяемому другими факторами, например, начальной погрешностью измерения и отклонениями коэффициентов передачи трансформаторов тока, небалансом, вносимым емкостным током ВЛ. Обычно значение  $I_{дуст} \leq 0,15 I_{ном}$ . При защите протяженных линий электропередачи значение  $I_{дуст}$  должно учитывать разность токов по концам линии, вносимую емкостным током линии (рис. 6.14).

При этом функция емкостной компенсации корректирует измеряемый ток  $I_{дуст}$ , устраняя из него емкостную составляющую  $I_C$

$$I_C = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} 10^{-6} U_{ном} f C'_л l, \quad (6.12)$$

где  $I_C$  — емкостной ток линии, А;  $U_{ном}$  — номинальное линейное напряжение, кВ;  $f$  — частота, Гц;  $C'_л$  — удельная емкость линии, нФ/км;  $l$  — длина линии, км.

Погрешности  $F_T$  в выражениях типа (6.11) для каждого из токов, определяемые нелинейностью ТТ, имеют статическую  $F_{Tст}$  и динамическую  $F_{Tдин}$  составляющие, т.е.  $F_T = F_{Tст} + F_{Tдин}$ . Учет динамической составляющей  $F_{Tдин}$ , возникающей при насыщении ТТ, например, под действием апериодической составляющей в первичном токе, происходит путем оценки степени насыщения по размеру заштрихованной площади между измеряемым

значением тока (кривая 1, рис. 6.13,б) и рассчитываемыми защитой в текущем режиме значениями первой гармоники «восстановленного» тока при отсутствии насыщения (пунктирная кривая 2 на рис. 6.13,б).

Таким образом, по мере насыщения трансформатора тока в динамическом режиме под воздействием апериодической составляющей растет  $F_T$  и общая тормозная величина  $\Delta I_F$ . На распределенных объектах (например ВЛ) расчетные погрешности  $\Delta I_n$  и измеренные значения векторов токов на каждой из сторон передаются в цифровом виде на другие концы объекта (например, см. рис. 1.2) для формирования дифференциального тока  $I_d$  и результирующего небаланса  $\Delta I_F$  и формирования отключающих сигналов (см. рис. 6.12).

При внешних КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением трансформаторов тока, срабатывания дифференциальной защиты не происходит ввиду «отслеживания» насыщения и соответственного увеличения тормозной величины  $\Delta I_F$  вследствие возрастания разницы между реальным  $I$  и восстановленным  $2$  токами (рис. 6.13,б). Данный критерий может быть использован для блокирования защиты в указанных режимах.

Следует отметить, что во избежание замедления при внутренних КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением трансформаторов тока, эти трансформаторы должны соответствующим образом быть выбраны с учетом возможных максимальных токов КЗ и параметров сети (см. §6.7).

С учетом изложенного, характеристика срабатывания дифференциальной защиты (см. рис. 6.11) ограничивается прямой  $I_d = \Delta I_F$  с наклоном  $45^\circ$ , соответствующей превышению дифференциальным током  $I_d$  максимального расчетного значения небаланса, и условием  $I_d \geq I_{dуст}$ , устанавливающим предельный начальный небаланс (область срабатывания заштрихована). Учитывая, что абсолютные погрешности  $\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_n$ , вносимые токами, обычно значительно меньше самих токов, особенно, при небольших токах КЗ, данный алгоритм обладает значительно большей чувствительностью по сравнению с алгоритмом торможения сравниваемыми токами (см. рис. 6.3).

#### 6.4. Особенности выполнения цифровых дифференциальных защит трансформаторов

Необходимым условием для правильного функционирования дифференциальной защиты является баланс сравниваемых токов в режиме нагрузки и при повреждениях вне защищаемого объекта. Для некоторых объектов, прежде всего, силовых трансформаторов, при выполнении дифференциальной защиты требуется предварительное преобразование токов отдельных сторон. Указанное обусловлено следующими факторами:

1) различием номинальных напряжений отдельных сторон трансформатора и номинальных мощностей обмоток (для трансформаторов с тремя и более обмотками);

2) неидентичностью номинального тока силового трансформатора и номинального тока измерительного трансформатора тока, установленного на соответствующей стороне;

3) фазовым сдвигом между токами отдельных сторон силового трансформатора, обусловленным схемой соединения его обмоток, например  $Y/\Delta-11$ ;

4) необходимостью компенсации составляющей тока нулевой последовательности на стороне трансформатора с заземленной нейтралью для исключения неправильного действия дифференциальной защиты при внешних однофазных КЗ.

Существенным преимуществом цифровых дифференциальных защит является возможность практически полной корректировки коэффициентов передачи при измерении токов на отдельных сторонах программным путем — умножением рассчитанных векторов входных токов отдельных сторон на соответствующие комплексные коэффициенты. При этом указанные коэффициенты определяются и устанавливаются автоматически самой защитой на основе ввода данных о параметрах силового трансформатора (номинальная мощность, номинальное напряжение, группа соединений обмоток) и о параметрах соответствующего измерительного трансформатора тока (номинальные первичный и вторичный токи).

В защитах с аналоговой обработкой сигналов указанные проблемы решаются подбором коэффициентов передачи измерительных трансформаторов тока, использованием различных схем включения вторичных обмоток измерительных трансформаторов тока



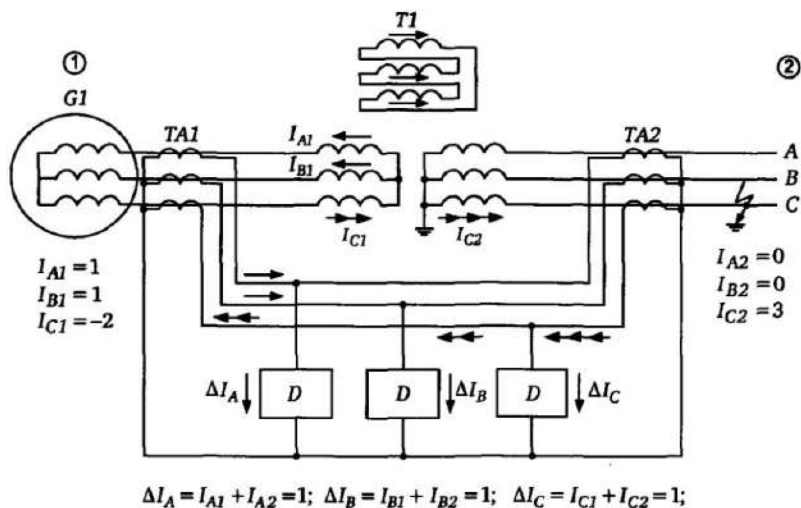


Рис. 6.15. Токораспределение в дифференциальной цепи без компенсации  $I_0$  при внешнем однофазном КЗ

и введением дополнительных (выравнивающих) трансформаторов (автотрансформаторов).

Необходимость исключения составляющих тока нулевой последовательности из фазных значений сравниваемых токов для сторон трансформаторов с заземленной нулевой точкой поясняет рис. 6.15 [8].

Обмотки измерительных трансформаторов тока  $TA1$  и  $TA2$  включены по дифференциальной схеме, образуя пофазную дифференциальную защиту силового трансформатора  $T1$  с реагирующими элементами  $D$ . При внешнем однофазном КЗ (фаза  $C$ ) на стороне 2 трансформатора с заземленной нейтралью с токами  $I_{A2} = 0$ ,  $I_{B2} = 0$ ,  $I_{C2} = 3$  (в относительных единицах) токи КЗ содержат составляющие нулевой последовательности, которые не могут протекать на питающей стороне 1 трансформатора ввиду отсутствия заземления нейтрали. Указанные токи замыкаются в обмотке трансформатора, соединенной в треугольник. Токи в плечах дифференциальной защиты на стороне 1  $I_{A1} = 1$ ,  $I_{B1} = 1$ ,  $I_{C2} = -2$  образуют систему, не содержащую нулевой последовательности. Как видно из рис. 6.15, в результате несоответствия фазных токов на первичной и вторичной стороне трансформатора при внешних однофазных КЗ в каждом фазном

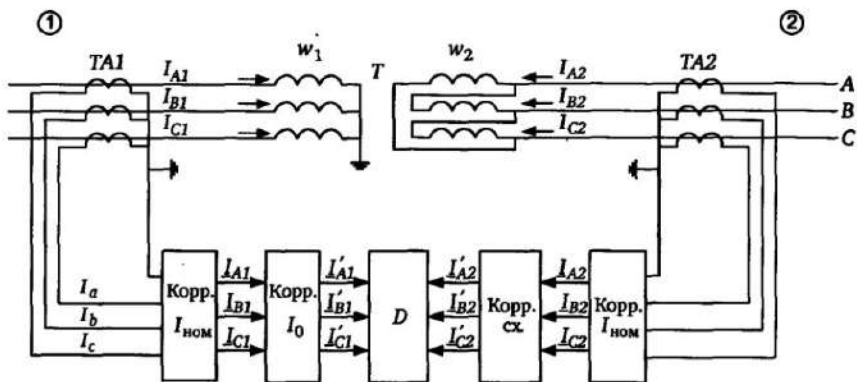


Рис. 6.16. Цифровая корректировка измеряемых фазных токов в дифференциальной защите

измерительном элементе  $D$  возникает дифференциальный ток  $\Delta I = 1$ , т.е. необходимый баланс токов при внешних КЗ нарушается.

Небаланс дифференциальной защиты вызывают и другие факторы, например, 1), 2), 3), приведенные выше. Устранение влияния указанных факторов в цифровых дифференциальных защитах путем использования программных средств поясняет рис. 6.16 [8, 9]. Перед сравнением измеряемые вторичные токи по обеим сторонам умножаются на соответствующие корректирующие действительные коэффициенты  $k_{\text{ном}}$ , генерируемые блоками корректировки номинальных токов «Корр.  $I_{\text{ном}}$ ».

При этом для каждой из сторон трансформатора коэффициенты  $k_{\text{ном}1}$  и  $k_{\text{ном}2}$  соответственно равны:

$$k_{\text{ном}1} = \frac{I_{\text{ном}TA1}}{I_{\text{ном}Tw1}}; \quad k_{\text{ном}2} = \frac{I_{\text{ном}TA2}}{I_{\text{ном}Tw2}},$$

где  $I_{\text{ном}TA1}$ ,  $I_{\text{ном}TA2}$  — номинальные первичные токи измерительных трансформаторов тока на отдельных сторонах силового трансформатора;  $I_{\text{ном}Tw1}$ ,  $I_{\text{ном}Tw2}$  — номинальные первичные токи по отдельным сторонам силового трансформатора

$$I_{\text{ном}Tw1} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}1}}, \quad I_{\text{ном}Tw2} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}2}}.$$

В результате с использованием вводимых в защиту параметров  $I_{\text{номТА1}}$ ,  $I_{\text{номТА2}}$ ,  $S_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном1}}$ ,  $U_{\text{ном2}}$  устраняется составляющая небаланса, вызываемая неодинаковостью номинальных токов силового и измерительных трансформаторов.

Блок «Корр.  $I_0$ » обеспечивает устранение описанного выше (рис. 6.15) небаланса в дифференциальной цепи при внешних однофазных КЗ. При этом, используя измеряемые фазные токи, защита рассчитывает составляющие нулевой последовательности на стороне обмотки с заземленной нейтралью

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_{A1} + I_{B1} + I_{C1})$$

и вычитает их из фазных токов  $I_{A1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{C1}$ , т. е.

$$I'_{A1} = I_{A1} - I_0; \quad I'_{B1} = I_{B1} - I_0; \quad I'_{C1} = I_{C1} - I_0.$$

После указанного преобразования небаланс токов, обусловленный протеканием токов нулевой последовательности, устраняется. В частности, для случая однофазного КЗ (см. рис. 6.15) имеем  $I_0 = I_{C2}/3 = 1$  и скорректированные значения токов на стороне с заземленной нейтралью равны:

$$I'_{A1} = 0 - 1 = -1; \quad I'_{B1} = 0 - 1 = -1; \quad I'_{C1} = 3 - 1 = 2.$$

Таким образом после корректировки имеем:

$$I_{A1} = -I'_{A1}; \quad I_{B1} = -I'_{B1}; \quad I_{C1} = -I'_{C1},$$

и дифференциальные токи небаланса в фазах

$$\Delta I_A = \Delta I_B = \Delta I_C = 0.$$

Блок «Корр. сх.» на рис. 6.16 учитывает сдвиг по фазе и изменения по модулю сравниваемых токов, вносимые различием схем включения обмоток силового трансформатора.

В данном случае применение этого блока необходимо на стороне 2 дифференциальной защиты, где обмотки силового трансформатора соединены в треугольник. Виды соединений обмоток на каждой из сторон трансформатора вводятся в защиту как соответствующие параметры [9], и все необходимые преобразования токов осуществляются программным путем без вмешательства пользователя.

Подобным образом в соответствии с рис. 6.16 в необходимом случаях осуществляется автоматическая цифровая корректировка сравниваемых токов при построении дифференциальной защиты. Сама дифференциальная функция обеспечивается в соответствии с принятым алгоритмом защиты, например, см. рис. 6.2, рис. 6.7 или рис. 6.12.

## 6.5. Продольные дифференциальные защиты ВЛ

### 6.5.1. Защиты линий с непосредственным сравнением токов

В рассматриваемых защитах непосредственное сравнение токов по концам линии обеспечивается путем соединения цепей трансформаторов токов, для чего могут быть использованы жилы телефонного кабеля. Возможный вариант соединения цепей с использованием схемы сравнения напряжений для дифференциальной защиты линий 7SD60 [9] приведен на рис. 6.17.

Защита содержит два полукомплекта  $S1$  и  $S2$  по концам линии  $W$ , к каждому из которых подведены цепи трансформаторов тока, соответственно, через суммирующие трансформаторы  $CT1$ ,  $CT2$  (например, см. рис. 6.6) при трехфазном исполнении защиты.

Комплекты соединены между собой двумя проводами, каждый из которых имеет сопротивление  $R_{\Sigma}/2$ . Соединения с цепями промежуточных трансформаторов  $CT1$  и  $CT2$  обеспечиваются резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ . Так как схема включения симметрична, то в режиме нагрузки или внешнего КЗ ток в соединительных проводах практически отсутствует (при отсутствии искажения сигналов от трансформаторов тока). Каждый полукомплект выполнен таким образом, что обеспечиваются измерения векторов тока  $I_1$  и  $I_2$  во вторичных цепях, на основе которых вычисляется дифференциальный ток  $I_d = |I_1 + I_2|$  и тормозной ток  $I_s = |I_1| + |I_2|$ , необходимые для реализации алгоритма с торможением сравниваемыми токами (см. п. 6.2.1). Вычисление  $I_d$  и  $I_s$  производится на основе следующих соотношений, связывающих токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в схеме рис. 6.17:

$$I_1 + I_2 = 2(1 + a_1)I_3, \quad (6.13)$$

где

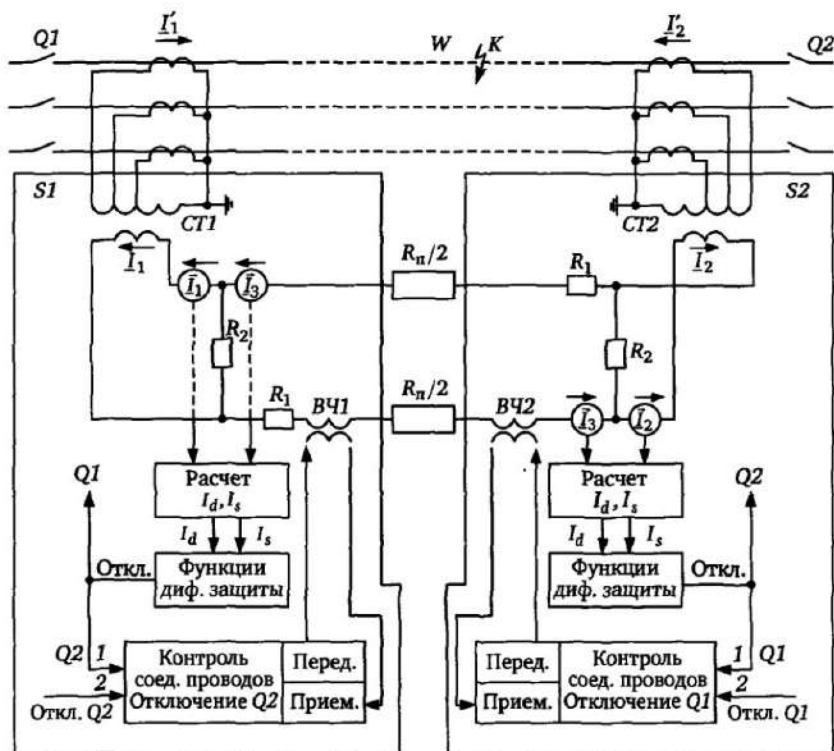


Рис. 6.17. Структурная схема дифференциальной защиты линий с соединительными проводами

$$\alpha_1 = \frac{(R_n/2) + R_1}{R_2}$$

На основе значений токов  $I_1$  и  $I_3$ , измеряемых полукомплектom  $S1$ , возможно измерение тока  $I_2$ , протекающего на другом конце линии, также полукомплектom  $S1$  на основе соотношения, вытекающего из (6.13)

$$I_2 = 2(1 + \alpha_1)I_3 - I_1 \quad (6.14)$$

Аналогичным образом полукомплект  $S2$  вычисляет ток  $I_1$  противоположного конца линии

$$I_1 = 2(1 + \alpha_1)I_3 - I_2 \quad (6.15)$$

Таким образом, дифференциальный ток  $I_d$  вычисляется каждым из полукомплектов на основе выражения (6.13)

$$I_d = 2(1 + a_1)|I_3|. \quad (6.16)$$

Тормозные токи на обеих сторонах  $I_{s1}$  и  $I_{s2}$  вычисляются с учетом (6.14), (6.15) полукомплектами  $S1$ ,  $S2$  соответственно на основе соотношений:

$$I_{s1} = |I_1| + |I_2| = |I_1| + |2(1 + a_1)I_3 - I_1|; \quad (6.17)$$

$$I_{s2} = |I_2| + |I_1| = |I_2| + |2(1 + a_1)I_3 - I_2|. \quad (6.18)$$

Эти токи при пренебрежении погрешностями имеют равные значения. При этом предполагается, что сопротивление соединительных проводов  $R_{\Pi}$ , входящее в величину  $a_1$  в выражении (6.13), известно. Следует отметить, что сопротивление соединительных проводов  $R_{\Pi}$  может быть рассчитано каждым полукомплексом с использованием измеренных токов. Для этого необходимо подвести к полукомплекту только ток со «своей» стороны, например ток  $I_1$ . Из выражения (6.13) и (6.14) при  $I_2 = 0$

$$R_{\Pi} = \left( \frac{I_1}{I_3} - 2 \right) R_2 - 2R_1. \quad (6.19)$$

В специальном режиме определения сопротивления соединительных проводов на основе выражения (6.19) защита вычисляет значение  $R_{\Pi}$ , которое в дальнейшем вводится в защиту как параметр.

Сравнение вычисленного дифференциального и тормозного токов  $I_d$  и  $I_s$  производится в каждом полукомплекте в соответствии с тормозной характеристикой и принятым алгоритмом (например, см. рис. 6.5 и 6.7).

**Контроль соединительных проводов и обмен отключающими сигналами.** В соответствии с принципом измерения токов в рассматриваемой дифференциальной защите линии (см. рис. 6.17), неисправность соединительных проводов (обрыв) приводит вследствие отсутствия дифференциального тока к отказу защиты при внутренних КЗ. Замыкание соединительных проводов может привести как к отказу, так и к неселективному действию в режиме нагрузки или внешнего КЗ. Поэтому необходимы специальные меры для выявления неисправности соеди-

нительных проводов и блокирование отключения в необходимых случаях.

Контроль неисправности соединительных проводов и обмен в необходимых случаях отключающими сигналами между полукомплектами  $S1$  и  $S2$  обеспечиваются наложением на дифференциальную схему сравнения первичных токов, включающую соединительные провода, высокочастотной последовательности импульсов. Указанная кодированная последовательность импульсов генерируется одним из полукомплектов, назначаемым «ведущим», и принимается обоими полукомплектами. Трансформаторы  $BЧ1$  и  $BЧ2$  (рис. 6.17) условно отображают гальваническое разделение цепей при передаче и приеме последовательности высокочастотных (около 2000 Гц) импульсов, форма которых может изменяться в зависимости от передаваемой информации. Указанная система выполняет следующие основные функции [9]:

- контроль исправности соединительных проводов (обрыв, замыкание) с сигнализацией и возможностью блокирования отключения от обоих полукомплектов;
- передача отключающего сигнала на противоположный конец линии при срабатывании дифференциальной защиты;
- передача отключающих сигналов («Откл.  $Q2$ », «Откл.  $Q1$ ») на противоположный конец линии при действии других внешних устройств, самой защиты или при необходимости дистанционного отключения противоположного конца линии.

Дифференциальные защиты с соединительными проводами на основе рассмотренного принципа могут применяться и для защиты трехконцевых линий.

### ***6.5.2. Дифференциальные защиты на основе обмена цифровыми сигналами***

Применение непосредственного сравнения токов с помощью соединительных проводов (см. рис. 6.17) ограничивается, прежде всего, длиной защищаемой линии (не более 15—20 км), а также возможным влиянием помех на соединительные провода, что приводит к искажению замеров.

На рис. 6.18 упрощенно пояснен принцип выполнения дифференциальной защиты, при котором на противоположный конец объекта (линии) с помощью канала связи передаются циф-

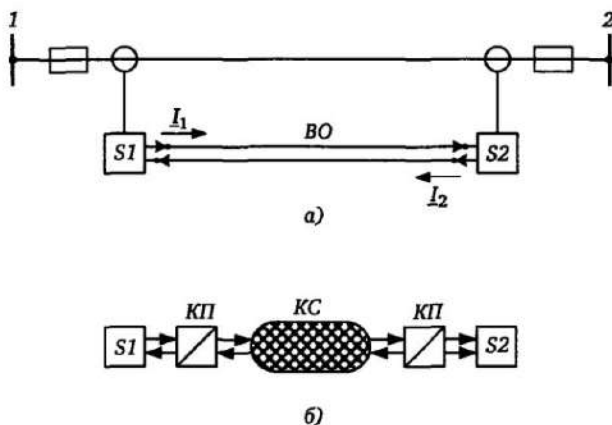


Рис. 6.18. Варианты обмена цифровыми сигналами:  
 а — волоконно-оптическое соединение; б — использование коммуникационной сети

ровые значения вектора тока.

В результате в каждом из полукомплектов защит  $S1$  и  $S2$  имеется информация о токах по концам линии, необходимая для построения дифференциальной защиты по выбранному алгоритму (см. §6.2 и §6.3). При этом адаптивный алгоритм с торможением от расчетной погрешности (см. §6.3) обеспечивает повышение чувствительности при малых токах КЗ. В качестве соединительных каналов могут быть использованы волоконно-оптические каналы ВО (рис. 6.18,а) или коммуникационные сети КС (рис. 6.18,б). В последнем случае необходимо использовать коммуникационный преобразователь КП для преобразования цифровой информации о векторах тока в соответствии с требованиями коммуникационной сети. Подобный принцип дифференциальной защиты может быть использован и для многоконцевых объектов (см. рис. 1.2) [9].

**Синхронизация измеряемых величин.** Угловые соотношения между векторами могут быть правильно измерены лишь при синхронизации векторов — привязки их к общему началу отсчета. Каждая из дифференциальных защит по концам объекта (см. рис. 6.18) измеряет вектора асинхронно в соответствии с внутренним тактом процессорного вычисления. Данные об амплитуде и фазе измеряемых в каждой фазе векторов посылаются на другие концы объекта с помощью соответствующих телеграмм. С учетом необходимости синхронизации каждая из те-



леграмм содержит данные о моменте ее отправления. При приеме телеграммы на другой стороне эти данные сверяются с данными о текущем моменте времени на приемной стороне, и производится соответствующая корректировка этих данных. При указанной привязке учитывается также замедление, вносимое передачей сигналов по каналу связи.

Точные измерения векторов могут быть получены лишь при соответствии расчетной частоты сигналов реальной частоте, имеющейся в сети. Поэтому в защитах с цифровой передачей информации о векторах должно непрерывно наблюдаться текущее значение частоты и вноситься соответствующие корректировки в процесс вычислений векторов и в передаваемую информацию.

**Ускоренное отключение при больших токах КЗ.** Измерение векторов и передача информации о параметрах векторов тока во всех фазах требует определенного времени. Для повышения быстродействия при достаточно больших токах внутреннего КЗ может быть использовано не векторное, а скалярное сравнение интегралов тока (заряда) [9], что уменьшает время передачи информации

$$Q_i = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt. \quad (6.20)$$

При внутреннем КЗ, когда угол между токами  $I_1$  и  $I_2$  невелик, сумма интегральных значений токов по концам объекта имеет достаточно большое значение. При внешних КЗ, когда теоретически токи находятся в противофазе, сумма интегралов равна нулю, т. е., например, для двухконцевой линии имеем

$$\int_{t_1}^{t_2} i_1(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_2(t) dt = 0. \quad (6.21)$$

Для того чтобы при последующем насыщении трансформаторов тока не произошло неселективного срабатывания при внешних КЗ, алгоритм защиты фиксирует близость к нулю суммы интегралов тока в начальный период времени, когда насыщения ТТ не происходит и в дальнейшем измерение блокируется на определенное время, фиксируя при этом внешнее КЗ.

Ускоренное отключение при использовании критерия сравне-

ния интегральных значений токов обеспечивается как меньшим временем, необходимым для измерения, так и меньшим временем передачи измеренного интегрального значения тока на противоположный конец объекта (только один скалярный параметр).

**Передача отключающих импульсов на противоположный конец объекта.** Как и в защите с соединительными проводами, цифровые каналы связи между отдельными сторонами объекта позволяют осуществлять передачу отключающих сигналов на другие стороны объекта. Эти сигналы могут поступить из двух источников. Сигнал отключения может быть передан на противоположный конец при срабатывании дифференциальной защиты, что увеличивает надежность отключения объекта с обеих сторон при внутреннем КЗ. В другом случае производится дистанционное отключение выключателя с противоположной стороны от внешних устройств или ручное отключение, для чего может быть использован отдельный программируемый вход защиты. Команды отключения могут быть для каждой отдельной фазы или трехфазными. Алгоритм сравнения токов в дифференциальной защите в принципе не зависит от способа обмена информацией. Поэтому при цифровом обмене информацией могут быть использованы различные алгоритмы сравнения (см. §6.2 и 6.3).

### ***6.5.3. Дифференциально-фазные защиты линий на основе обмена цифровыми сигналами***

**Реагирование на статические величины.** Дифференциально-фазные защиты в отличие от дифференциальных защит используют только фазные соотношения между токами по концам линии. Дифференциально-фазный принцип сравнения идентичен принципу, используемому в аналоговых цифровых защитах, с существенным различием, заключающемся в том, что информация о фазе сравниваемых токов может передаваться на другой конец линии в цифровом виде (телеграммы) по специальным каналам, чаще всего волоконно-оптическим. Этот принцип поясняют рис. 6.19 и 6.20 [8].

Мгновенные значения токов на каждой из сторон обрабатываются таким образом, что дискретные значения токов принимают знак 1 или 0 в зависимости только от знака дискретизи-

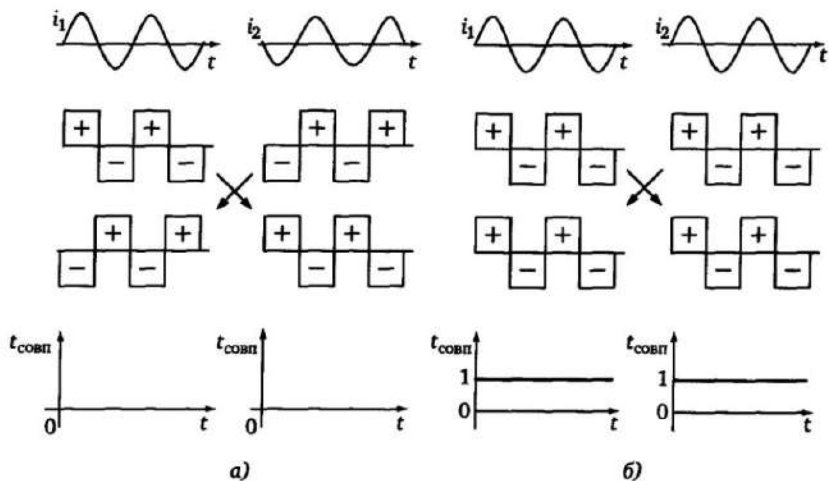


Рис. 6.19. Сравнимые сигналы в дифференциально-фазной защите с цифровым обменом данных при внешних (а) и внутренних КЗ (б)

руемой величины. С учетом этого формируются телеграммы, содержащие информацию о знаках мгновенных значений токов в текущий промежуток времени (рис. 6.20), и передаются на противоположный конец линии. В нагрузочном режиме или при внешнем КЗ знаки мгновенных значений сравниваемых токов большей частью противоположны, а при внутреннем КЗ — большей частью совпадают. Указанное фиксируется в каждом полукомплекте защиты  $S1$  и  $S2$  (см. рис. 6.18). При определенной длительности совпадения знаков сравниваемых сигналов  $t_{совп}$ , что определяется по соответствию цифровых кодов, формируется сигнал отключения.

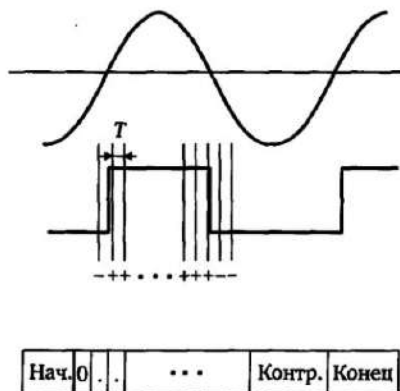


Рис. 6.20. Формирование передаваемого кода

На практике применение данного принципа имеет определенные ограничения, связанные с тем, что составляющие емкостного тока линии по концам линии совпадают по фазе и могут быть восприняты как токи внутреннего КЗ. Особенно явно этот

эффект выражен на ненагруженных линиях, где емкостный ток преобладает. С учетом указанного дифференциально-фазная защита должна иметь порог срабатывания по току, отстроенный от максимально возможного фазного емкостного тока линии, что ограничивает ее чувствительность.

**Реагирование на приращение токов.** Использование цифровых способов обработки сигналов позволяет существенно увеличивать чувствительность дифференциально-фазной защиты за счет исключения составляющих предаварийного режима из сравниваемых величин, например [9, 25]. Указанное можно сделать, например, выполнив операцию

$$\Delta i(t) = i(t) - i(t - kT_0), \quad (6.22)$$

где  $k$  — целое число;  $T_0$  — период синусоидальной величины.

В соответствии с преобразованием (6.22) новая сравниваемая величина  $\Delta i(t)$  образуется вычитанием из текущего мгновенного значения  $i(t)$ , мгновенного значения  $i(t - kT_0)$ , имевшегося за  $k$  периодов до этого (рис. 6.21).

Указанное означает, что при любом установившемся режиме длительностью больше  $kT_0$ , сравниваемая величина равна нулю, т.е. защита отстроена от небалансов, вызываемых любыми статическими режимами, в том числе емкостными токами линии. Величины  $\Delta i(t)$  являются аварийными составляющими токов КЗ. Легко показать, что при возникновении внутреннего КЗ в момент времени  $t_k$  аварийные составляющие токов  $\Delta i(t)$ , существующие в течение промежутка времени  $\Delta t = kT$  или  $t_k \leq t < t_k + kT$ , имеют одинаковые знаки, а при внешних КЗ — противоположные знаки. В частности, в соответствии с методом наложения любой режим КЗ (рис. 6.22,а) можно свести к суммированию двух режимов — нагрузочного режима (рис. 6.22,б) и дополнительного режима КЗ с аварийными составляющими (рис. 6.22,в) обусловленными приложением напряжения  $\underline{U}_k - \underline{U}_{к.н}$  в месте КЗ.

При этом  $\underline{U}_{к.н}$  — трехфазная система напряжений в месте КЗ в доаварийном режиме, а

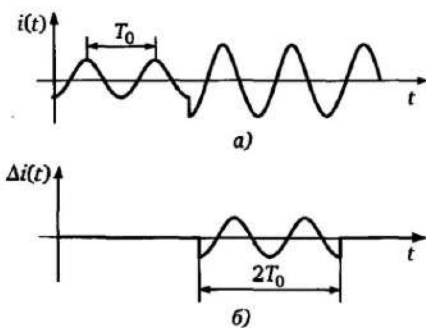


Рис. 6.21. Полный ток КЗ (а) и его аварийная составляющая (б) при  $k=2$

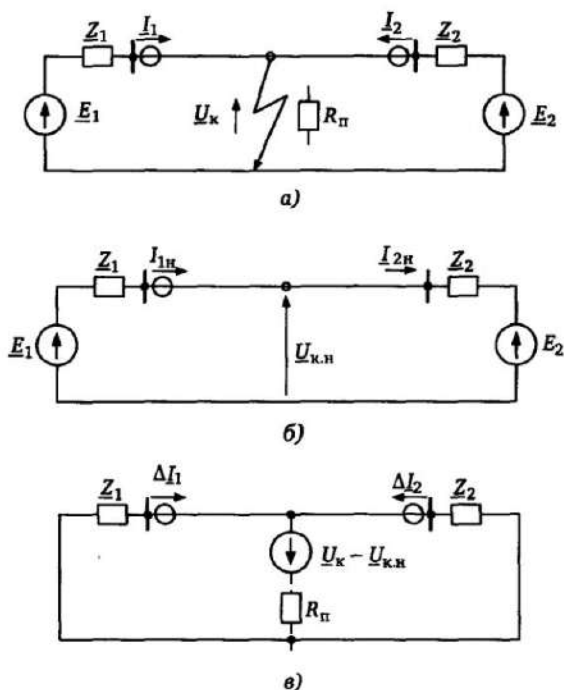


Рис. 6.22. Принцип наложения при расчете КЗ

$U_k$  — трехфазная система напряжений в режиме КЗ. Преобразование (6.22) исключает из сравниваемых величин составляющие предшествующего, в частности нагрузочного, режима  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$ , в результате чего остаются аварийные составляющие токов  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$ , которые при внутреннем КЗ имеют одинаковые полярности (рис. 6.22,в). При внешнем КЗ напряжение  $U_k$  прикладывается вне защищаемой линии, в результате чего аварийные составляющие токов  $\Delta I_1$ ,  $\Delta I_2$  имеют противоположные полярности по отношению к концам линии.

## 6.6. Цифровые дифференциальные защиты сборных шин

### 6.6.1. Измерительная часть

Сборные шины (рис. 6.23) представляют собой в общем случае объект, для защиты которого также могут быть применены рассмотренные выше принципы выполнения дифференциальной защиты, основанные на контроле дифференциального тока как

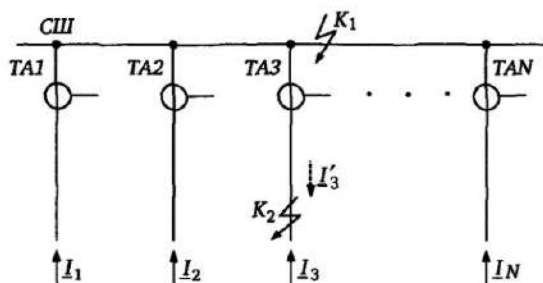


Рис. 6.23. Распределение токов при КЗ на сборных шинах

геометрической суммы всех токов, протекающих по его концам (см. §6.1).

В нормальном режиме и при внешних КЗ сумма подтекающих к шинам первичных токов на рис. 6.23 равна нулю, т.е.

$$I_1 + I_2 + \dots + I_N = 0. \quad (6.23)$$

При внутреннем КЗ  $K_1$  дифференциальный ток

$$I_d = |I_1 + I_2 + \dots + I_N|$$

является достаточно большим, соизмеримым по модулю с суммой всех токов, так как сдвиг фаз токов, подтекающих к месту КЗ, не является большим. При этом токи внутреннего КЗ, протекающие через отдельные трансформаторы тока  $TA1 \dots TAN$ , пропорциональны мощности эквивалентных источников относительно точки КЗ  $K_1$ . Эти же токи учитываются при выборе трансформаторов тока  $TA1 \dots TAN$ . Наиболее тяжелые условия для выполнения условия баланса токов (6.23) применительно к вторичным токам, измеряемым защитой, возникают при внешнем КЗ вблизи от сборных шин, например КЗ  $K_2$ .

Вытекающим из сборных шин является только один ток  $I'_3$ , т.е. выражение (6.23) при  $N = 4$  примет вид

$$I_1 + I_2 + I_4 = -I'_3.$$

Это означает, что через трансформатор тока, соответствующий объекту, на котором происходит внешнее по отношению к сборным шинам КЗ (в рассматриваемом случае — через трансформатор  $TA3$ ) протекает ток  $I'_3$ , равный сумме токов КЗ, протекающих по всем остальным присоединениям. С большой вероятностью данный ток может привести к глубокому насыще-

нию измерительного трансформатора тока. Поэтому для обеспечения надежного несрабатывания дифференциальной защиты шин при внешних КЗ необходимо учитывать возможность протекания тока, соизмеримого с максимальным током КЗ на шинах через любой из трансформаторов тока отдельных элементов. В случае насыщения измерительного трансформатора тока условие (6.23) баланса вторичных токов, обеспечивающее селективность при внешних КЗ, уже не выполняется.

Возможность глубокого насыщения трансформатора тока дифференциальной защиты сборных шин при внешнем КЗ определяет особенности выполнения алгоритмов защиты. При этом должны обеспечиваться как быстрое отключение при внутренних КЗ, так и надежная отстройка от внешних КЗ, сопровождающихся быстрым насыщением ТТ. С учетом того, что насыщение трансформаторов тока может происходить в первую четверть периода промышленной частоты, принятие решения об отключении или блокировании отключения должно быть произведено в первые моменты времени (3—10 мс) после возникновения КЗ, пока трансформатор тока еще не насытился. Поэтому необходимы операции не только с векторами, но и с мгновенными значениями дифференциального  $i_d$  и тормозного  $i_s$  токов. В качестве примера рассмотрим алгоритм дифференциальной защиты сборных шин 7SS52, в которой дифференциальный и тормозной токи являются соответственно геометрической суммой токов и суммой абсолютных значений токов [9]. Условие срабатывания защиты в упрощенном векторном виде описывается выражением (6.2). На рис. 6.24 приведены диаграммы мгновенных значений токов, подводимых к защите и формируемых в ней при внешнем КЗ, сопровождающемся насыщением одного из трансформаторов тока [8].

Для упрощения рассмотрим лишь два тока  $i_1$  и  $i_2$  (рис. 6.24,а), где  $i_1$  — сумма втекающих токов,  $i_2$  — вытекающий ток. В этом случае анализ эквивалентен анализу дифференциальной защиты линии. Экстремальным является случай, когда втекающие токи передаются линейно, т.е. трансформатор тока ТА1 не насыщается, а другой трансформатор тока ТА2 переходит под влияние большого вытекающего тока и апериодической составляющей в режиме глубокого насыщения (рис. 6.24,б и в). Основной проблемой в этом случае является недопущение срабатывания дифференциальной защиты, несмотря на возникновение в ре-

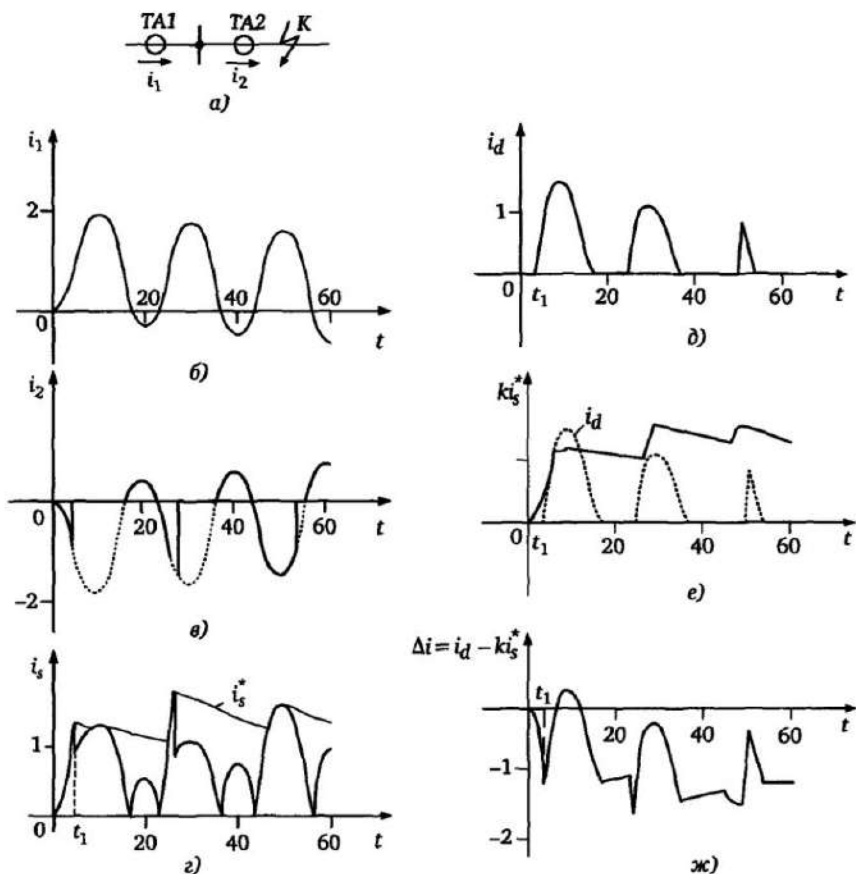


Рис. 6.24. Сравнимые величины в дифференциальной защите шин при внешнем КЗ

зультате насыщения трансформатора TA2 значительного дифференциального тока  $i_d$ .

Диаграммы изменения тормозного тока  $i_s = |i_1| + |i_2|$  и дифференциального тока  $i_d = i_1 + i_2$  приведены на рис. 6.24, г и д. Алгоритм сравнения  $i_d$  и  $i_s$  выполнен таким образом, что из тормозного тока  $i_s$  формируется интегрированный тормозной ток  $i_s^*$  (рис. 6.24, е). Интегратор имеет разные постоянные времени при возрастании и спаде тока  $i_s$ . При этом возрастание тока  $i_s$  отслеживается практически без замедления, а при последующем уменьшении тока  $i_s$  преобразованный ток  $i_s^*$  спадает относитель-



но достигнутого максимального значения с заданной постоянной времени.

При новом возрастании тока  $i_s$  запоминается его новое пиковое значение, относительно которого происходит дальнейший спад. В результате формируется пилообразная кривая тормозного тока  $i_s^*$  (рис. 6.24,з), которая в дальнейшем используется при реализации одного из условий срабатывания, имеющего в данном случае, с учетом выражения (6.1), вид (рис. 6.23,е и ж)

$$i_d \geq ki_s^* \quad (6.24)$$

Как видно из рис. 6.24, до момента  $t_1$  насыщения трансформатора тока ТА2 дифференциальный ток равен нулю (рис. 6.24,д), а тормозной ток  $ki_s^*$  возрастает (рис. 6.24,з и е), что характеризует внешнее повреждение. После момента  $t_1$  возникает резкое увеличение дифференциального тока  $i_d$  (рис. 6.24,д), что соответствует условию  $i_d > ki_s^*$ , приводящему без специальных мер к срабатыванию защиты.

На рис. 6.25 приведены диаграммы сравниваемых величин дифференциальной защиты при внутреннем КЗ, также сопровождающемся насыщением трансформатора тока ТА2 под действием апериодической составляющей.

Хотя в обоих случаях вследствие насыщения трансформатора тока возникает превышение  $\Delta i = i_d - ki_s^*$  дифференциального тока над тормозным (рис. 6.24,ж и 6.25,ж), имеются два существенных отличия, позволяющих выявить каждый из указанных режимов и обеспечить быстрое отключение внутренних КЗ. Во-первых, внутреннее КЗ характеризуется, в отличие от внешнего, положительным значением  $\Delta i$  (рис. 6.25,ж), возникающим в период  $0-t_1$  ненасыщенного состояния трансформатора тока. Вторым отличием является то, что с течением времени по мере затухания апериодической составляющей промежутки времени с положительным значением  $\Delta i$  при внутреннем КЗ возрастают (рис. 6.25,ж), а при внешнем КЗ — уменьшаются (рис. 6.24,ж).

Указанное позволяет реализовать алгоритм быстродействующей дифференциальной защиты шин 7SS52 [9], состоящий из трех каналов (рис. 6.26).

Канал I включает в себя блок I выявления возникновения внутреннего или внешнего КЗ по критерию скорости возрастания тормозного тока  $|i_s| = |i_1| + |i_2|$ . При внутреннем КЗ в проме-

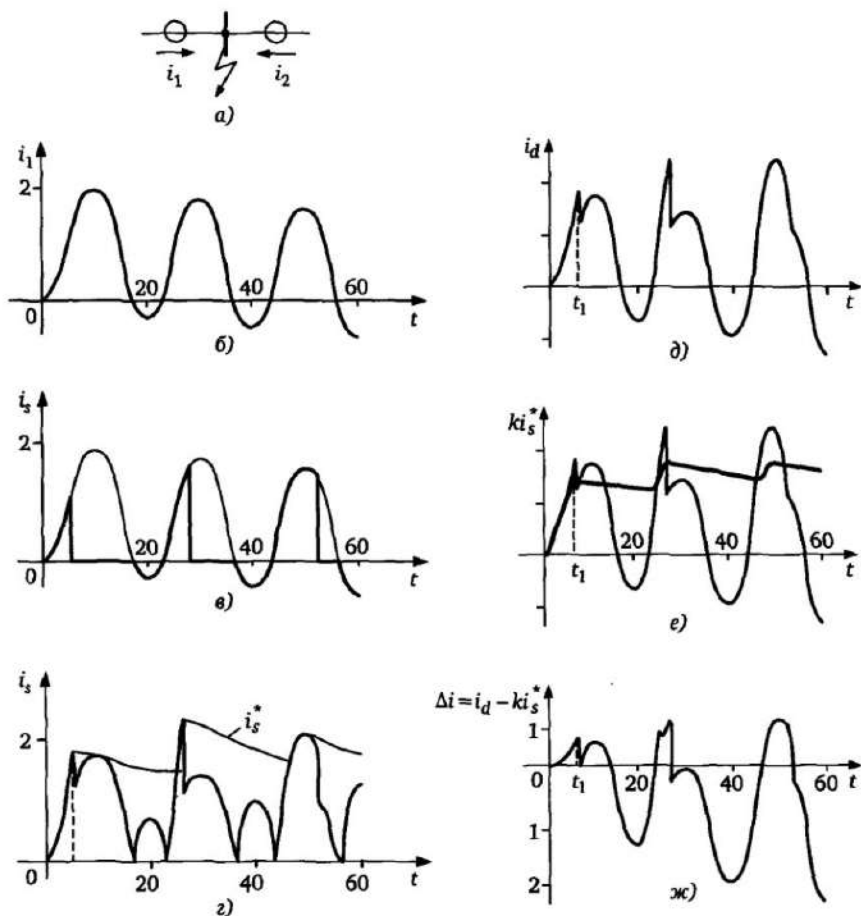


Рис. 6.25. Сравнимые величины в дифференциальной защите шин при внутреннем КЗ

жутке времени  $0-t_1$  до насыщения ТТ соотношение между  $i_d$  и  $i_s$  соответствует отключающей характеристике для мгновенных значений (блок 3). С небольшой задержкой на отключение  $\Delta T_1 \approx 3$  мс (минимальное время ненасыщенного состояния), в течение которой рабочая точка должна находиться в зоне срабатывания блока 3, происходит отключение внутреннего КЗ. В случае внешнего КЗ также возникает сигнал на выходе блока 1 выявления КЗ. Однако, так как в первые моменты внешнего КЗ отключающая характеристика мгновенных значений КЗ (блок 3) не дает сигнал на отключение, отсутствие срабатывания бло-

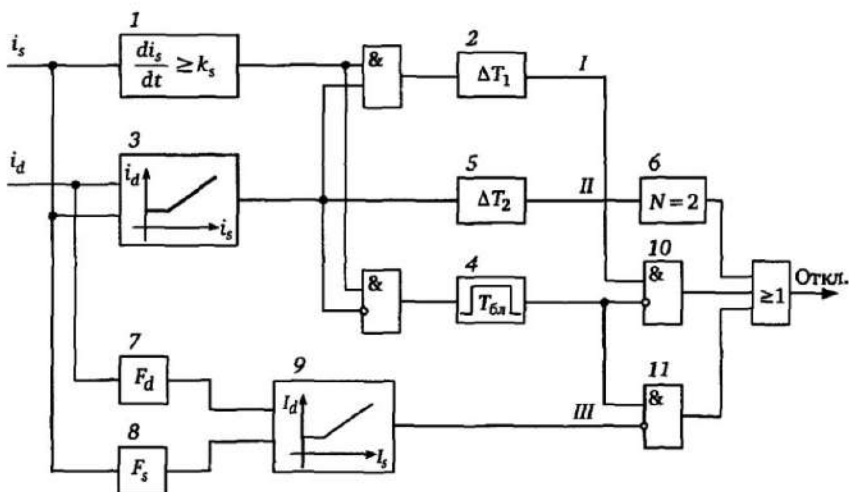


Рис. 6.26. Упрощенная структура алгоритма дифференциальной защиты шин

ка 3 фиксируется на период  $T_{бл} \approx 150 + 200$  мс блоком 4, формирующим через логическую схему И (элемент 10) блокирующий сигнал для быстродействующего канала отключения I.

Канал II функционирует параллельно с каналом I и резервирует отключение в тех случаях, когда вследствие глубокого насыщения трансформаторов тока значения токов  $i_d$  и  $i_s$  недостаточны в первые моменты для запуска блока выявления КЗ по критерию возрастания тормозного тока  $di_s/dt$ . Этот канал также включает в себя блок 3 с отключающей характеристикой  $i_d = f(i_s)$ , элемент 5 задержки на время  $\Delta T_2 \approx 7$  мс и счетчик 6 с уставкой  $N = 2$ , срабатывающий при повторном возникновении сигнала на выходе элемента задержки.

Таким образом, отключение по каналу II произойдет при наличии двух следующих друг за другом положительных сигналов  $\Delta i$ , каждый из которых имеет длительность не менее  $\Delta T_2$ . Указанное может происходить лишь при КЗ в зоне (рис. 6.25, ж), когда с течением времени положительные импульсы сигналов  $\Delta i$  не исчезают, а лишь возрастают по длительности. При КЗ вне зоны (например рис. 6.24, ж) имеется тенденция с течением времени к исчезновению указанных импульсов и сокращению их длительности. Поэтому отключение по каналу II в этом случае не происходит. Канал III использует отфильтрованные с помощью элементов цифровой фильтрации 7 и 8 значения, соответ-

ствующие модулям  $I_d$  и  $I_s$  векторов токов. При этом отфильтровываются и аperiodические составляющие в токах. Срабатывание обеспечивается с использованием отключающей дифференциальной функции  $I_d = f(I_s)$  (см. например рис. 6.3 и 6.5). При этом для исключения возможности неселективного срабатывания при внешнем КЗ, сопровождающемся насыщением трансформаторов тока, канал так же блокируется на время  $T_{\text{бл}}$  сигналом от блока 4 при выявлении внешнего КЗ.

Данный канал наиболее эффективен при относительно малых токах КЗ с существенной аperiodической составляющей, когда канал I не действует вследствие недостаточной чувствительности, а канал II действует с замедлением.

*Использование угловых соотношений между векторами при реализации дифференциальной защиты шин.* Возможно использование критерия максимального фазового сдвига  $\Delta\varphi$  между векторами тока при построении дифференциальной защиты шин. Так, при КЗ в зоне действия максимальный угол расхождения векторов  $\Delta\varphi$  значительно меньше, чем при внешнем КЗ (рис. 6.27). Проблема, однако, состоит в том, что при насыщении трансформатора тока, кривые тока существенно отличаются от синусоидальных (см. например рис. 6.24, в). В [26] рассмотрена дифференциальная защита шин, использующая наряду с критерием (6.2) на основе сравнения абсолютных значений токов, фазовый критерий  $\Delta\varphi \leq \alpha_{\text{уст}}$ , где  $\Delta\varphi$  — максимальный угол между измеряемыми токами (рис. 6.27).

Для того, чтобы использовать данный критерий при глубоком насыщении трансформаторов тока, производится «корректировка» кривой вторичного тока (рис. 6.28). При этом реальной пи-

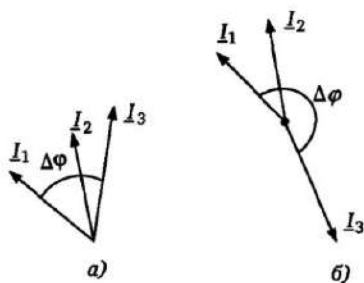


Рис. 6.27. Угловые соотношения между токами при внутреннем (а) и внешнем КЗ (б)

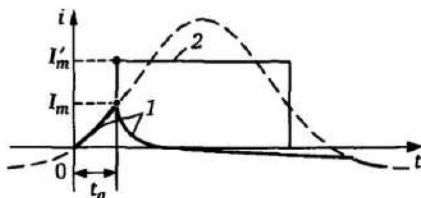


Рис. 6.28. Корректировка кривой вторичного тока в режиме насыщения

кообразной кривой 1 с максимумом  $I_m$  и временем достижения максимального значения  $t_a$  соответствует прямоугольный импульс 2 с расчетной амплитудой  $I'_m$ , зависящей от величин  $I_m$  и  $t_a$

$$I'_m = \frac{I_m}{\sin(2\pi t_a/T_0)},$$

где  $T_0$  — период основной частоты.

В качестве амплитуды и фазы скорректированного тока принимаются параметры первой гармонической составляющей периодической кривой, полуволна которой соответствует прямоугольному импульсу 2 (рис. 6.28).

### 6.6.2. Структура цифровой дифференциальной защиты сборных шин

В качестве примера на рис. 6.29 показана в упрощенном виде структура цифровой децентрализованной дифференциальной защиты сборных шин 7SS52 [9].

Принципиальной особенностью выполнения цифровой децентрализованной дифференциальной защиты является цифровая обработка каждого из токов  $n$  присоединений непосредственно у мест присоединений соответственно местными блоками  $МБ_1...МБ_n$ . К указанным блокам подводятся потоки информации по каналам  $B_1...B_n$ , включающие аналоговые сигналы от трансформаторов тока  $ТА_1...ТА_n$ , а также дискретные сигналы, характеризующие состояние соответствующих выключателей  $Q$  и разъединителей  $P$ . Обработанные в блоках  $МБ_1...МБ_n$  сигналы по оптоэлектронным каналам  $A_1...A_n$  передают соответствующую информацию (выборки мгновенных сигналов, вычисленные значения векторов, логические сигналы) в центральный блок ЦБ, в котором реализуются основные алгоритмы дифференциальной защиты.

Сигналы для отключения отдельных присоединений и сообщения для сигнализации передаются по каналам  $A_1...A_n$ ,  $B_1...B_n$  к соответствующим местным блокам  $МБ_1...МБ_n$  и от них — к коммутационным элементам. Основным преимуществом децентрализованной защиты является существенное сокращение длины кабелей, связывающих трансформаторы тока и устройст-

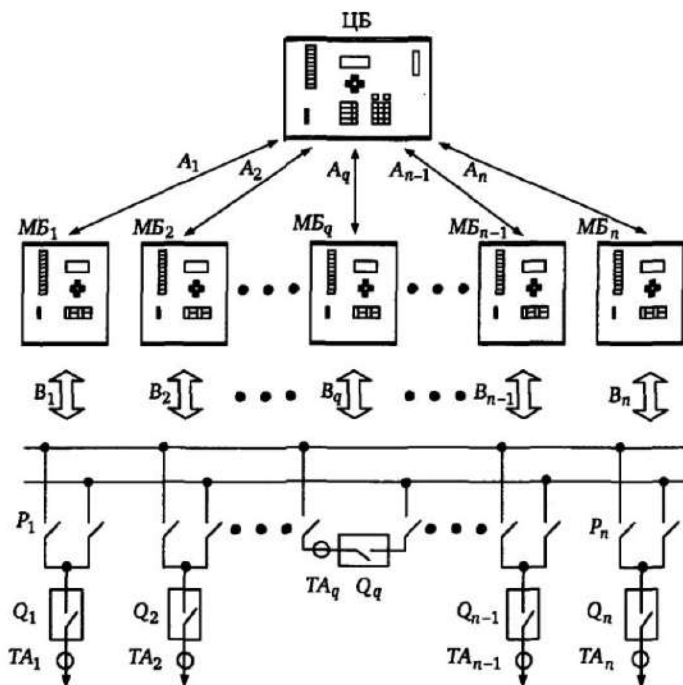


Рис. 6.29. Децентрализованная цифровая защита сборных шин

во защиты, вследствие того, что местные блоки  $МБ_1 \dots МБ_n$  с цифровой обработкой токов отдельных присоединений устанавливаются вблизи мест присоединений. Указанное существенно снижает и нагрузку на трансформаторы тока вследствие сокращения длины кабелей. К центральному блоку подводится цифровая информация, характеризующая как мгновенные значения сравниваемых токов, необходимые для реализации быстродействующих алгоритмов, так и их интегральные (векторные) значения.

Информация о состоянии коммутационных элементов необходима центральному блоку для отслеживания изменений в конфигурации систем шин и учета указанных изменений при формировании дифференциального и тормозного токов и реализации алгоритма дифференциальной защиты на основе соотношения (6.2). Может быть обеспечена защита нескольких отдельных участков шин, содержащих в совокупности до 48 присоединений. Алгоритм измерения, в общем, соответствует

рис. 6.26 и использует соотношения как между мгновенными значениями дифференциального и тормозного токов, так и между их интегральными значениями. Указанное в совокупности обеспечивает правильное и быстрое функционирование защиты при внутренних и внешних КЗ, сопровождающихся достаточно глубоким насыщением трансформаторов тока.

### 6.7. Требования к измерительным трансформаторам тока

Характеристики используемых для дифференциальной защиты трансформаторов тока определяют во многом правильность функционирования защиты при внешних и внутренних КЗ. Указанное обусловлено, прежде всего, возможностью насыщения ТТ и искажения кривых вторичных токов под действием переменной и апериодической составляющих первичного тока (см. §4.1, рис. 4.4 и 4.5).

Пусть  $k_n$  — предельная кратность тока  $I_k/I_{ном}$  (параметр трансформатора тока), соответствующая погрешности трансформатора тока  $n$ , %, (например, при  $n = 10\%$  имеем  $k_n = k_{10}$  и погрешность 10% в измерении вторичного тока  $I_k = k_n I_{ном}$ ). С учетом выражения (4.1) параметры трансформатора тока и его нагрузка должны быть выбраны таким образом, чтобы выполнялось условие

$$k_n \geq \frac{R_2 + R'_n}{R_2 + R_n} \cdot \frac{I_k}{I_{ном}}. \quad (6.25)$$

Данное значение  $k_n$  соответствует синусоидальному первичному току. При наличии апериодической составляющей в токе КЗ насыщение наступает раньше, что снижает значение  $k_n$ . Указанное означает, что значение  $k_n$  в выражении (6.25) для выхода на эквивалентный режим ТТ с апериодической составляющей при заданном токе КЗ  $I_k$  должно быть увеличено пропорционально коэффициенту  $k_a$ , характеризующему соотношение индукций (или токов намагничивания) в режимах с апериодической составляющей и без нее [8].

С учетом этого условия выбора ТТ в этом случае примут вид:

$$k_n \geq \frac{R_2 + R'_n}{R_2 + R_n} \cdot \frac{I_k}{I_{ном}} k_a, \quad (6.26)$$

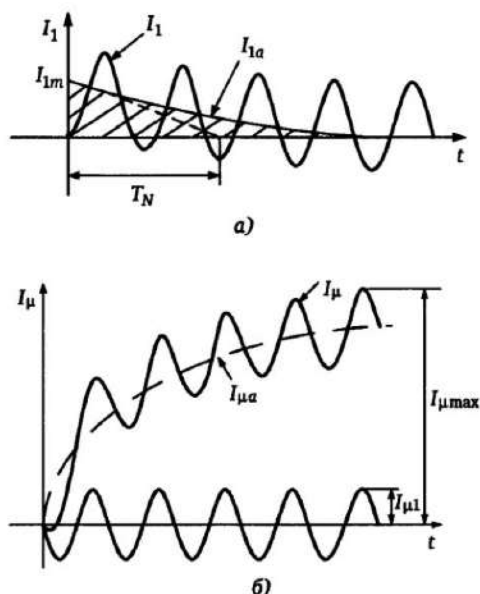


Рис. 6.30. Первичный ток (а) и ток намагничивания (б) в измерительном трансформаторе тока

где

$$k_a = \frac{I_{\mu\max}}{I_{\mu 1}} = \frac{I_{\mu 1} + I_{\mu a}}{I_{\mu 1}}; \quad (6.27)$$

$I_{\mu 1}$  — переменная составляющая в токе намагничивания  $I_{\mu}$ ;  $I_{\mu\max}$  — максимальное значение тока намагничивания;  $I_{\mu a}$  — амплитуда аperiodической составляющей в токе намагничивания.

Наиболее тяжелым случаем при насыщении ТТ является наличие максимальной аperiodической составляющей в первичном токе с амплитудой  $I_{1m}$  (рис. 6.30,а), где  $I_{1m}$  — амплитуда периодической составляющей первичного тока при чисто активном сопротивлении в цепи нагрузки.

Аperiodическая составляющая в токе намагничивания  $I_{\mu a}$  при этом равна

$$I_{\mu a} = \frac{I_{1m} T_N}{T_S - T_N} (e^{-t/T_S} - e^{-t/T_N}), \quad (6.28)$$

где  $T_N$  — постоянная времени сети (постоянная затухания аperiodической составляющей в токе  $I_1$ ) — рис. 6.30,а;  $T_S = L_{\mu}/R_S$  —



постоянная времени вторичной цепи ТТ ( $L_\mu$  — индуктивность ветви намагничивания;  $R_S$  — результирующее сопротивление вторичной цепи). Учитывая, что переменная составляющая в токе намагничивания равна

$$I_{\mu 1} = \frac{I_{1m} R_S}{|R_S + j\omega L_\mu|} \approx \frac{I_{1m} R_S}{\omega L_\mu} = \frac{I_{1m}}{\omega T_S}, \quad (6.29)$$

получим с учетом соотношений (6.27)—(6.29)

$$k_a = 1 + \frac{\omega T_S T_N}{T_S - T_N} (e^{-t/T_S} - e^{-t/T_N}). \quad (6.30)$$

При этом максимальное значение коэффициента  $k_a$  равно

$$k_{a\max} = 1 + \omega T_S \left( \frac{T_N}{T_S} \right)^{T_S/(T_S - T_N)} \quad (6.31)$$

и достигается через время  $t_m$

$$t_m = \frac{T_S T_N}{T_S - T_N} \ln \frac{T_N}{T_S}. \quad (6.32)$$

Обычно постоянная времени трансформатора тока значительно больше постоянной времени сети ( $T_S \gg T_N$ ). В этом случае выражение (6.31) для корректирующего коэффициента  $k_a$  упрощается:

$$k_a = 1 + \omega T_N. \quad (6.33)$$

Для РЗ со временем срабатывания, не превышающим значение  $t_M$ , корректирующий коэффициент  $k_a$  в общем случае находится из (6.30) при  $t = t_M$ . Для распространенного условия  $T_S \gg T_N$  и момента времени  $t_M$  имеем

$$k_a = 1 + \omega T_N (1 - e^{-t_M/T_N}). \quad (6.34)$$

При этом требования к трансформатору тока несколько облегчаются, так как период ненасыщенного состояния ТТ ограничивается временем  $t_M$ . В качестве примера на рис. 6.31 при-

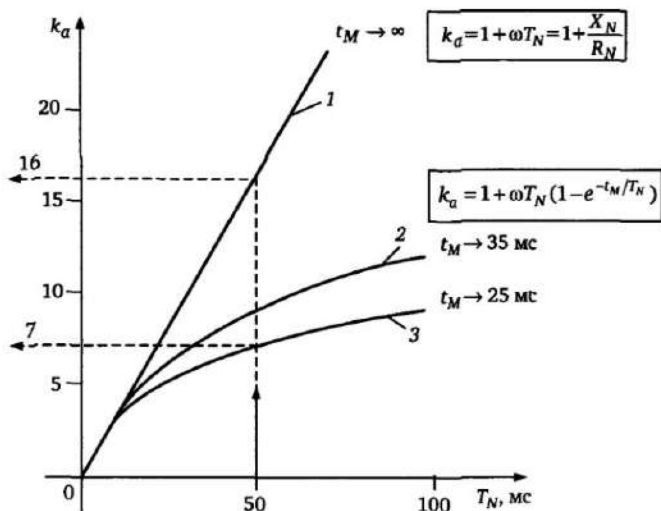


Рис. 6.31. Значение корректирующего коэффициента  $k_a$  при отсутствии учета (1) и учете (2, 3) времени, необходимого для срабатывания релейной защиты [8]

ведены зависимости  $k_a = f(T_N)$  для требований отсутствия насыщения в любое время ( $t_M = \infty$ ) в соответствии с (6.33) (прямая 1) и для заданных времен действия защиты  $t_M = 25$  мс и 35 мс в соответствии с (6.34).

Как видно из рис. 6.31, значения коэффициента  $k_a$  при ограниченном времени  $t_M = 25$  мс уменьшилось более чем в 2 раза по сравнению с результатом без учета времени действия защиты.

Еще более существенно снижает требования к ТТ способность дифференциальных защит правильно функционировать в первые моменты после возникновения КЗ при отсутствии насыщения (см. § 6.2 и 6.6). В этих случаях требования к продолжительности ненасыщенного состояния ТТ ограничиваются долями периода промышленной частоты. Граничное условие правильного действия при этом будет достигаться при более глубоком насыщении ТТ и значительно больших токах вследствие малых значений  $t_M$ . Выражение для корректирующего коэффициента  $k_a$  в этом случае определяется значительно более сложными соотношениями, чем выражение (6.30), вследствие того, что необходим также учет фазы гармонической составляющей в токе намагничивания. Зависимости  $k_a = f(T_N)$  при раз-

личных значениях времени  $t_M$  ненасыщенного состояния трансформатора [8] для малых  $t_M$  приведены на рис. 6.32.

Как видно из рис. 6.32, при допустимых временах ненасыщенного состояния  $t_M = 3-4$  мс коэффициент  $k_a$  может принимать значение меньше 1 даже при больших постоянных времени  $T_N$ , в то время как при  $t_M = 10$  мс значение  $k_a$  гораздо выше. Таким образом, требования к трансформаторам тока быстродействующих дифференциальных защит, функционирующих в первые 3—5 мс после возникновения КЗ, могут быть существенно снижены.

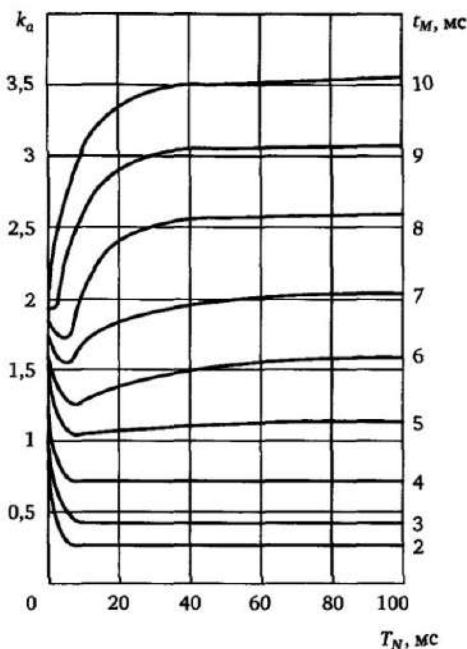


Рис. 6.32. Значение корректирующего коэффициента  $k_a$  при малых допустимых временах  $t$  ненасыщенного состояния ТТ

## Дистанционные защиты

## 7.1. Дистанционный принцип в защите линий электропередачи

Дистанционная защита (ДЗ) является одной из наиболее распространенных в релейной защите. Свое название «дистанционная» защита получила вследствие того, что контролируемый защитой параметр ЭС — комплексное сопротивление  $Z = U/I$  во многих случаях пропорционально расстоянию (дистанции) между местом установки защиты и местом КЗ.

На рис. 7.1,а приведена схема части ЭС с питанием от генераторов 1Г, 2Г, 3Г и системы С.

В точках ЭС А, Б, В, Г установлены защиты 1ДЗ — 6ДЗ, воздействующие соответственно на выключатели Q1—Q6. Одним из основных требований, предъявляемых к релейной защите, является обеспечение селективности — способности отключать минимальное количество элементов ЭС при устранении повреждения. В частности, для ЭС (рис. 7.1,а) необходимо, чтобы при КЗ на участке АВ были отключены только выключатели Q1, Q2, что устраняет питание места повреждения (точки K<sub>1</sub>) от источников электрической энергии, а при КЗ на участках БВ или ВГ — соответственно отключались только выключатели Q3, Q4 или Q5, Q6.

Во многих случаях требования селективности обеспечиваются применением дистанционного принципа релейной защиты, поясняемого на рис. 7.1. На каждый выключатель воздействует дистанционная защита, реагирующая на соотношения между напряжениями  $U$  и токами  $I$  в той точке ЭС, где она установлена. Эти сигналы подводятся к ДЗ от измерительных трансформаторов напряжения TV и измерительных трансформаторов тока ТА (на рис. 7.1,а показаны только для 1ДЗ). Свойства ДЗ описываются различными характеристиками, одной из которых является характеристика выдержки времени  $t = f(Z)$ , определяющая зависимость времени срабатывания ДЗ от сопротивления  $Z = U/I$ .

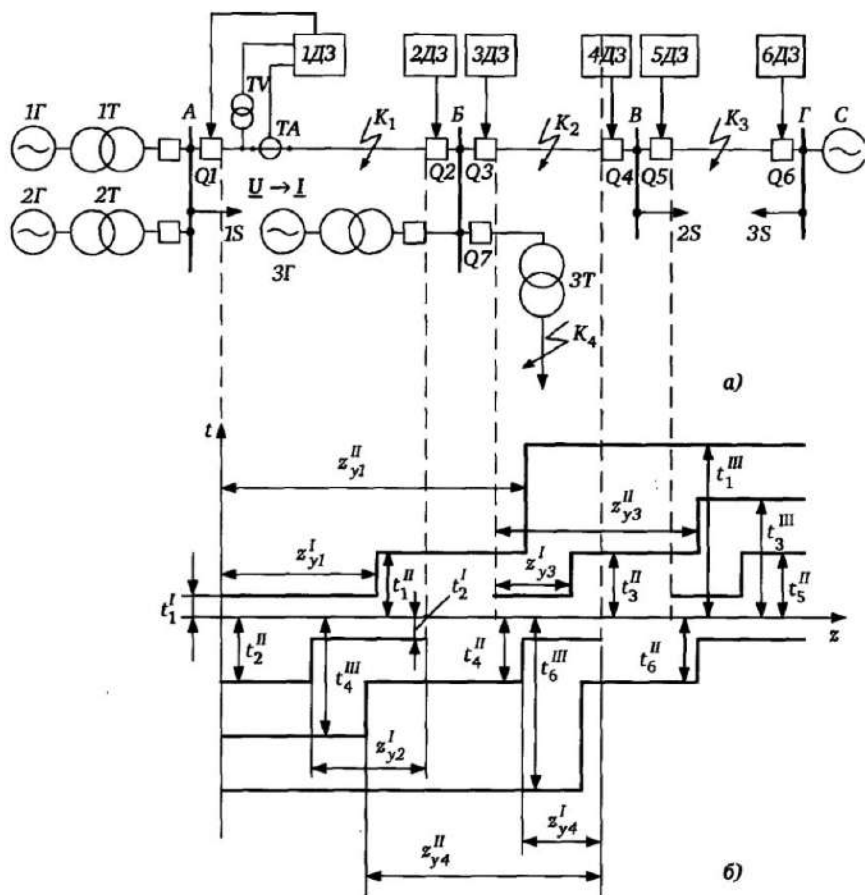


Рис. 7.1. Согласование уставок и характеристик выдержки времени ДЗ

измеряемого защитой. Так как  $\underline{Z} = ze^{j\varphi}$  — комплексный параметр, то полностью зависимость  $t = f(\underline{Z})$  не может быть отображена в плоскости. Для отображения этой зависимости в плоскости используют характеристики  $t = f(z)$ , где  $z = |\underline{Z}|$  при  $\varphi = \arg \underline{Z} = \text{const}$  (рис. 7.2).

При этом  $z^I, z^{II}, z^{III}$  — зоны действия I, II, III ступеней защит;  $t^I, t^{II}, t^{III}$  — выдержки времени I, II, III ступеней. Разность выдержек времени соседних ступеней определяет степень селективности  $\Delta t$ , выбираемая таким образом, чтобы с учетом возможных погрешностей выдержка времени последующей ступени была с запасом больше, чем у предыдущей.

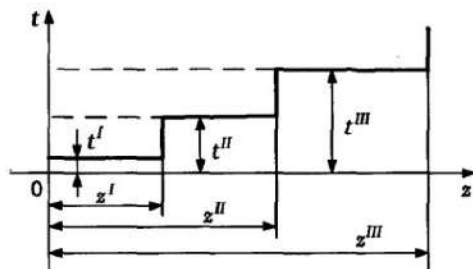


Рис. 7.2. Характеристика выдержки времени ДЗ

Для реализации отдельных ступеней ДЗ используются дистанционные органы (ДО), имеющие области срабатывания в комплексной плоскости сопротивлений с уставками  $z_y^I$ ,  $z_y^{II}$ ,  $z_y^{III}$  при определенных углах  $\varphi$ , и элементы выдержки времени I, II, III ступеней.

Параметр  $Z$ , на который реагирует ДЗ, является функцией многих факторов, но в первую очередь зависит от расстояния  $l$  между местом установки ДЗ и местом повреждения. В частности, при симметричном трехфазном повреждении  $K_1$  для нахождения  $\underline{U}$ ,  $I$  на входе защиты 1ДЗ (см. рис. 7.1,а) справедлива схема замещения, представленная на рис. 7.3, где  $E_c$  — эквивалентная ЭДС;  $Z_c$  — эквивалентное сопротивление системы;  $Z_k = Z_{уд} l_k$  — сопротивление между точкой А установки 1ДЗ и точкой  $K_1$ ;  $Z_{уд}$  — удельное сопротивление прямой последовательности ВЛ.

С учетом этого сопротивление на входе 1ДЗ равно

$$\underline{Z} = \frac{U}{I} = Z_{уд} l_k, \quad (7.1)$$

т.е. значение сопротивления  $Z$  пропорционально расстоянию  $l_k$  между местом установки защиты и местом повреждения и

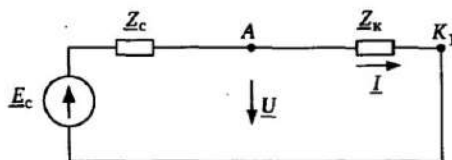


Рис. 7.3. Эквивалентная схема замещения ЭС при металлическом трехфазном КЗ

не зависит в рассматриваемом случае от режима ЭС, определяемого значениями  $E_c$  и  $Z_c$ . Таким образом, в данном случае по значению  $Z$  можно судить об удаленности места повреждения от места установки ДЗ. В общем случае  $Z$  определяется с учетом различных видов повреждений, наличия дуги в месте повреждения и ряда других факторов (см. ниже) не только величиной  $I_k$ . Существенная зависимость  $Z$  от  $I_k$  и меньшая зависимость  $Z$  от режимов ЭС (значений  $Z_c$ ,  $E_c$ ) являются определяющими при сравнении ДЗ с другими видами релейной защиты.

Рассмотрим обеспечение селективности отключений повреждений в ЭС (см. рис. 7.1) при использовании ДЗ со ступенчатыми характеристиками, представленными на рис. 7.2. Характеристики выдержки времени защит 1ДЗ—6ДЗ приведены на рис. 7.1,б. Индексы 1—6 внизу у обозначений зон  $z_{y1}$ — $z_{y6}$  и выдержек времени ступеней  $t_1$ — $t_6$  соответствуют номерам защит 1ДЗ—6ДЗ и выключателей Q1—Q6. Индексы I, II, III сверху соответствуют нумерации ступеней защит. Защиты являются направленными, т.е. имеют разные характеристики  $t = f(z)$  в зависимости от  $\varphi = \arg Z = \arg U/I$ .

В данном случае это означает, что защиты 1ДЗ, 3ДЗ, 5ДЗ срабатывают в соответствии с приведенными на рис. 7.1,б характеристиками, расположенными выше оси  $z$ , если место КЗ расположено справа от места установки ДЗ, а защиты 2ДЗ, 4ДЗ, 6ДЗ — при КЗ слева от места их установки (характеристики  $t = f(z)$  расположены ниже оси  $z$ ). Направленность защит соответствует действию при протекании токов  $I$  от шин в сторону защищаемого участка.

С учетом изложенного при повреждении в точке  $K_1$  на участке АБ в зонах  $z_{y1}^I$ ,  $z_{y2}^I$  срабатывают с минимальными временами  $t_1^I$  и  $t_2^I$  защиты 1ДЗ и 2ДЗ и отключают поврежденный участок АБ с обеих сторон выключателями Q1 и Q2, обеспечивая отсутствие тока КЗ через место повреждения.

Уставки первых ступеней защит  $z^I$  обычно выбираются таким образом, чтобы с учетом возможных погрешностей измерения  $z$  с необходимым запасом отстроить защиту от срабатывания без выдержки времени при КЗ в начале соседнего участка, например, защиту 1ДЗ при КЗ в точке  $K_2$ . В противном случае 1ДЗ срабатывает неселективно и отключает участок АБ при КЗ на участке БВ вблизи шин Б. С учетом этого сопротивление уставки  $z^I$  ступени I ДЗ выбирается из соотношения

$$z_y^I = k'_n z_{yd} l_l = k'_n z_l, \quad (7.2)$$

где  $z_l = z_{yd} l_l$  — длина всего защищаемого участка (например, АБ);  $k'_n$  — коэффициент надежности, имеющий значение меньше единицы ( $k'_n = 0,85 + 0,9$ ).

Так как уставки  $z_y^I, z_{y2}^I$  первых ступеней защит 1ДЗ, 2ДЗ с учетом (7.2) выбираются меньшими сопротивления участка АБ, то имеются участки по концам линии вблизи шин А и Б, при повреждениях на которых защита с противоположной стороны отключает повреждения с выдержкой времени второй ступени  $t^{II}$ . При этом выдержка времени  $t^{II}$  необходима для того, чтобы при КЗ в начале участка БВ отключение обеспечивалось защитой этого участка 3ДЗ без выдержки времени и ни в коем случае не ступенью I защиты 1ДЗ участка АБ (неселективное отключение).

При КЗ в точке  $K_1$  запускаются также защиты 4ДЗ, 6ДЗ, так как в местах их установки токи КЗ протекают от шин в линию. Однако при исправных защитах 1ДЗ и 2ДЗ участок АБ отключается быстрее, чем сработают указанные защиты, действующие при этом повреждении на выключатели Q4 и Q5 с временами  $t_4^{II}$  или  $t_4^{III}$  и  $t_6^{III}$ . Если же по каким-то причинам возникнет отказ защиты 2ДЗ, то повреждение  $K_1$  отключится защитой 4ДЗ с выдержкой  $t_4^{II}$  или  $t_4^{III}$  в зависимости от расположения точки  $K_1$  на участке АБ. При отказе защиты 4ДЗ повреждение отключится защитой 6ДЗ, действующей на выключатель Q6 с выдержкой времени ступени III  $t_6^{III}$ .

Аналогичным образом при КЗ в точке  $K_2$  на участке БВ повреждение отключается без выдержки времени защитами 3ДЗ и 4ДЗ (или с замедлением одной из защит при КЗ вблизи точек В или В). При отказе защиты 3ДЗ повреждение отключается с выдержкой времени  $t_1^{II}$  или  $t_1^{III}$  защитой 1ДЗ, действующей на Q1, а при отказе 4ДЗ — с выдержкой времени  $t_6^{II}$  или  $t_6^{III}$  защитой 6ДЗ, действующей на Q6. При КЗ в точке  $K_3$  на участке ВГ действие защиты 5ДЗ резервируется защитами 3ДЗ и 1ДЗ с выдержками времени  $t_3^{II}$  или  $t_3^{III}$  и  $t_1^{III}$ .

Таким образом, применение дистанционного принципа релейной защиты обеспечивает достаточно быстрое отключение повреждений первыми зонами защит в пределах 0,8—0,9 длины защищаемого участка линии электропередачи и многоступенчатое резервирование отключения защитами других участков.



Уставки вторых ступеней  $z_y^{\text{II}}$  выбираются таким образом, чтобы надежно охватить конец защищаемого участка, не охватываемый ступенью I, и резервировать с выдержкой времени ступени II действие ступени I защиты соседнего участка в начале линии. Так, значение  $z_{y1}^{\text{II}}$  защиты 1ДЗ должно охватить с запасом точку Б и начало участка БВ, где повреждения при отказе ЗДЗ резервируются 1ДЗ и отключаются с временем  $t_1^{\text{II}}$ .

Однако зона ступени II 1ДЗ не должна выходить за пределы зоны ступени I ЗДЗ, так как в противном случае при КЗ вне зоны действия ступени I ЗДЗ могут запуститься ступени II защит 1ДЗ и ЗДЗ с одинаковыми выдержками времени и произойти неселективное отключение повреждения на участке БВ защитой 1ДЗ при исправной защите ЗДЗ. С учетом этого уставка  $z_y^{\text{II}}$  ступени выбирается из условия отстройки от действия при повреждениях во второй зоне соседнего участка на основе соотношения (для защиты 1ДЗ)

$$z_{y1}^{\text{II}} < z_{л1} + z_{y3}^{\text{I}},$$

где  $z_{л1}$  — сопротивление защищаемого защитой «своего» участка (АБ для защиты 1ДЗ);  $z_{y3}^{\text{I}}$  — сопротивление уставки ступени I защиты ЗДЗ соседнего участка БВ. С учетом обеспечения запаса при отстройке имеем

$$z_{y1}^{\text{II}} \leq k'_n z_{л1} + k''_n z_{y3}^{\text{I}}, \quad (7.3)$$

Отметим, что в случаях, когда надежное обеспечение отстройки от неселективного действия ступени II по условию (7.3) затруднено из-за возможных погрешностей (малые значения  $z_{y3}^{\text{I}}$  по сравнению с  $z_{л1}$ ), необходимо дополнительное увеличение выдержки времени ступени II защиты первого участка, по крайней мере, на ступень селективности по сравнению с выдержкой времени ступени II защиты соседнего участка, т.е.  $t_1^{\text{II}} = t_2^{\text{II}} + \Delta t$ . Другим условием выбора  $z_{y1}^{\text{II}}$  является отстройка от КЗ в точке  $K_4$  за трансформатором ЗТ подстанции в конце участка АБ, при которой трансформатор отключается своими защитами со временем, большим или равным  $t^{\text{II}}$  (см. рис. 7.1). Это условие имеет вид

$$z_{y1}^{\text{II}} \leq k'_n z_{л1} + k''_n z_{\text{T}}, \quad (7.4)$$

где  $z_{\text{T}}$  — сопротивление трансформатора ЗТ.

В выражениях (7.3) и (7.4) не учитывается возможное неравенство токов в месте КЗ и в месте установки защиты.

В соответствии с (7.3), (7.4) обеспечивается селективное действие вторых ступеней защит соседних участков. Однако ступень II ДЗ должна полностью и с необходимым запасом охватить весь защищаемый участок, так как именно она обеспечивает отключение повреждений на противоположном конце линии (например, защита IДЗ при КЗ на участке АБ вблизи точки Б). Для обеспечения этого с учетом всех возможных погрешностей необходимо в большинстве случаев выполнение условия

$$z_{y1}^{II} \geq k_q z_{л1}, \quad (7.5)$$

где  $k_q$  — коэффициент чувствительности ( $k_q \geq 1,25$ ).

Уставки третьих ступеней ДЗ целесообразно выбирать таким образом, чтобы они надежно защищали не только свой, но и соседний участок, т.е. с запасом выполнялись условия

$$z_{y1}^{III} > z_{л1} + z_{л2}; \quad z_{y1}^{III} > z_{л1} + z_T, \quad (7.6)$$

где для защиты IДЗ  $z_{л1}$  и  $z_{л2}$  — сопротивления участков АБ и БВ. Одновременно необходима отстройка от срабатываний в нагрузочном режиме при отсутствии повреждений. Это условие обеспечивается соотношением

$$z_{y1}^{III} \leq k_n'' z_{н \min}, \quad (7.7)$$

где  $z_{н \min} = U_{н \min} / I_{н \max}$  — минимальное сопротивление на входе защиты в нагрузочном режиме;  $U_{н \min}$ ,  $I_{н \max}$  — минимальное напряжение и максимальный ток нагрузочного режима. В необходимых случаях должны выполняться условия обеспечения селективности, аналогичные (7.3) и (7.4).

Приведенное описание и соотношения являются в достаточной степени условными и ставят своей целью лишь иллюстрацию основных свойств дистанционного принципа релейной защиты. Например, не учитывается тот факт, что при дуговых замыканиях на защищаемом участке (точка  $K_1$ ), а также при повреждениях на соседних участках в зонах резервирования ступеней II и III (точки  $K_2$ ,  $K_3$ ) сопротивление на входе защиты IДЗ с учетом влияния ЭДС генераторов 1Г, 2Г, 3Г и системы не пропорционально расстоянию от точки А до мест повреждения. С учетом неодинаковости ЭДС генераторов и системы значение и угол входного сопротивления могут изменяться

в довольно больших диапазонах. Указанное существенно затрудняет обеспечение требований к селективности ДЗ и чувствительности с учетом охвата повреждений на удаленных участках резервными ступенями защит (см. § 7.3).

## 7.2. Сопротивления на входах ДЗ при металлических повреждениях

Как общий случай рассматриваются ДЗ, устанавливаемые в трехфазных сетях переменного тока (рис. 7.4).

Информация о состоянии ЭС определяется сигналами  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ , подводимыми к ДЗ от измерительного трансформатора напряжения  $TV$  и  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  — от измерительного трансформатора тока  $TA$ . В дальнейшем коэффициентами трансформации  $TV$  и  $TA$  для упрощения пренебрежем, так как в рассматриваемых линейных режимах они влияют лишь на масштабы получаемых характеристик, что легко учитывается при выборе уставок защит. Комбинируя напряжения и токи, можно получить в зависимости от значений коэффициентов  $a_1—a_3, b_1—b_3$  бесконечное число комплексных переменных  $\underline{Z}$  вида

$$\underline{Z} = \frac{a_1 \underline{U}_A + a_2 \underline{U}_B + a_3 \underline{U}_C}{b_1 \underline{I}_A + b_2 \underline{I}_B + b_3 \underline{I}_C}$$

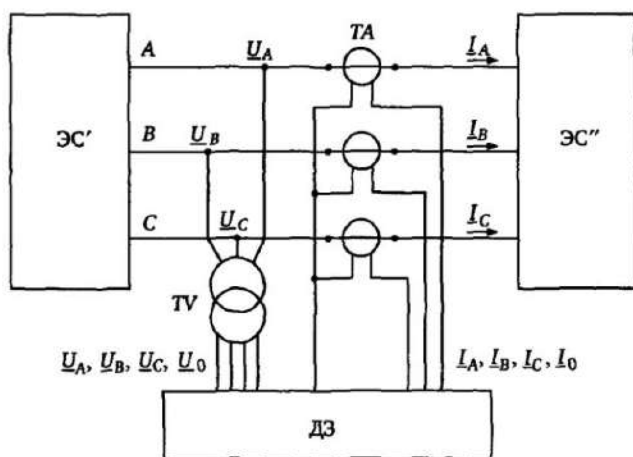


Рис. 7.4. Подведение входных величин к ДЗ

и анализировать в плоскостях этих переменных области срабатывания ДЗ при различных повреждениях в ЭС. Однако целесообразно использовать прежде всего следующие переменные  $Z$ :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{AB} &= \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = \frac{U_{AB}}{I_{AB}}; & \underline{Z}_{BC} &= \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} = \frac{U_{BC}}{I_{BC}}; \\ \underline{Z}_{CA} &= \frac{U_C - U_A}{I_C - I_A} = \frac{U_{CA}}{I_{CA}}; \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{U_A}{I_A + k_0 3I_0}; \quad \underline{Z}_{B0} = \frac{U_B}{I_B + k_0 3I_0}; \quad \underline{Z}_{C0} = \frac{U_C}{I_C + k_0 3I_0}. \quad (7.9)$$

где

$$I_0 = (I_A + I_B + I_C)/3. \quad (7.10)$$

Целесообразность использования переменных  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  на основе (7.8) и  $Z_{A0}$ ,  $Z_{B0}$ ,  $Z_{C0}$  на основе (7.9) при реализации ДЗ определяется тем, что при междуфазных КЗ и соответственно однофазных КЗ на ВЛ их значения дают наиболее полную информацию о расстоянии  $l_k$  между местом установки ДЗ и местом КЗ.

**Воздушная линия с сосредоточенными параметрами.** Проанализируем сопротивления на входе ДЗ, установленной в точке 1 ВЛ с двусторонним питанием, при трехфазных ( $K^{(3)}$ ), двухфазных ( $K^{(2)}$ ), двухфазных на землю ( $K^{(1,1)}$ ) металлических повреждениях (без переходного сопротивления) в точке  $K$  на расстоянии  $l_k$  от точки 1 (рис. 7.5, а—в).

Покажем, что в этих случаях все сопротивления по выражению (7.8) (при  $K^{(3)}$ ) или одно из них в зависимости от вида КЗ (при  $K^{(2)}$ ,  $K^{(1,1)}$ ) пропорциональны расстоянию  $l_k$ . Пусть  $Z_{1уд}$ ,  $Z_{2уд}$ ,  $Z_{0уд}$  — удельные сопротивления ВЛ (на единицу длины) соответственно для составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей трехфазной системы. Тогда полные сопротивления участка между точками 1 и  $K$  равны

$$Z_{1k} = Z_{1уд} l_k; \quad Z_{2k} = Z_{2уд} l_k; \quad Z_{0k} = Z_{0уд} l_k, \quad (7.11)$$

Эти соотношения справедливы для относительно коротких участков, когда распределенными параметрами ВЛ можно пре-

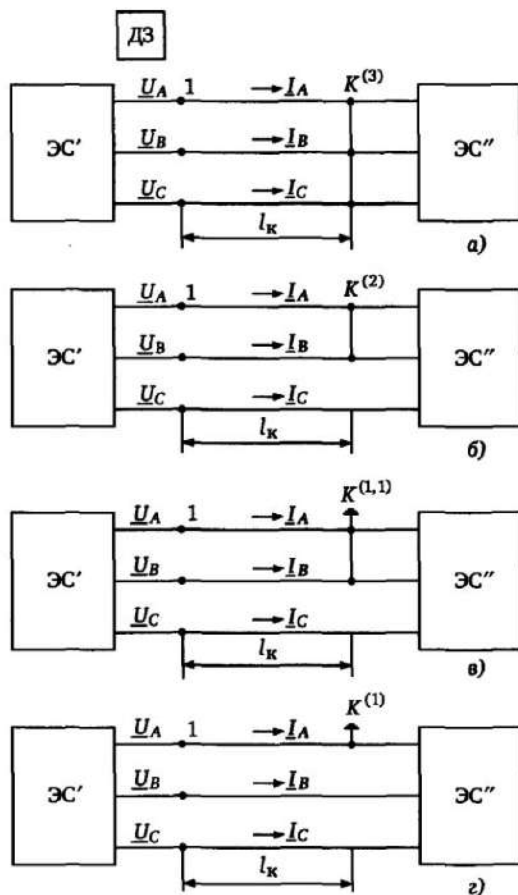


Рис. 7.5. Рассматриваемые виды повреждений

небрежь. Фазные токи  $I_A, I_B, I_C$  в месте установки защиты определяются через симметричные составляющие следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}; \\ I_B &= I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}; \\ I_C &= I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}. \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

Напряжение  $U_{AB}$  во всех схемах рис. 7.5 с учетом (7.11) и (7.12) равно

$$U_{AB} = I_{A1}Z_{1K} + I_{A2}Z_{2K} + I_0Z_{0K} - (I_{B1}Z_{1K} + I_{B2}Z_{2K} + I_0Z_{0K}). \quad (7.13)$$

В дальнейшем примем равными сопротивления прямой и обратной последовательностей ВЛ, т.е.  $Z_{1к} = Z_{2к}$ . Тогда с учетом того, что в (7.13) составляющие  $I_0 Z_{0к}$  сокращаются, имеем

$$\begin{aligned} U_{AB} &= I_{A1} Z_{1к} + I_{A2} Z_{1к} - (I_{B1} Z_{1к} + I_{B2} Z_{1к}) = \\ &= I_{A1} Z_{1к} + I_{A2} Z_{1к} + I_0 Z_{1к} - (I_{B1} Z_{1к} + I_{B2} Z_{1к} + I_0 Z_{1к}) = (I_A - I_B) Z_{1к}, \end{aligned}$$

откуда

$$Z_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = Z_{1к} = Z_{1уд} l_k. \quad (7.14)$$

При выводе выражения (7.14) вид повреждения не оговаривался, т.е. оно справедливо и для металлических повреждений  $K_{AB}^{(2)}, K_{AB}^{(1,1)}$  между фазами А, В и для  $K^{(3)}$ . При двухфазных повреждениях между другими фазами ВС и СА ( $K_{BC}^{(2)}, K_{BC}^{(1,1)}, K_{CA}^{(2)}, K_{CA}^{(1,1)}$ ) условие (7.14) не выполняется, однако при  $K_{BC}^{(2)}, K_{BC}^{(1,1)}$  аналогичными преобразованиями получим

$$Z_{BC} = \frac{U_{BC}}{I_B - I_C} = Z_{1к}, \quad (7.15)$$

а при  $K_{CA}^{(2)}, K_{CA}^{(1,1)}$

$$Z_{CA} = \frac{U_{CA}}{I_C - I_A} = Z_{1к}. \quad (7.16)$$

Таким образом, при двухфазных металлических КЗ одно из сопротивлений  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$  на входе ДЗ пропорционально удаленности  $l_k$ , а при трехфазных КЗ все три сопротивления пропорциональны  $l_k$ .

Несколько другие по форме соотношения имеют место при металлических однофазных КЗ на землю (рис. 7.5,з). В этом случае при  $K_{A0}^{(1)}$  с учетом  $Z_{1к} = Z_{2к}$  имеем

$$\begin{aligned} U_A &= I_{A1} Z_{1к} + I_{A2} Z_{1к} + I_0 Z_{0к} = \\ &= I_{A1} Z_{1к} + I_{A2} Z_{1к} + I_0 Z_{1к} + I_0 Z_{0к} - I_0 Z_{1к} = \end{aligned}$$

$$= I_A Z_{1K} + I_0 (Z_{0K} - Z_{1K}) = (I_A + k_0 3I_0) Z_{1K}, \quad (7.17)$$

где

$$k_0 = \frac{Z_{0K} - Z_{1K}}{3Z_{1K}} = k_r + jk_x. \quad (7.18)$$

Подставив соотношение (7.17) в (7.9), получим, что входное сопротивление ДЗ  $Z_{A0}$ , вычисляемое на основе (7.9), при КЗ  $K_{A0}^{(1)}$  пропорционально удаленности повреждения  $l_{ю}$  т.е.

$$Z_{A0} = \frac{U_A}{I_A + k_0 3I_0} = Z_{1K} = Z_{1уд} l_k. \quad (7.19)$$

Аналогично для КЗ  $K_{B0}^{(1)}$ ,  $K_{C0}^{(1)}$  имеем

$$\left. \begin{aligned} Z_{B0} &= \frac{U_B}{I_B + k_0 3I_0} = Z_{1K}, \\ Z_{C0} &= \frac{U_C}{I_C + k_0 3I_0} = Z_{1K}. \end{aligned} \right\} \quad (7.20)$$

С учетом (7.14)—(7.20) при изменении удаленности КЗ  $l_k$  вектор входного сопротивления (любого из рассмотренных) при металлических КЗ будет располагаться в комплексной плоскости сопротивлений, соответствующей рассматриваемому виду повреждения ( $Z_{AB}$  для  $K_{AB}^{(2)}$  или  $K^{(3)}$ ;  $Z_{B0}$  для  $K_{B0}^{(1)}$  и т.д.), на прямой, проходящей через начало координат под углом  $\varphi_k = \arg Z_{1уд}$ , причем модуль вектора будет пропорционален  $l_k$  (рис. 7.6).

Воздушная линия с распределенными параметрами. В случае, когда ДЗ установлена на протяженной ВЛ, распределенными параметрами линии пренебречь нельзя и необходимо использовать следующие уравнения, связывающие напряжения  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$  и токи  $I_1$ ,  $I_2$  в точках 1 и 2 (рис. 7.7,а) в симметричном режиме:

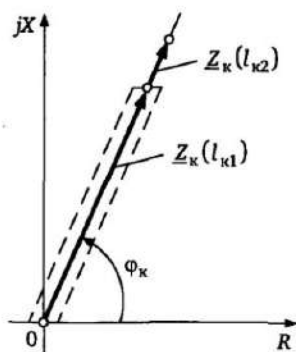


Рис. 7.6. Входное сопротивление ДЗ при различных удаленностях КЗ

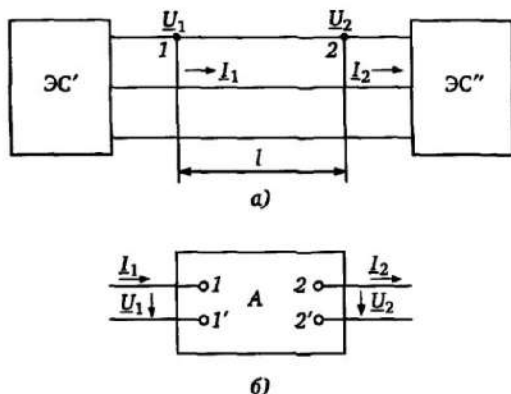


Рис. 7.7. К нахождению сопротивления на входе ДЗ при КЗ на протяженной ВЛ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} l; \\ \underline{I}_1 &= \frac{1}{\underline{Z}_c} \underline{U}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l, \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

где

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{R_{уд} + j\omega_0 L_{уд}}{j\omega_0 C_{уд}}}; \quad (7.22)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_{уд} + j\omega_0 L_{уд}) j\omega_0 C_{уд}} = \alpha + j\beta; \quad (7.23)$$

$R_{уд}$ ,  $L_{уд}$ ,  $C_{уд}$  — удельные активное сопротивление, индуктивность и емкость линии соответственно;  $\underline{Z}_c$  — волновое сопротивление;  $\underline{\gamma}$  — коэффициент распространения волны;  $\omega_0$  — угловая промышленная частота.

Система (7.21) соответствует уравнениям четырехполюсника (рис. 7.7,б) в форме А

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{11} \underline{U}_2 + \underline{A}_{12} \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{21} \underline{U}_2 + \underline{A}_{22} \underline{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (7.24)$$

где  $\underline{A}_{11} = \operatorname{ch} \underline{\gamma} l$ ;  $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\gamma} l$ ;  $\underline{A}_{21} = (1/\underline{Z}_c) \operatorname{sh} \underline{\gamma} l$ ;  $\underline{A}_{22} = \operatorname{ch} \underline{\gamma} l$ .



Входное сопротивление  $Z_k$  четырехполюсника со стороны зажимов 1, 1' при закороченных выходных зажимах получим из (7.21) при  $U_2 = 0$

$$Z_k = \frac{U_1}{I_1} = Z_c \operatorname{th} \gamma l. \quad (7.25)$$

Сопротивление  $Z_k$  представляет собой сопротивление короткозамкнутой ВЛ длиной  $l$ , измеряемое ДЗ. С учетом (7.25) при различных видах металлических повреждений на протяженной ВЛ (см. рис. 7.5) сопротивления на входе ДЗ также описываются соотношениями (7.14) — (7.16), (7.19), (7.20) при замене

$$Z_{1уд} l_k = Z_c \operatorname{th} \gamma l_k. \quad (7.26)$$

На рис. 7.8 приведены зависимости  $|Z_k| = f(l)$  (кривая 1) и  $\varphi_k = \arg Z_k = f(l)$  (кривая 2) при трехфазном КЗ для ВЛ 750 кВ [ $R_{уд} = 0,014$  Ом/км;  $X_{уд} = \omega_0 L_{уд} = 0,281$  Ом/км;  $B_{уд} = \omega_0 C_{уд} = 4,05 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·км)].

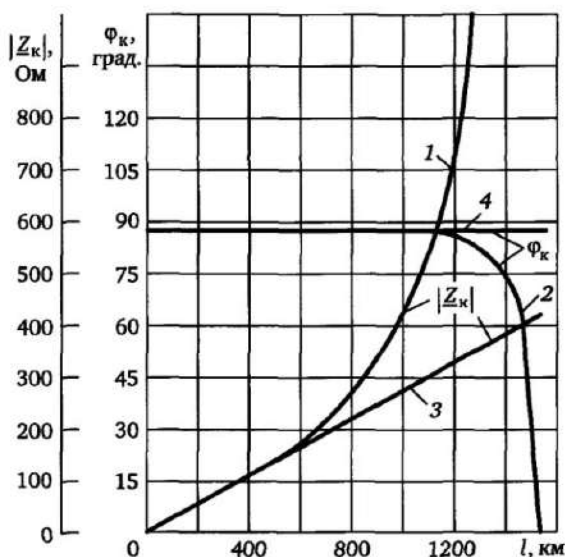


Рис. 7.8. Входные параметры короткозамкнутой протяженной ВЛ напряжением 750 кВ

Определенные на основе (7.22), (7.23) параметры ВЛ по прямой последовательности равны: модуль волнового сопротивления  $z_c = 264 \text{ Ом}$ ;  $\alpha = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ 1/км}$ ;  $\beta = 0,06 \text{ град./км}$ . Для сравнения на рис. 7.8 приведены значения  $|Z_k| = f(l)$  (прямая 3) и  $\varphi_k = f(l)$  (прямая 4) для этой же ВЛ при пренебрежении поперечной распределенной емкостью (в этом случае  $Z_{\text{уд}} = R_{\text{уд}} + jX_{\text{уд}} = (0,014 + j0,281) \text{ Ом/км}$ ;  $\varphi_k = 87^\circ$ ). Как видно из рис. 7.8, существенные различия замера по модулю при отсутствии учета распределенной емкости начинаются с 500 км, а по углу — с 1000 км. Рассматривая установившиеся режимы протяженной ВЛ до 1000 км, можно в первом приближении принять  $\text{ch } \underline{\gamma}l \approx \cos \beta l$ ;  $\text{sh } \underline{\gamma}l \approx j \sin \beta l$ . В этом случае из (7.21) при  $K^{(2)}$  имеем

$$Z_{1k} = jZ_c \text{tg} \beta l_k; \quad \varphi_k \approx \pi/2. \quad (7.27)$$

В переходных режимах учитывать распределенные параметры ВЛ необходимо при значительно меньших  $l_k$ .

### 7.3. Сопротивления на входах ДЗ при переходном сопротивлении в месте КЗ

#### 7.3.1. Междуфазные КЗ

Во многих случаях замыкания фаз между собой или на землю происходят через сопротивления (дугу, опору и т.д.). При этом переходное сопротивление  $R_{\text{п}}$  носит активный характер. При наличии переходного сопротивления участок трехфазной цепи становится несимметричным по сопротивлениям отдельных фаз. Для удобства использования метода симметричных составляющих целесообразно сделать трехфазную цепь симметричной, добавив в месте КЗ сопротивления и в неповрежденные фазы (рис. 7.9).

При этом анализ сводится к рассмотрению металлического повреждения в симметричной трехфазной цепи, включающей переходные сопротивления. В общем случае при дуговом повреждении в ЭС с двусторонним питанием (рис. 7.10) получим аналогично (7.13) значение напряжения  $\underline{U}_{AB}$  в месте установки ДЗ

$$\underline{U}_{AB} = I_{A1}Z_{1k} + I_{A2}Z_{1k} + I_0Z_{0k} + (I'_{A1} + I'_{A2} + I'_0)R_{\text{п}} -$$

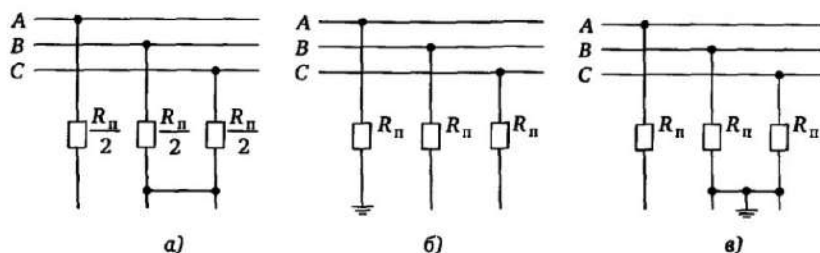


Рис. 7.9. Замыкание через переходные сопротивления:  
 а — двухфазное КЗ; б — однофазное КЗ; в — двухфазное КЗ на землю

$$\begin{aligned}
 & -[I_{B1}Z_{1к} + I_{B2}Z_{1к} + I_0Z_{0к} + (I'_{B1} + I'_{B2} + I'_0)R_{п}] = \\
 & = (I_A - I_B)Z_{1к} + (I'_A - I'_B)R_{п},
 \end{aligned}$$

откуда следует

$$Z_{AB} = Z_{1к} + Z_{п} = Z_{1уд}l_{к} + Z_{п}, \quad (7.28)$$

где

$$Z_{п} = k_p R_{п}; \quad k_p = \frac{I'_A - I'_B}{I_A - I_B}; \quad (7.29)$$

$k_p$  — комплексный, в общем случае, коэффициент распределения токов, учитывающий неодинаковость токов в месте КЗ и в месте установки защиты.

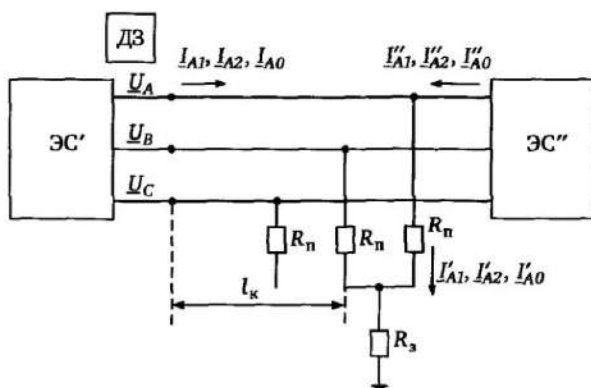


Рис. 7.10. Замыкание через переходное сопротивление на ВЛ с двусторонним питанием

Выражение (7.29) справедливо для любого вида междуфазного повреждения ( $K^{(3)}$ ,  $K^{(2)}$ ,  $K^{(1.1)}$ ). Отличие будет лишь в значении  $R_{\Pi}$ . При  $K^{(2)}$  имеем  $R_{\Pi} = (1/2)r_{\Delta}$ ; при  $K^{(3)}$   $R_{\Pi} = (1/3)r_{\Delta}$ , где  $r_{\Delta}$  — сопротивление дуги между фазами. Аналогичные соотношения имеют место и для входных сопротивлений  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$ .

Из (7.28), (7.29) вытекает, что в плоскости сопротивлений точки  $Z_{AB}$ ,  $Z_{A0}$  при дуговых замыканиях уже не находятся при различных  $l_k$  на прямой, соответствующей характеристике короткозамкнутой ВЛ (см. рис. 7.6). В простейшем случае при одностороннем питании (отключение ВЛ со стороны ЭС' на рис. 7.10) имеем  $I_A'' = 0$ ;  $I_A = I_A'$ ;  $I_B'' = 0$ ;  $I_B = I_B'$ , т.е. ток  $I_A$  в линии и переходном сопротивлении одинаков. При этом  $k_p = 1$  и из (7.28) имеем

$$Z_{AB} = Z_{1k} + R_{\Pi}. \quad (7.30)$$

Линия входного сопротивления 2 сдвинется при этом на величину  $R_{\Pi}$  по отношению к характеристике 1 короткозамкнутой ВЛ (рис. 7.11), где заштрихованная область соответствует возможным значениям измерения при любых значениях переходного сопротивления, меньших  $R_{\Pi}$ , и изменению места КЗ на ВЛ (длины  $l_k$ ).

В более общем случае двустороннего питания амплитуды и фазы токов на входах ДЗ и протекающих через сопротивление  $R_{\Pi}$  не равны ( $k_p \neq 1$ ), и замер определяется выражениями (7.28)

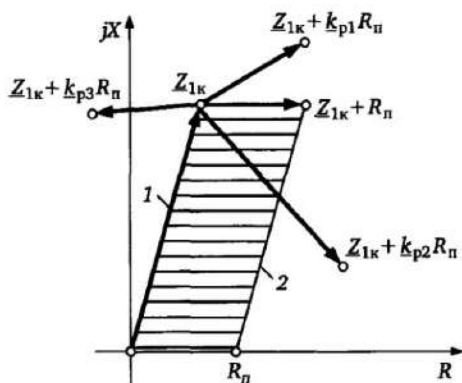


Рис. 7.11. Область измерений ДЗ при КЗ через переходное сопротивление (ВЛ с сосредоточенными параметрами)

и (7.29). В зависимости от значения  $k_p$ , определяемого в первую очередь соотношениями между сопротивлениями систем ЭС, ЭС', модулями и фазами эквивалентных ЭДС, а также местом КЗ на ВЛ, результаты измерения  $\underline{Z}_{AB}$  различны (рис. 7.11) и в общем случае могут располагаться в различных квадрантах плоскости  $\underline{Z}$  (например, при  $k_p = k_{p3}$  в квадранте II).

Данные явления могут приводить к отказу действия защит при КЗ на защищаемом участке из-за подпитки места КЗ при наличии переходного сопротивления током от противоположной части ЭС и расположения вследствие этого вектора входного сопротивления вне характеристики срабатывания защиты. Если одна из защит, расположенных по концам участка, срабатывает, то другая защита может сработать после отключения линии с противоположного конца и исчезновения подпитки места КЗ, что возвращает вектор  $\underline{Z}$  в область срабатывания. Такое действие защиты называется каскадным.

При дуговом повреждении на протяженной ВЛ однолинейная схема для анализа замера имеет вид рис. 7.12, где  $R_n$  — переходное сопротивление, приведенное к фазным величинам; А — четырехполюсник, характеризующий ВЛ между точками 1 и К.

С учетом рис. 7.12 напряжение на выходе четырехполюсника  $U_2 = R_n I_2'$ , что эквивалентно подключению к выходу А комплексного сопротивления

$$\underline{Z}_n = \frac{U_2}{I_2} = R_n \frac{I_2'}{I_2} = k_p R_n, \quad (7.31)$$

где  $k_p = I_2'/I_2$  — коэффициент разветвления.

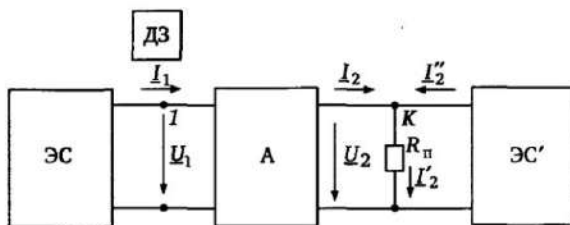


Рис. 7.12. Эквивалентная схема анализа результатов измерений при КЗ через переходное сопротивление на протяженной ВЛ

Решая систему (7.21) для протяженной ВЛ длиной  $l_k$ , с учетом (7.31) имеем сопротивление  $\underline{Z}$  на входе ДЗ

$$\underline{Z} = \frac{U_1}{I_1} = Z_c \frac{\underline{Z}_n + Z_c \operatorname{th} \gamma l_k}{\underline{Z}_n \operatorname{th} \gamma l_k + Z_c}. \quad (7.32)$$

При пренебрежении активными потерями в ВЛ имеем с достаточной степенью точности  $\operatorname{th} \gamma l_k = j \operatorname{tg} \beta l_k$ ;  $\arg Z_c \approx 0$ , т. е.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_n + j z_c \operatorname{tg} \beta l_k}{j \underline{Z}_n \operatorname{tg} \beta l_k + z_c}. \quad (7.33)$$

При одностороннем питании  $\underline{Z}$  определяется выражениями (7.32) и (7.33) при  $k_p = 1$ , т. е. при  $\underline{Z}_n = R_n$ . При этом в отличие от рис. 7.11 область измерения не определяется сдвигом характеристики ВЛ на величину  $R_n$  так как (7.33) является дробно-линейным преобразованием. Для нахождения области измерения преобразуем (7.33) следующим образом:

$$j \operatorname{tg} \beta l_k = - \frac{z_c}{\underline{Z}_n} \frac{(\underline{Z} - \underline{Z}_n)}{(\underline{Z} - z_c^2 / \underline{Z}_n)}. \quad (7.34)$$

При изменении  $l_k$  в диапазоне  $0 \leq l_k \leq \pi / (2\beta)$ , что соответствует длине ВЛ, меньшей четверти волны ( $\beta l_k \leq \pi / 2$ ), аргумент левой части (7.34) постоянен и равен  $\pi / 2$ . Следовательно,

$$\arg \left( - \frac{z_c}{\underline{Z}_n} \frac{(\underline{Z} - \underline{Z}_n)}{(\underline{Z} - z_c^2 / \underline{Z}_n)} \right) = \frac{\pi}{2},$$

и с учетом  $\arg Z_c \approx 0$  получим окончательно

$$\arg \frac{\underline{Z} - \underline{Z}_n}{\underline{Z} - z_c^2 / \underline{Z}_n} = \frac{3\pi}{2} + \arg \underline{Z}_n. \quad (7.35)$$

В приложении 1 рассмотрены области и характеристики, определяемые отображением областей, ограниченных прямолинейными характеристиками, проходящими через начало координат, в одной комплексной плоскости  $\underline{w}$ , на другую комплексную плоскость  $\underline{Z}$  с помощью дробно-линейного преобразования.

Выражение (7.35) аналогично выражению (П1.5). При этом соотношение (7.34), полученное на основе дробно-линейного преобразования, можно трактовать как отображение луча, совпадающего с положительной мнимой осью ( $j \operatorname{tg} \beta l_k$ ), на плоскость  $\underline{Z}$ . Из приложения 1 имеем, что условию (7.35) удовлетворяют точки  $\underline{Z}$ , расположенные на дуге окружности, опирающейся на особые точки  $\underline{b} = z_c^2 / \underline{Z}_n$ ,  $\underline{a} = \underline{Z}_n$  с вписанным углом  $\alpha = (3/2)\pi + \arg \underline{Z}_n$  (рис. 7.13,а).

Рисунок 7.13,а соответствует общему случаю (см. рис. 7.12), когда при двустороннем питании эквивалентное сопротивление в месте КЗ  $\underline{Z}_n = k_p R_n$  носит комплексный характер ( $\underline{Z}_n = 100 e^{-j20^\circ}$  Ом;  $z_c = 264$  Ом).

На рис. 7.13,б приведена кривая замера при дуговом замыкании на ВЛ напряжением 750 кВ при  $0 \leq l_k \leq 600$  км при одностороннем питании (ток  $I_2'' = 0$ ) при  $\underline{Z}_n = R_n = 50$  Ом ( $k_p = 1$ ). Пунктиром обозначена линия входного сопротивления при пренебрежении распределенными параметрами ВЛ.

Как видно из рис. 7.13, распределенные параметры ВЛ при дуговых замыканиях обуславливают большие отклонения замера от характеристики короткозамкнутой ВЛ, не пропорциональные значению  $\underline{Z}_n$ , по сравнению с сосредоточенными параметрами (см. рис. 7.11). Указанное вызвано различием соотноше-

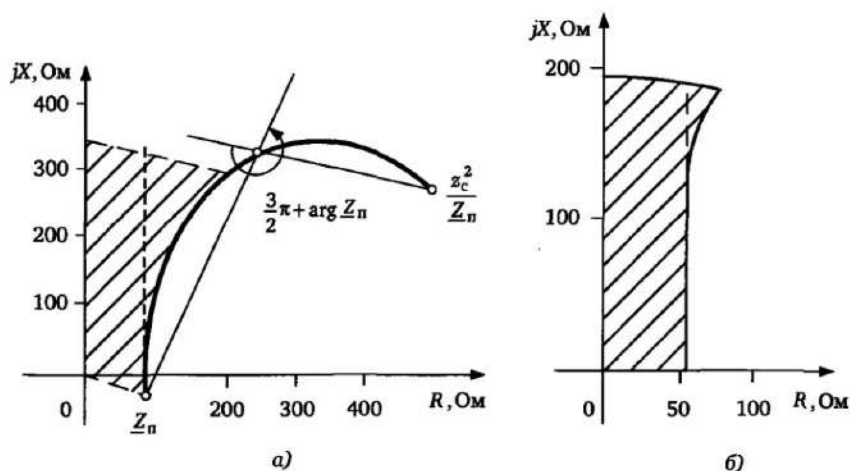


Рис. 7.13. Области измерений при КЗ через переходное сопротивление на протяженной ВЛ при  $z_c = 264$  Ом:  
а —  $\underline{Z}_n = 100 e^{-j20^\circ}$  Ом; б —  $\underline{Z}_n = 50$  Ом

ний (7.28), (7.33), определяющих замер на ВЛ, а также соотношений (7.30) и (7.33). Область возможных измерений при меньших значениях модуля переходного сопротивления, в том числе и равных нулю (при металлических повреждениях), заштрихована на рис. 7.13.

### 7.3.2. Однофазные КЗ

Наличие переходного сопротивления в месте однофазного КЗ искажает замер ДО, фиксирующих однофазные КЗ путем измерения комплексных сопротивлений фаза—земля  $Z_{A0}$ ,  $Z_{B0}$ ,  $Z_{C0}$  на основе соотношений (7.19), (7.20). Однако характер искажения замера даже при одностороннем питании в данном случае отличается от случая междуфазных КЗ (см. рис. 7.11).

Указанное обусловлено тем, что для обеспечения правильного измерения при однофазном КЗ (в отличие от междуфазных КЗ) необходимо иметь в соответствии с выражениями (7.18) и (7.19) дополнительные данные, характеризующие сопротивление нулевой последовательности петли замера  $Z_{0к}$ .

Эквивалентную петлю замера при однофазном КЗ можно получить, преобразовав выражение (7.17) к виду

$$U_A = I_A Z_{1к} + 3I_0(Z_{0к} - Z_{1к})/3 = I_A Z_{1к} + 3I_0 Z_E,$$

где

$$Z_E = (Z_{0к} - Z_{1к})/3 \quad (7.36)$$

Эквивалентная схема петли замера, включающая сопротивления  $Z_{1к}$  и  $Z_E$ , приведена на рис. 7.14.

Коэффициент компенсации  $k_0$  с учетом (7.18) при этом равен

$$k_0 = \frac{Z_E}{Z_{1к}}. \quad (7.37)$$

Вычислить комплексное сопротивление  $Z_{1к}$  из выражения (7.19) можно различными методами — используя, например, полные составляющие векторов или их ортогональные составляющие.

При металлических КЗ, которым соответствуют выражения (7.17)—(7.20), результаты получаются, естественно, одинаковыми. Однако при КЗ через переходное сопротивление различным



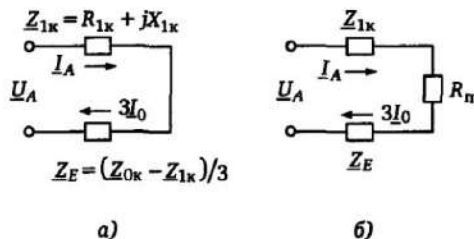


Рис. 7.14. Эквивалентные петли замера при однофазном КЗ в случае одностороннего питания:

а — металлическое КЗ; б — КЗ через переходное сопротивление  $R_n$

методам вычисления соответствуют различные ошибки измерения, вносимые сопротивлением  $R_n$ . Ниже рассматриваются применяемые в практике методы [32] вычисления  $Z_{1к}$  при однофазных КЗ и области измерения при наличии переходного сопротивления  $R_n$  в месте КЗ для одностороннего питания.

**Вариант 1. Использование комплексного коэффициента компенсации  $k_0$  [см. (7.18)].**

При однофазном КЗ в ЭС с односторонним питанием при наличии переходного сопротивления в месте КЗ справедлива схема, показанная на рис. 7.14,б, для которой с учетом выражений (7.18) и (7.36) справедливы соотношения:

$$\underline{U}_A = I_A \underline{Z}_{1к} + 3I_0 \underline{Z}_E + R_n I_A;$$

$$\frac{\underline{U}_A}{I_A + k_0 3I_0} = \underline{Z}_{1к} + \frac{R_n I_A}{I_A + k_0 3I_0}.$$

Учитывая, что при одностороннем питании  $I_A = 3I_0$ , можно представить данное выражение в виде

$$\underline{Z}_{изм} = \underline{Z}_{1к} + R_n \frac{1}{1 + k_0} = \underline{Z}_{1к} + \underline{\Delta Z}, \quad (7.38)$$

где  $\underline{Z}_{изм}$  — измеряемое сопротивление прямой последовательности;  $\underline{Z}_{1к}$  — действительное сопротивление прямой последовательности;

$\underline{\Delta Z} = \frac{R_n}{1 + k_0}$  — ошибка измерения, вносимая наличием переходного сопротивления.

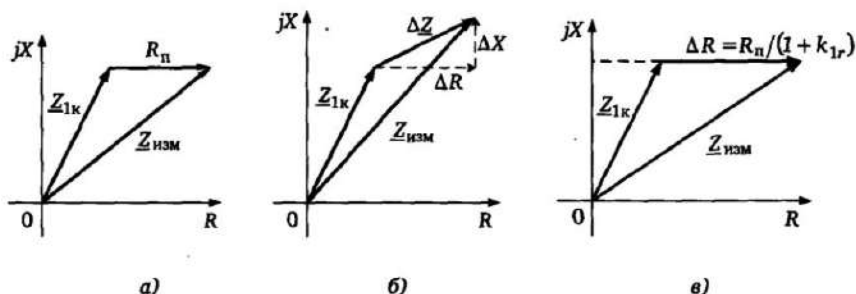


Рис. 7.15. Замер ДО при КЗ через переходное сопротивление  $R_{п}$  и различных вариантах измерения:  
 а — при междуфазном или однофазном КЗ и измерении по варианту 3; б — при однофазном КЗ и измерению по варианту 1; в — при однофазном КЗ и измерении по варианту 2

Сравнивая выражения (7.38) и (7.30) можно сделать вывод, что при наличии переходного сопротивления замеры  $\underline{Z}$  при однофазном и междуфазном КЗ при одностороннем питании различаются. В отличие от замеров при междуфазном КЗ (рис. 7.15,а), при однофазном КЗ к сопротивлению линии  $Z_{к}$  добавляется в общем случае комплексная величина  $\Delta \underline{Z} = R_{п} / (1 + k_{0})$  (рис. 7.15,б).

В рассматриваемом варианте измерения 1 вносимые в замер дополнительные составляющие измерения  $\Delta R$  и  $\Delta X$  (рис. 7.15,б) с учетом соотношения (7.38) равны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= \operatorname{Re} \Delta \underline{Z} = \operatorname{Re} \left( \frac{R_{п}}{1 + k_{0}} \right); \\ \Delta X &= \operatorname{Im} \Delta \underline{Z} = \operatorname{Im} \left( \frac{R_{п}}{1 + k_{0}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7.39)$$

**Вариант 2. Использование вещественных коэффициентов  $R_E/R_{1к}$  и  $X_E/X_{1к}$  [9].**

В соответствии с рис. 7.14,а и соотношением (7.36) имеем:

$$\underline{U}_A = I_A Z_{1к} + 3I_0 Z_E.$$

При одностороннем питании ( $I_A = 3I_0$ ) уравнение эквивалентной петли можно записать в форме

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A [(R_{1к} + jX_{1к}) + (R_E + jX_E)],$$

откуда получим

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} &= (R_{1к} + R_E) + j(X_{1к} + X_E) = \\ &= R_{1к} \left( 1 + \frac{R_E}{R_{1к}} \right) + jX_{1к} \left( 1 + \frac{X_E}{X_{1к}} \right). \end{aligned} \quad (7.40)$$

Из выражения (7.40) имеем два уравнения для вещественных чисел

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \left( \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} \right) &= R_{1к} \left( 1 + \frac{R_E}{R_{1к}} \right); \\ \operatorname{Im} \left( \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} \right) &= X_{1к} \left( 1 + \frac{X_E}{X_{1к}} \right), \end{aligned}$$

откуда искомым замер ДО  $Z_{1к} = R_{1к} + jX_{1к}$  определяется соотношениями:

$$R_{1к} = \frac{\operatorname{Re} \left( \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} \right)}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}}; \quad (7.41)$$

$$X_{1к} = \frac{\operatorname{Im} \left( \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} \right)}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}}. \quad (7.42)$$

При наличии переходного сопротивления  $R_{п}$  (рис. 7.14,б) для случая одностороннего питания имеем

$$\frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} = \underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_E + R_{п} = R_{1к} + R_E + R_{п} + j(X_{1к} + X_{1E}).$$

Используя выражения (7.41) и (7.42) получим составляющие  $R_{изм} + jX_{изм}$  измеряемого сопротивления:

$$R_{\text{изм}} = \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{U_A}{I_A}\right)}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}} = R_{1к} + \frac{R_{\text{п}}}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}}; \quad (7.43)$$

$$X_{\text{изм}} = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_A}{I_A}\right)}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}} = X_{1к}. \quad (7.44)$$

В соответствии с выражением (7.44), в отличие от варианта 1, реактивная составляющая  $X_{1к}$  сопротивления  $Z_{1к}$  измеряется верно и при наличии переходного сопротивления  $R_{\text{п}}$  (рис. 7.15,б), а переходное сопротивление вводится с коэффициентом  $1/(1 + R_E/R_{1к})$ .

**Вариант 3. Расширенное использование вещественных коэффициентов  $R_E/R_{1к}$  и  $X_E/X_{1к}$ .**

Данный вариант основан на том, что при правильно вычисляемом в соответствии с соотношением (7.44) реактивном сопротивлении можно найти и значение активного сопротивления линии  $R_{1к} = X_{1к} \operatorname{ctg} \varphi_{к}$ , где  $\varphi_{к}$  — известный угол линии. При заданном коэффициенте  $R_E/R_{1к}$  значение  $R_E$  определяется соотношением

$$R_E = \frac{R_E}{R_{1к}} R_{1к} = \frac{R_E}{R_{1к}} X_{1к} \operatorname{ctg} \varphi_{к}.$$

Если  $R_{\Sigma} = \operatorname{Re}(U_A/I_A)$  — общее активное сопротивление эквивалентной петли (см. рис. 7.14,б), то суммарное значение активного сопротивления и сопротивления дуги определяется соотношением

$$R_{1к} + R_{\text{п}} = R_{\Sigma} - R_E = \operatorname{Re}\left(\frac{U_A}{I_A}\right) - \frac{R_E}{R_{1к}} X_{1к} \operatorname{ctg} \varphi_{к}, \quad (7.45)$$

где

$$X_{1к} = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_A}{I_A}\right)}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}}.$$

Таким образом, неискаженные  $X_{1к}$  и  $R_{1к} + R_{п}$  измерения в варианте 3 определяются с использованием выражений (7.42) и (7.45). Как и для междуфазного КЗ, указанному случаю соответствует замер комплексного сопротивления (см. рис. 7.15,а).

Отметим, что связь между коэффициентами  $k_0$ ,  $R_E/R_{1к}$  и  $X_E/X_{1к}$ , определяется соотношением

$$k_0 = \frac{Z_E}{Z_L} = \frac{R_E + jX_E}{R_{1к} + jX_{1к}} = \frac{\frac{R_E}{R_{1к}} + j\frac{X_E}{X_{1к}}}{1 + j\frac{X_{1к}}{R_{1к}}} \quad (7.46)$$

### 7.3.3. Влияние сопротивления электрической дуги и переходного сопротивления опоры на дистанционное измерение

Электрическая дуга может быть представлена в первом приближении активным нелинейным сопротивлением, так как первые гармоники тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  совпадают по фазе (рис. 7.16).

Ввиду сложности процессов и влияния многих факторов на горение дуги сопротивление дуги оценивается приближенно. В первом приближении можно принять модуль напряжения дуги на единицу длины постоянным  $U_d^*$ , определяемым только ее длиной  $l_d$  и независимым от тока ток  $I_d$ . В этом случае сопротивление дуги  $R_d$  определяется соотношением  $R_d = U_d^* l_d / I_d$ . Значение  $U_d^*$ , В/м, в различных источниках колеблется в пределах 1000—3000 В/м (действующее значение). В практических рас-

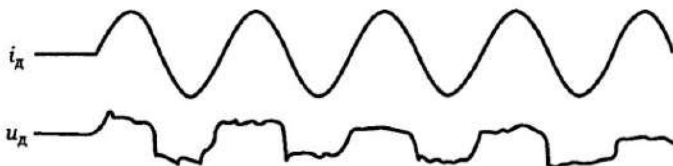


Рис. 7.16. Ток и напряжение электрической дуги

четах используют значение  $U_d = 2500$  В/м. При этом сопротивления дуги, Ом, равно:

$$R_d = \frac{2500 l_d}{I_d}, \quad (7.47)$$

где  $I_d$  — ток, протекающий через дугу, А;  $l_d$  — длина дуги, м.

Более точное приближение дает формула Варрингтона [33]

$$R_d = \frac{28700 l_d}{I_d^{1,4}}, \quad (7.48)$$

где  $l_d$  — длина дуги, мм.

Для медленнодействующих резервных ступеней РЗ, когда отключение происходит с выдержкой времени, необходимо учитывать существенное возрастание длины дуги  $l_d$  вследствие влияния ветра и динамических усилий в самой дуге. В этом случае для нахождения результирующего сопротивления дуги может быть использовано соотношение [33]

$$R_{d,рез} = R_d \left( 1 + \frac{5Vt}{l_d} \right), \quad (7.49)$$

где  $R_d$  — сопротивление дуги в начальный момент;  $l_d$  — длина дуги в начальный момент;  $V$  — скорость ветра;  $t$  — время горения дуги.

**Расчетное переходное сопротивление  $R_{пв}$ , вносимое электрической дугой при двустороннем питании.** При двустороннем питании (см. рис. 7.12) более точные результаты получаются при учете нелинейности дуги, т.е. при принятии в первом приближении напряжения дуги  $U_d$  постоянным и независимым от тока  $I_d$ . Указанное обусловлено различием токов  $I$  и  $I_d$ , протекающих через защиту и через дугу. При данном допущении (рис. 7.17,а) измеряемое защитой сопротивление при междуфазном КЗ определяется соотношением

$$Z = Z_{1к} + \frac{U_d}{I},$$

где  $I$  — фазный ток, протекающий через защиту.

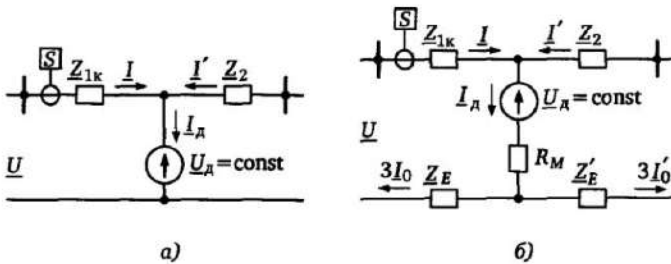


Рис. 7.17. Учет электрической дуги при междуфазных (а) и однофазных (б) коротких замыканиях

При этом следует иметь в виду, что напряжение  $\underline{U}_d$  совпадает по фазе с суммарным током  $I_d = I + I'$  электрической дуги.

Соотношения (7.28) и (7.29), определяющие замер ДЗ при двустороннем питании и учитывающие соотношение токов, подтекающих к месту КЗ, справедливы только при наличии в месте КЗ постоянного значения переходного сопротивления, например, сопротивления опоры ВЛ.

Однофазные КЗ на линиях высокого напряжения чаще всего возникают при пробое изоляторов, установленных на опорах ВЛ. В этом случае петля измерения содержит помимо сопротивления электрической дуги эквивалентное сопротивление  $R_M$  опоры относительно земли. При наличии грозозащитных тросов должно учитываться влияние заземления других опор, так как опоры в этом случае электрически связаны. Данная связь существенно снижает результирующее сопротивление  $R_M$  [7].

Расчетная схема при однофазном КЗ с электрической дугой приведена на рис. 7.17,б, где  $\underline{U}_d$  — напряжение электрической дуги;  $R_M$  — сопротивление опоры ВЛ. При компенсации по варианту 1 с комплексным коэффициентом  $\underline{k}_0$  по выражению (7.18), используя эквивалентное сопротивление  $\underline{Z}_E$  (см. рис. 7.14), получим измеряемое сопротивление исходя из следующих соотношений для схемы с двусторонним питанием:

$$\underline{U} = \underline{I}Z_{1к} + \underline{Z}_E 3I_0 + \underline{U}_d + R_M(\underline{I} + \underline{I}'). \quad (7.50)$$

Приняв для рассматриваемого случая однофазного КЗ  $\underline{I} = 3I_0$ , получим замер ДО, разделив обе части уравнения на  $\underline{I} + \underline{k}_0 3I_0 = \underline{I}(1 + \underline{k}_0)$ :

$$\frac{U}{I + k_0 3I_0} = Z_{\text{изм}} = \frac{Z_{1к} + Z_E}{1 + k_0} + \frac{U_d}{I(1 + k_0)} + \frac{R_M(I + I')}{I(1 + k_0)},$$

откуда с учетом соотношения (7.37) для  $k_0$  получим

$$Z_{\text{изм}} = Z_{1к} + \frac{U_d}{I(1 + k_0)} + \frac{R_M}{1 + k_0} \left( 1 + \frac{I'}{I} \right). \quad (7.51)$$

Выражение (7.51) определяет замер  $Z_{\text{изм}}$  при однофазном дуговом повреждении в случае двустороннего питания при использовании коэффициента компенсации  $k_0 = Z_E/Z_{1к}$ .

При использовании варианта 2 с коэффициентами  $R_E/R_{1к}$  и  $X_E/X_{1к}$  разделив уравнение (7.50) на  $I$  и обозначив

$$\left. \begin{aligned} Z'_n &= \frac{U_d}{I} = R'_d + jX'_n; \\ Z'_M &= R_M \frac{I + I'}{I} = R'_M + jX'_M, \end{aligned} \right\} \quad (7.52)$$

получим

$$U/I = R_{1к} + R_E + R'_n + R'_M + j(X_{1к} + X_E + X'_n + X'_M). \quad (7.53)$$

Из выражения (7.53), выделив вещественную и мнимую части и разделив их соответственно на  $(1 + R_E/R_{1к})$  и  $(1 + X_E/X_{1к})$ , получим замер при однофазном КЗ в этом случае:

$$R_{\text{изм}} = \frac{\text{Re}\left(\frac{U}{I_1}\right)}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}} = R_{1к} + \frac{R'_n}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}} + \frac{R'_M}{1 + \frac{R_E}{R_{1к}}}; \quad (7.54)$$

$$X_{\text{изм}} = \frac{\text{Im}\left(\frac{U}{I_1}\right)}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}} = X_{1к} + \frac{X'_n}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}} + \frac{R'_M}{1 + \frac{X_E}{X_{1к}}}. \quad (7.55)$$



Дополнительные составляющие к  $R_{1к}$  и  $X_{1к}$  в выражениях (7.54) и (7.55), определяющие ошибку измерения, являются с учетом (7.52) соответственно вещественной и мнимой составляющими комплексных сопротивлений  $Z'_п = \underline{U}_д / I$  и  $Z'_м = R'_м(1 + I'/D)$ .

При этом фаза напряжения дуги  $\underline{U}_д$ , являющегося неизменным, совпадает с фазой тока дуги  $I_д = I + I'$ .

### 7.3.4. Корректировка Z-измерений при двустороннем питании

Как показано выше, питание места повреждения с противоположной стороны (см. рис. 7.12 и 7.17) может привести к существенным погрешностям в измерении комплексного сопротивления  $Z_{1к}$  поврежденного участка. Погрешности измерения минимальны при одностороннем питании (см. рис. 7.15) и увеличиваются с ростом тока, подтекающего к месту повреждения с противоположной стороны, — см., например, выражения (7.29), (7.51). При известных соотношениях между определенными параметрами ЭС возможна минимизация указанных погрешностей, например [12, 35].

Однофазное КЗ через переходное сопротивление  $R_п$ . Рассмотрим общий случай ВЛ с двусторонним питанием (рис. 7.18,а) при однофазном КЗ в точке К через переходное сопротивление  $R_п$ .

Используя эквивалентирование при однофазных КЗ (см. рис. 7.14 и рис. 7.17,б), получим в данном случае с учетом выражения (7.50)

$$\underline{U} = I Z_{1к} + Z_E 3I_0 + R_п(I + I').$$

При использовании комплексного коэффициента компенсации при однофазных КЗ по выражениям (7.18), (7.37) получим измеряемое сопротивление для схемы на рис. 7.18,а при однофазном КЗ

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \frac{\underline{U}}{I + k_0 3I_0} = \frac{I Z_{1к} + Z_E 3I_0}{I + \frac{Z_E}{Z_1} 3I_0} + \frac{R_п 3I_{0к}}{I + \frac{Z_E}{Z_1} 3I_0} = \\ &= Z_{1к} + R_п \frac{3I_{0к}}{I + k_0 3I_0} = Z_{1к} + \Delta \underline{Z}. \end{aligned} \quad (7.56)$$

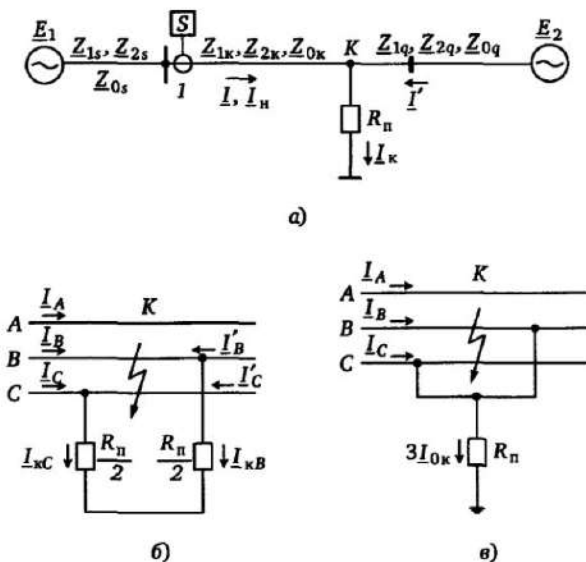


Рис. 7.18. Расчетная схема ВЛ с двусторонним питанием (а); токи в месте двухфазного КЗ (б); двухфазное КЗ на землю через переходное сопротивление (в)

В соответствии с выражением (7.56), результирующий замер состоит из искомого сопротивления  $Z_{1k}$  поврежденного участка и составляющей ошибки  $\Delta Z$  (рис. 7.19).

Аргумент вектора ошибки представим в виде

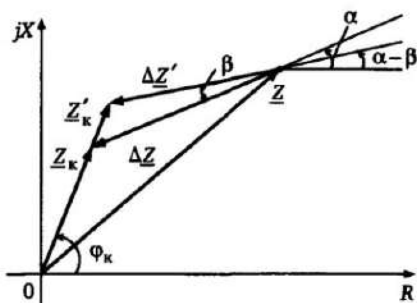
$$\arg \Delta \underline{Z} = \arg \frac{I_{0k}}{I + k_0 3I_0} = \arg \frac{I_0}{I + k_0 3I_0} + \arg \frac{I_{0k}}{I_0} = \alpha - \beta, \quad (7.57)$$

где

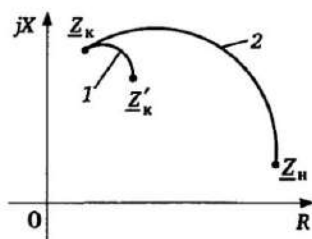
$$\alpha = \arg \left[ \frac{I_0}{I + k_0 3I_0} \right]; \quad (7.58)$$

$$\beta = \arg \left[ \frac{I_0}{I_{0k}} \right]. \quad (7.59)$$

Приняв  $\underline{Z} = R + jX$ ,  $\underline{Z}_{1k} = R_{1k} + jX_{1k}$ ,  $\Delta \underline{Z} = \Delta R + j\Delta X$ , и учитывая, что  $X_{1k}/R_{1k} = \operatorname{tg} \varphi_k$  (угол линии) и в соответствии с выраже-



а)



б)

Рис. 7.19. Корректировка  $Z$  — измерений при двухстороннем питании:  
 а — векторная диаграмма; б — траектории —  $Z'$  при однофазном КЗ на землю  
 (см. рис. 7.18,е); 1 — неполная корректировка ( $\beta = 0$ ); 2 — отсутствие корректировки

нием (7.57)  $\Delta X/\Delta R = \operatorname{tg}(\alpha - \beta)$ , получим для мнимой и вещественной частей измеренного сопротивления  $Z = R + jX$  в выражении (7.56)

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{1к} + \Delta X; \\ R &= \frac{X_{1к}}{\operatorname{tg}\varphi_k} + \frac{\Delta X}{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}. \end{aligned} \right\} \quad (7.60)$$

Решение системы (7.60) дает значения  $X_{1к}$ ,  $R_{1к}$  при двустороннем питании

$$X_{1к} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}\varphi_k - \operatorname{tg}(\alpha - \beta)} \operatorname{tg}\varphi_k; \quad R_{1к} = \frac{X_{1к}}{\operatorname{tg}\varphi_k}. \quad (7.61)$$

Все величины за исключением угла  $\beta$ , определяющие  $X_{1к}$  в выражении (7.61), являются известными ( $R$ ,  $X$ ,  $\varphi_k$ ) или могут быть рассчитаны (угол  $\alpha$ ) на основе данных, имеющихся в месте установки защиты. Проблема состоит в том, что угол

$$\beta = \arg \frac{I_0}{I_{0к}} = \arg \frac{Z_{0q}}{Z_{0\Sigmaк} + Z_{0q}}, \quad (7.62)$$

где  $Z_{0\Sigmaк} = Z_{0s} + Z_{0к}$  (рис. 7.18,а) зависит от соотношений между сопротивлениями нулевой последовательности по обеим сто-

ронам от места КЗ и, следовательно, от расположения места КЗ, которое в момент измерения неизвестно. Потому этот угол не может быть точно рассчитан. Однако, в тех случаях, когда при перемещении точки КЗ по линии угол  $\beta$  меняется незначительно (угловые характеристики схемы нулевой последовательности линии и источников питания близки по величине или сопротивление источников существенно больше сопротивления линии) значение угла  $\beta$  невелико или его можно принять постоянным. Одним из возможных вариантов при этом является принятие угла  $\beta$  соответствующим соотношениям при КЗ в конце линии [35]. Однако указанное предполагает неизменность конфигурации ЭС, что не всегда возможно на практике.

**Междуфазное КЗ через переходное сопротивление  $R_{\text{п}}$ .** При междуфазном КЗ с переходным сопротивлением  $R_{\text{п}}$  справедливы следующие соотношения для токов в месте повреждения (рис. 7.18,б):

$$\underline{I}_{\text{KB}} = a^2 \underline{I}_{1\text{K}} + a \underline{I}_{2\text{K}}; \quad \underline{I}_{\text{KC}} = a \underline{I}_{1\text{K}} + a^2 \underline{I}_{2\text{K}}; \quad a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

где  $\underline{I}_{1\text{K}}$  и  $\underline{I}_{2\text{K}}$  — симметричные составляющие токов в месте повреждения К.

Учитывая, что  $\underline{I}_{\text{B}} = -\underline{I}_{\text{C}}$  имеем  $\underline{I}_{1\text{K}} = -\underline{I}_{2\text{K}}$  и

$$\underline{I}_{\text{KB}} - \underline{I}_{\text{KC}} = (a^2 - a)(\underline{I}_{1\text{K}} - \underline{I}_{2\text{K}}) = 2j\sqrt{3}\underline{I}_{2\text{K}}.$$

Для петли КЗ, измеряемой защитой S (рис. 7.18, а), в этом случае справедливо соотношение

$$\underline{U}_{\text{B}} - \underline{U}_{\text{C}} = \underline{I}_{\text{B}} \underline{Z}_{1\text{K}} + \underline{I}_{\text{KB}} \frac{R_{\text{п}}}{2} - \left( \underline{I}_{\text{C}} \underline{Z}_{1\text{K}} + \underline{I}_{\text{KC}} \frac{R_{\text{п}}}{2} \right),$$

откуда получаем измеряемое защитой сопротивление

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{\text{B}} - \underline{U}_{\text{C}}}{\underline{I}_{\text{B}} - \underline{I}_{\text{C}}} = \underline{Z}_{1\text{K}} + j\sqrt{3}R_{\text{п}} \frac{\underline{I}_{2\text{K}}}{\underline{I}_{\text{BC}}} = \underline{Z}_{1\text{K}} + \Delta \underline{Z}'. \quad (7.63)$$

Представим аргумент вектора ошибки измерения  $\Delta \underline{Z}'$  в виде

$$\arg \Delta \underline{Z}' = \arg j \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_{\text{BC}}} + \arg \frac{\underline{I}_{2\text{K}}}{\underline{I}_2} = \alpha' - \beta'.$$

Здесь

$$\alpha' = \arg \frac{I_2}{I_{BC}} + \frac{\pi}{2};$$
$$\beta' = \arg \frac{I_2}{I_{2к}} = \arg \frac{Z_{1q}}{Z_{1\Gammaк} + Z_{1q}};$$

где  $Z_{1\Gammaк} = Z_{1s} + Z_{1к}$  (см. рис. 7.18,а).

Выражения (7.63) и (7.56) полностью аналогичны. С учетом этого получим, что для междуфазного КЗ через переходное сопротивление в случае двустороннего питания скорректированное измерение определится также выражением (7.61) при замене углов  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно на  $\alpha'$  и  $\beta'$ . Ввиду того, что угол  $\beta'$  зависит от места КЗ и определяется параметрами ЭС, имеют такие же ограничения по точности вычислений как и при однофазном КЗ.

### **7.3.5. Снижение погрешности при использовании модифицированной граничной линии реактивного сопротивления**

Рассмотрим реле реактивного сопротивления с прямолинейной характеристикой 1 (рис. 7.20,а), параллельной оси  $R$  и смещенной относительно неё на  $X_y$  для действия при однофазных КЗ.

Данная граничная линия может быть использована в комбинации с другими линиями (прямые 3, 4 на рис. 7.20,а) при построении ДО с многоугольной ХС.

Для формирования граничной линии реактивного реле сопротивления используем «синусный» алгоритм сравнения фаз двух электрических величин  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  по выражению (2.51). С учетом приложения П1.2 примем упрощение  $\underline{b} = \infty$ , т.е.  $\underline{k}_1 = 0$ . В рассматриваемом случае алгоритм срабатывания для действия при однофазных КЗ в заштрихованной области на рис. 7.20,а примет вид

$$\pi \leq \arg \frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1} = \arg \frac{k_3 \underline{U} + k_4 \underline{I}_p}{k_2 \underline{I}_p} \leq 2\pi, \quad (7.64)$$

где  $\underline{U}$  — фазное напряжение;  $\underline{I}_p = \underline{I} + k_0 3 \underline{I}_0$  — компенсированный фазный ток;  $k_2, k_3$  — действительные коэффициенты.

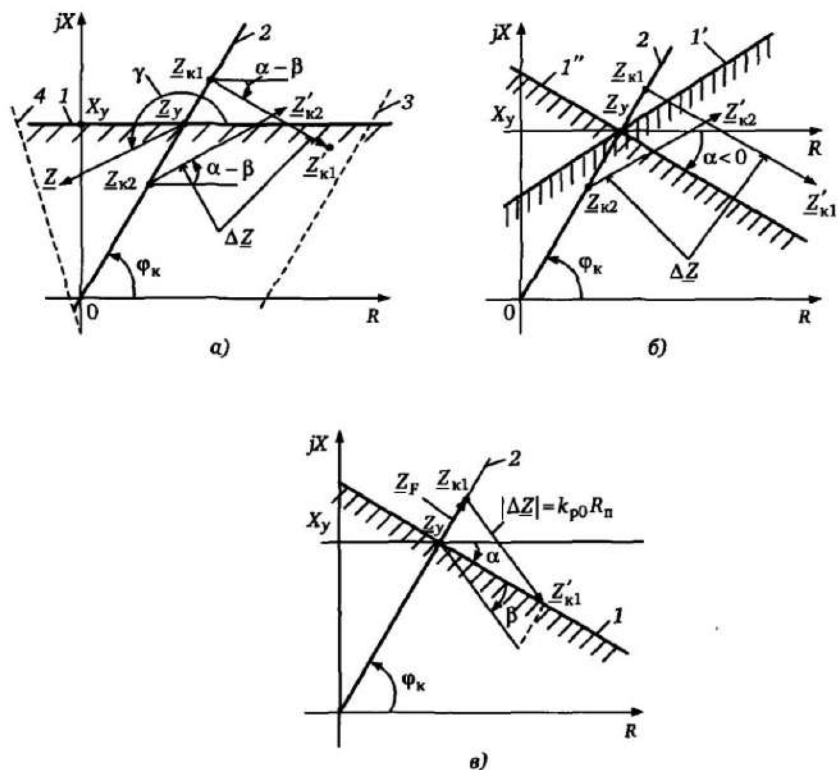


Рис. 7.20. Граничная линия реактивного сопротивления (а) и модифицированные граничные линии (б, в):

1, 1' — граничные линии области срабатывания; 2 — характеристика защищаемой линии

Коэффициент  $k_4$  выбирается из условия  $-k_4/k_3 = Z_y$ , где мнимая часть  $Z_y$  определяет смещение характеристики  $X_y$  (см. рис. 7.20).

Учитывая принятые обозначения и то, что коэффициенты  $k_2$  и  $k_3$  действительные числа, алгоритм срабатывания примет вид при  $Z = U/I_p$

$$\pi \leq \arg(Z - Z_y) \leq 2\pi,$$

что определяет заштрихованную область ниже граничной линии 1 на рис. 7.20, а. Действительно, в указанной области для любого значения  $Z$  справедливо соотношение  $\pi \leq \gamma \leq 2\pi$ , где

$\gamma = \arg(\underline{Z} - \underline{Z}_y)$ . При наличии переходного сопротивления  $R_{\pi}$  в месте КЗ погрешности замера  $\Delta \underline{Z}$  в данном случае также определяются соотношениями (7.56)—(7.59), откуда имеем

$$\Delta \underline{Z} = R_{\pi} \frac{3I_{0к}}{\underline{I} + 3k_0 I_0} = R_{\pi} k_{p0} e^{j(\alpha - \beta)}, \quad (7.65)$$

где  $k_{p0} = \left| \frac{I_{0к}}{\underline{I} + 3k_0 I_0} \right|$  — коэффициент распределения токов;  $\alpha$  и  $\beta$

определяются соотношениями (7.58) и (7.59)

В зависимости от значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  данная погрешность может привести как к излишнему действию при КЗ вне зоны, так и к отказу ДО при КЗ в защищаемой зоне (соответственно КЗ в точках  $\underline{Z}_{к1}$ ,  $\underline{Z}_{к2}$  и соответствующие замеры  $\underline{Z}'_{к1}$ ,  $\underline{Z}'_{к2}$  на рис. 7.20,а).

Для компенсации указанных погрешностей предложено [4] поляризовать величину  $\underline{E}_1$  принять зависящей только от тока нулевой последовательности  $I_0$ , т.е. в выражении (7.64) принять  $k_2 I_p = k_2 I_0$ . Соответствующая данному сравнению модифицированная граничная линия обладает свойствами, обеспечивающими существенно меньшую чувствительность ДО к переходному сопротивлению  $R_{\pi}$  в месте однофазного КЗ. С учетом (7.64) граничная линия срабатывания в плоскости  $\underline{Z} = \underline{U}/(\underline{I} + 3k_0 I_0)$  определяется в этом случае соотношением

$$\pi \leq \arg \frac{\underline{I} + 3k_0 I_0}{I_0} (\underline{Z} - \underline{Z}_y) \leq 2\pi,$$

откуда с учетом выражения (7.58) получим окончательно

$$\pi + \alpha \leq \arg(\underline{Z} - \underline{Z}_y) \leq 2\pi + \alpha. \quad (7.66)$$

На рис. 7.20,б приведены характеристики модифицированной граничной линии при  $\alpha > 0$  (характеристика  $1'$ ) и  $\alpha < 0$  (характеристика  $1''$ ). Обычно угол  $\beta$ , зависящий в соответствии с выражением (7.62) от соотношений между сопротивлениями нулевой последовательности в ЭС по обеим сторонам от места КЗ невелик. При пренебрежении этим углом ( $\beta = 0$ ), угол  $\alpha$  — по-

ворот модифицированной характеристики равен с учетом выражений (7.56)—(7.59) углу вектора  $\Delta Z$  ошибки, вносимой наличием переходного сопротивления в месте КЗ. Указанное означает, что при поляризации величиной  $I_0$ , полученная характеристика автоматически «подстраивается» под ошибку замера, вносимую переходным сопротивлением, что иллюстрируется рис. 7.20,б.

В данном случае внешнему КЗ в точке  $Z_{к1}$  соответствует характеристика  $1''$ , а внутреннему КЗ в точке  $Z_{к2}$  — характеристика  $1'$ . Обе характеристики располагаются параллельно векторам ошибки  $\Delta Z$ , что обеспечивает правильное функционирование в обоих случаях. На рис. 7.20,в поясняется оценка погрешности  $Z_F$  модифицированной характеристики при учете угла  $\beta$ . В данном случае при внешнем КЗ (точка  $Z_{к1}$ ) возможно неселективное действие, обусловленное наличием угла  $\beta$ . Граничным условием при этом является касание вектора результирующего замера  $Z'_{к1} = Z_{к1} + \Delta Z$  модифицированной граничной линии срабатывания 1. При этом ошибка измерения  $Z_F$  вдоль защищаемой линии 2 определяется соотношением

$$Z_F = \frac{|\Delta Z| \sin \beta}{\sin(\varphi_k - \alpha)} = k_{p0} R_n \frac{\sin \beta}{\sin(\varphi_k - \alpha)}. \quad (7.67)$$

В зависимости от знака угла  $\beta$ , определяемого соотношениями (7.59) и (7.62), значение  $Z_F$  может быть положительным или отрицательным, что соответствует увеличению или сокращению защищаемой зоны. При  $\beta = 0$  погрешность модифицированного реле отсутствует.

#### 7.4. Траектории $Z$ при КЗ через переходное сопротивление (общий случай)

Как показано в §7.3, наличие переходного сопротивления в месте КЗ (см. рис. 7.10) искажает замер ДО. Искажение замера существенно увеличивается (см. §7.2 и 7.3) при двустороннем питании вследствие протекания через переходное сопротивление токов с противоположной от места установки ДО стороны. Однако представление ошибки измерения как величины, зависящей в соответствии с выражениями (7.29) и (7.51) от соотношения токов в месте установки защиты и в месте КЗ, не позво-



ляет произвести полноценный анализ чувствительности и селективности ДО в плоскости  $\underline{Z}$  ввиду того, что различным точкам  $\underline{Z}$  соответствуют различные соотношения токов. Интерес представляет общее уравнение траекторий  $\underline{Z}$ , не содержащее в прямом виде соотношения токов, подтекающих к месту повреждения.

При однофазных КЗ в общем случае ЭС с двусторонним питанием (см. рис. 7.18,а) и изменении переходного сопротивления в месте КЗ от 0 до  $\infty$  траектории  $\underline{Z} = \underline{U}/(\underline{U} + k_0 3I_0)$  являются дугами окружностей [4, 36]. Найдём общее уравнение траектории  $\underline{Z}$  при однофазном КЗ (АО) через переходное сопротивление.

Для ЭС (см. рис. 7.18,а) примем в дальнейшем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{1\Sigma\kappa} = \underline{Z}_{2\Sigma\kappa} = \underline{Z}_{1s} + \underline{Z}_{1\kappa}; \quad \underline{Z}_{0\Sigma\kappa} = \underline{Z}_{0s} \underline{Z}_{0\kappa}; \\ \underline{Z}_{1\Sigma} = \underline{Z}_{2\Sigma} = \frac{\underline{Z}_{1\Sigma\kappa} \underline{Z}_{1q}}{\underline{Z}_{1\Sigma\kappa} + \underline{Z}_{1q}}; \quad \underline{Z}_{0\Sigma} = \frac{\underline{Z}_{0\Sigma\kappa} \underline{Z}_{0q}}{\underline{Z}_{0\Sigma\kappa} + \underline{Z}_{0q}} \end{aligned} \right\} \quad (7.68)$$

Если  $\underline{U}_{\kappa.н}$  — напряжение в месте КЗ  $\kappa$  в доаварийном режиме (режиме нагрузки);  $I_{\text{н}}$  — ток через защиту в режиме нагрузки;  $\underline{Z}_{\text{н}} = \underline{U}_{\text{н}}/I_{\text{н}}$  — сопротивление на входе ДО в режиме нагрузки, то справедливы следующие соотношения [5]

$$k_{\text{н}} = \frac{E_1}{\underline{U}_{\kappa.н}} = \frac{\underline{Z}_{\text{н}} + \underline{Z}_{1s}}{\underline{Z}_{\text{н}} - \underline{Z}_{1\kappa}}; \quad I_{\text{н}} = \frac{E_1 - \underline{U}_{\kappa.н}}{\underline{Z}_{1\Sigma\kappa}} \quad (7.69)$$

Используем метод наложения (рис. 7.21), представив токи в точке 1 установки защиты в режиме КЗ (рис. 7.21,а) как сумму составляющих режима нагрузки (рис. 7.20,б) и аварийного режима (рис. 7.21,в).

При этом симметричные составляющие напряжения  $\underline{U}_F = \underline{U}_{\kappa} - \underline{U}_{\kappa.н}$  в схеме аварийного режима, генерирующего аварийные составляющие токов  $I_{1\kappa}$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  равны:

$$\underline{U}_{1F} = (\alpha_1 - 1)\underline{U}_{\kappa.н}, \quad \underline{U}_{2F} = \alpha_2 \underline{U}_{\kappa.н}, \quad \underline{U}_{0F} = \alpha_0 \underline{U}_{\kappa.н}, \quad (7.70)$$

где для однофазного КЗ с переходным сопротивлением  $R_{\text{п}}$  имеем при равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательности:

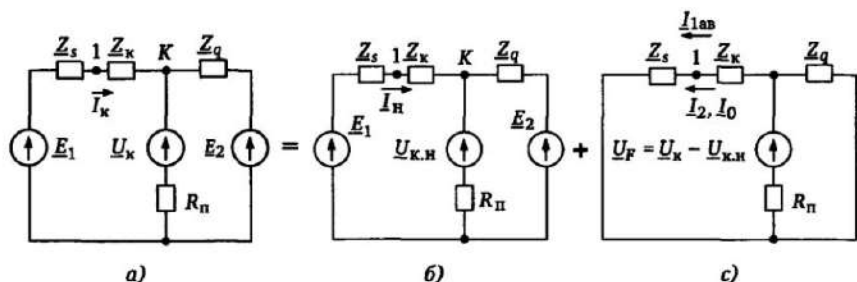


Рис. 7.21. Использование метода наложения при расчете КЗ в ЭС с двусторонним питанием:  
 а — исходная схема установившегося КЗ; б — нагрузочный режим;  
 в — режим аварийных составляющих

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{3R_{\Pi} + \underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}{3R_{\Pi} + 2\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}; \\ \alpha_2 &= -\frac{\underline{Z}_{1\Sigma}}{3R_{\Pi} + 2\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}; \\ \alpha_0 &= -\frac{\underline{Z}_{0\Sigma}}{3R_{\Pi} + 2\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.71)$$

В результате имеем аварийные симметричные составляющие токов в месте 1 установки защиты:

$$\underline{I}_{1ав} = \frac{(1 - \alpha_1)\underline{U}_{к.н}}{\underline{Z}_{1\Sigma}}; \quad \underline{I}_2 = -\frac{\alpha_2 \underline{U}_{к.н}}{\underline{Z}_{1\Sigma}}; \quad \underline{I}_0 = -\frac{\alpha_0 \underline{U}_{к.н}}{\underline{Z}_{0\Sigma}}. \quad (7.72)$$

Полный ток  $\underline{I} = \underline{I}_A$  в месте КЗ определяется соотношением

$$\underline{I}_A = \underline{I}_H + \underline{I}_{1ав} + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_{к.н}}{\underline{Z}_{1\Sigma}} \left( k_{\Pi} - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_0 \frac{\underline{Z}_{1\Sigma k}}{\underline{Z}_{0\Sigma k}} \right). \quad (7.73)$$

Сопротивление на входе ДО, измеряющего петлю фазы — земля для ЭС (см. рис. 7.18,а) с учетом (7.19) имеет значение

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A + k_0 3\underline{I}_0} = \underline{Z}_{1к} + R_{\Pi} \frac{3\underline{I}_{0к}}{\underline{I}_A + k_0 3\underline{I}_0} = \underline{Z}_{1к} + \frac{R_{\Pi}}{\frac{\underline{I}_A}{\underline{I}_A + k_0} + 3\underline{I}_0} \underline{I}_{0к}. \quad (7.74)$$

Подставив в (7.74) значения  $I_0$  и  $I_A$  из (7.72) и (7.73) и приняв

$$k_1 = \frac{I_{0к}}{I_0} = \frac{Z_{0\Sigmaк} + Z_{0q}}{Z_{0q}}, \quad (7.75)$$

получим значение  $Z$  на входе ДО в общем случае однофазного КЗ через переходное сопротивление  $R_n$  при двустороннем питании

$$Z = Z_{1к} + k_1 \frac{R_n}{\frac{R_n}{Z_F} + k_2}, \quad (7.76)$$

где

$$Z_F = \frac{Z_{1\Sigmaк} Z_{0\Sigma}}{(k_H - 1) Z_{0\Sigmaк}}; \quad (7.77)$$

$$k_2 = \frac{[k_H(2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}) - Z_{0\Sigma}] Z_{0\Sigmaк} + 3k_0 + 1}{3Z_{1\Sigmaк} Z_{0\Sigma}}. \quad (7.78)$$

Преобразуем выражения (7.76) к виду при  $Z_{1к} = Z_k$

$$R_n = -a \frac{Z - Z_k}{Z - Z_H}, \quad (7.79)$$

где

$$a = ae^{j\gamma} = \frac{1}{3} \left[ Z_{0\Sigma} + \frac{2(Z_H + Z_{1S})Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigmaк}} + \frac{(3k_0 + 1)(Z_H - Z_k)Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigmaк}} \right]. \quad (7.80)$$

Рассматривая угловые соотношения между величинами в (7.79) и учитывая, что при любом  $R_n$  имеем  $\arg R_n = 0$ , из (7.79) получим уравнение траектории замера в плоскости  $Z = Z_{A0}$  при изменении  $R_n$  от 0 до  $\infty$

$$\frac{Z - Z_k}{Z - Z_H} = \pi - \gamma = \delta. \quad (7.81)$$

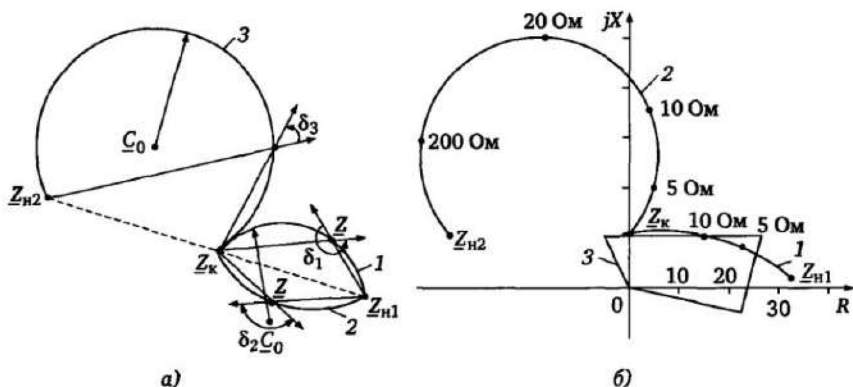


Рис. 7.22. Траектории замера ДО при однофазных КЗ ( $0 < R_n < \infty$ ): а — характеристика 1 ( $\delta > \pi$ ), 2, 3 ( $\delta < \pi$ ); б — расчетные характеристики 1, 2 при различных направлениях мощности в нагрузочном режиме ( $Z_{н1}$ ,  $Z_{н2}$ ); 3 — характеристика срабатывания ДО

Уравнению (7.81) соответствует дуга окружности, опирающаяся на точки  $Z_k$  и  $Z_n$  с вписанным углом  $\delta = \pi - \gamma$ , где  $\gamma = \arg d$  (рис. 7.22,а).

При увеличении переходного сопротивления  $R_n$ , соответствующем движению от  $Z_k$  к  $Z_n$ , траектория находится справа (дуга 2) от прямой  $Z_k Z_n$  при  $\delta < \pi$  ( $\gamma > 0$ ) и слева (дуга 1) от прямой  $Z_k Z_n$  при  $\delta > \pi$  ( $\gamma < 0$ ).

Таким образом, траектория замера ДО зависит как от расположения точек  $Z_k$  и  $Z_n$ , так и в существенной степени от угла  $\gamma$

$$\gamma = \arg \left[ \underline{Z}_{0\Sigma} + \frac{2(\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1s})\underline{Z}_{1\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma k}} + \frac{3(k_0 + 1)(\underline{Z}_n - \underline{Z}_k)\underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{0\Sigma k}} \right], \quad (7.82)$$

который определяется параметрами ЭС, в том числе значениями сопротивления на входе ДО при металлическом КЗ ( $Z_k$ ) и в режиме нагрузки ( $Z_n$ ). Центр  $C_0$  окружности, дуга которой является траекторией  $Z$ , определяется соотношением

$$\underline{C}_0 = \frac{\underline{Z}_k e^{j2\gamma} - \underline{Z}_n}{e^{j2\gamma} - 1}. \quad (7.83)$$

При  $\gamma = 0$ ,  $\gamma = \pi$  дуги окружностей вырождаются в прямые, соединяющие  $Z_K$  и  $Z_H$  (пунктирные прямые на рис. 7.22,а). В качестве примера, на рис. 7.22,б приведены траектории  $Z$  при изменении  $R_{\Pi}$  от 0 до  $\infty$  при однофазных КЗ при двух направлениях мощности в нагрузочном режиме ( $Z_{H1}$ ,  $Z_{H2}$ ) для ЭС рис. 7.18,а с параметрами, Ом:  $Z_{s1} = 0,7 + 5j$ ;  $Z_{s0} = 1 + 7j$ ;  $Z_{1k} = 0,9 + 12j$ ;  $Z_{0k} = 8 + 48j$ ;  $Z_{q1} = 0,2 + 2j$ ;  $Z_{q0} = 5 + 20j$ . Как видно из рис. 7.22,б, возможно неселективное действие ДО при внешних однофазных КЗ через переходное сопротивление вследствие вхождения траектории  $Z$  в характеристику 3 срабатывания ДО. При использовании корректировки  $Z$ -измерений (см. §7.3) на основе соотношений (7.61) (см. рис. 7.19) отклонения замера при наличии переходного сопротивления  $R_{\Pi}$  существенно снижаются и могут быть количественно оценены следующим образом.

При полной корректировке, если угол  $\beta$  известен, имеем полностью скорректированное на основе выражений (7.61) значение замера  $Z = Z_{1k}$ , соответствующее составляющей ошибки  $\Delta Z$  (см. рис. 7.19,а). При неучете угла  $\beta$  ( $\beta = 0$ ) из рис. 7.19,а имеем скорректированное значение ошибки  $\Delta Z'$

$$\Delta Z' = k \Delta Z; \quad k = \frac{\sin(\varphi_k - \alpha + \beta)}{\sin(\varphi_k - \alpha)} e^{j\beta}, \quad (7.84)$$

а скорректированное измерение  $Z'$ , с учетом выражения (7.56) имеет вид

$$Z = Z_{1k} + \Delta Z - \Delta Z' = Z_{1k} + R_{\Pi} \frac{3I_{0k}}{I + k_0 3I_{0k}} (1 - k). \quad (7.85)$$

После преобразования с учетом (7.76) получим

$$Z = Z_{1k} + k_1 \frac{R_{\Pi}}{\frac{R_{\Pi}}{Z_F} + k_2} (1 - k e^{j\beta}),$$

откуда уравнение траектории  $Z$  при неполной корректировке, вызванной неучетом угла  $\beta$  по выражению (7.62) примет вид, аналогичный уравнению (7.81)

$$\frac{\underline{Z} - \underline{Z}_K}{\underline{Z} - \underline{Z}'_K} = \delta, \quad (7.86)$$

где

$$\underline{Z}'_K = k\underline{Z}_K + (1-k)\underline{Z}_H = ke^{j\beta} \underline{Z}_K + (1-ke^{j\beta})\underline{Z}_H. \quad (7.87)$$

С учетом выражения (7.86), траектория замера при однофазном КЗ и неполной корректировке в случае изменения переходного сопротивления от 0 до  $\infty$  является также дугой окружности, опирающейся на точки  $\underline{Z}_K = \underline{Z}_{1K}$  и  $\underline{Z}'_K = k\underline{Z}_K + (1-k)\underline{Z}_H$  — кривая 1 (рис. 7.19,б).

При полной корректировке ( $k = 1$ ) имеем  $\underline{Z}'_K = \underline{Z}_K$ , т.е. при любом  $R_n$  имеется правильный замер, и траектория стягивается в точку  $\underline{Z}_K$ . При отсутствии корректировки ( $k = 0$ ) имеем  $\underline{Z}'_K = \underline{Z}_H$ , что соответствует уравнению (7.81), кривой 2, на рис. 7.19,б и рис. 7.22. Соотношения (7.84) и (7.86) дают возможность оценить возможные погрешности, вносимые неучетом угла  $\beta$  при корректировке влияния переходного сопротивления в месте КЗ в общем случае двустороннего питания. Аналогичные закономерности имеют место и при междуфазных КЗ, где замер через переходное сопротивление определяется выражением (7.63).

При одностороннем питании имеем в выражениях (7.76) — (7.78)  $k_1 = 1$ ;  $Z_F = \infty$ ;  $\underline{Z}_{1\Sigma} = \underline{Z}_{1\Sigma K}$ ;  $\underline{Z}_{0\Sigma} = \underline{Z}_{0\Sigma K}$ , откуда получим  $k_2 = 1 + k_0$ ;  $\underline{Z} = \underline{Z}_{1K} + R_n / (1 + k_0)$ , что полностью соответствует выражению (7.38).

## 7.5. Замер дистанционных защит при повреждениях на параллельных линиях

На замер дистанционных защит, устанавливаемых на каждой из параллельных линий, например, защиты  $S$  (рис. 7.23,а) влияет протекание токов нулевой последовательности  $I_{0n}$  на параллельной неповрежденной линии.

Указанное обусловлено тем, что в отличие от скомпенсированных систем токов прямой и обратной последовательностей, некомпенсированная система токов нулевой последовательности создает магнитный поток, охватывающий соседнюю линию, и наводит соответствующее напряжение. Эта магнитная связь характеризуется сопротивлением взаимоиנדукции  $\underline{Z}_{0M}$  (рис. 7.23,а),

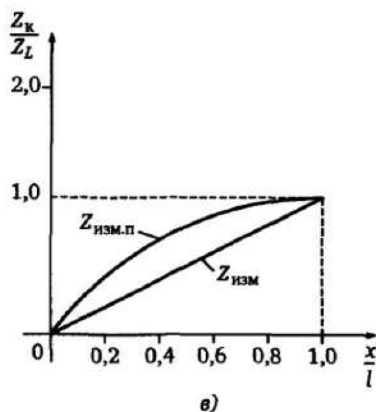
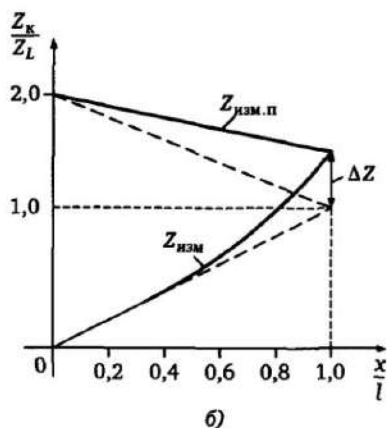
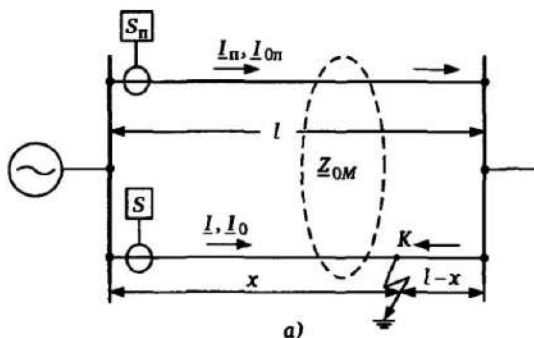


Рис. 7.23. Измерения защит при однофазных КЗ на параллельных линиях (а), без компенсации (б) и с компенсацией (в) влияния параллельной линии;  $Z_{изм}$ ,  $Z_{изм.п}$  — соответственно замеры защит  $S$  и  $S_{п}$  (рис. 7.22) на поврежденной и неповрежденной (параллельной) линиях [7]

причем наведенное напряжение нулевой последовательности определяется соотношением  $\underline{U}_0 = Z_{0M} I_{0п}$ , где  $I_{0п}$  — ток параллельной линии.

Указанное означает, что при КЗ, связанных с землей, когда возникают токи нулевой последовательности, замер ДО, измеряющих петлю фаза—земля на основе соотношений (7.19) и (7.20), будет искажен вследствие влияния токов нулевой последовательности соседней линии, изменяющих результирующее значение фазного напряжения. Ниже рассматриваются искажения замера ДО, вносимые параллельной линией, и возможности их компенсации [7].

Примем следующие обозначения:

$\underline{U}, \underline{l}, I_1, I_0$  — соответственно фазное напряжение, фазный ток и токи прямой и нулевой последовательностей поврежденной линии (линии, на которой происходит КЗ в точке  $K$  — рис. 7.23,а);

$I_{1п}, I_{1п'}, I_{0п}$  — аналогичные вышеперечисленным токи на параллельной неповрежденной линии;

$Z_{1L}, Z_{0L}$  — сопротивление прямой и нулевой последовательности каждой из параллельных линий длиной  $l$ ;

$Z_E = (Z_{0L} - Z_{1L})/3$  — эквивалентное сопротивление земли (см. 7.36);

$x$  — расстояние от места установки защиты до места КЗ на поврежденной линии;

$Z_{изм}, Z_{изм.п}$  — измеряемое сопротивление петли фаза—земля из соотношения (7.19) соответственно на поврежденной и параллельной линии.

С учетом принятых обозначений, получим напряжение поврежденной фазы при однофазном КЗ

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \frac{x}{l} (\underline{Z}_{1L} I_1 + \underline{Z}_{1L} I_2 + \underline{Z}_{0L} I_0 + \underline{Z}_{0M} I_{0п}) = \\ &= \frac{x}{l} \underline{Z}_{1L} \left( I + \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_{1L}} 3I_0 + \frac{\underline{Z}_{0M}}{\underline{Z}_{1L}} I_{0п} \right). \end{aligned} \quad (7.88)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае  $l = 3I_0$ , разделив обе части выражения (7.88) на  $l + k_0 3I_0 = 3I_0(1 + k_0)$ , получим сопротивление, измеряемое защитой  $S$  поврежденного участка:

$$\underline{Z}_{изм} = \frac{\underline{U}}{I + k_0 3I_0} = \frac{\underline{U}}{3I_0(1 + k_0)} = \frac{x}{l} \underline{Z}_{1L} \left( 1 + \frac{\underline{Z}_{0M} I_{0п}}{3\underline{Z}_{1L} I_0} \frac{1}{1 + k_0} \right). \quad (7.89)$$

Отношение токов нулевой последовательности неповрежденной и поврежденной линии  $I_{0п}/I_0$  обратно пропорционально длинам участков  $x$  и  $(2l - x)$  между точкой КЗ и шинами питающей подстанции (см. рис. 7.23,а), т.е.

$$\frac{I_{0п}}{I_0} = \frac{x}{2l - x}. \quad (7.90)$$



С учетом этого зависимость измеряемого сопротивления от расстояния  $x$  до места КЗ на поврежденной линии (при  $x < l$ ) по выражению (7.89) примет вид (кривая  $Z_{изм}$  на рис. 7.23,б)

$$Z_{изм} = \frac{x}{l} Z_{1L} + \frac{x}{l} Z_{1L} \frac{\frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}} x}{1+k_0}. \quad (7.91)$$

Рассматривая падение напряжения на участке длиной  $(2l - x)$  между точкой КЗ и защитой  $S_n$  параллельной неповрежденной линии (см. рис.7.23,а), получим

$$\begin{aligned} \underline{U} = & \left(2 - \frac{x}{l}\right) (Z_{1L} I_{1n} + Z_{1L} I_{2n} + Z_{0L} I_{0n}) + \\ & + \frac{x}{l} Z_{0M} I_0 - 2 \left(1 - \frac{x}{l}\right) Z_{0M} I_{0n}. \end{aligned} \quad (7.92)$$

Составляющая  $2(1 - x/l)Z_{0M}I_{0n}$  определяется тем, что токи  $I_{0n}$  имеют на участках  $(l - x)$  обеих линий противоположное направление, т.е. каждый из этих участков наводит на другой напряжение, противоположное по знаку напряжению  $(l - x)Z_{0M}I_{0n}$ .

После преобразования с учетом выражения (7.92), получим замер защиты  $S_n$  неповрежденной линии

$$Z_{изм.п} = \frac{\underline{U}}{I_n + \frac{Z_E}{Z_{1L}}} = \left(2 - \frac{x}{l}\right) Z_{1L} + \frac{x}{l} Z_{1L} \frac{\frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}}}{1+k_0}. \quad (7.93)$$

Зависимость  $Z_{изм.п}(x)$  является линейной (рис. 7.23,б). Как видно из рис. 7.23,б, вследствие влияния взаимоиндукции замеры защит  $S$  и  $S_n$  на обеих линиях являются преувеличенными с максимальной ошибкой  $\Delta Z$  при КЗ в конце линии ( $x/l = 1$ )

$$\Delta Z = Z_{1L} \frac{\frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}}}{1+k_0}.$$

Указанное приводит к сокращению зоны действия дистанционной защиты, рассчитываемой с учетом выражения (7.91).

**Компенсация влияния параллельной линии.** Из выражения (7.88) для фазного напряжения видно, что получить при наличии параллельной линии правильный замер, пропорциональный сопротивлению прямой последовательности линии  $Z_{1к}$  между местом КЗ и местом установки защиты можно, рассматривая измерения

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{I + \frac{Z_E}{Z_{1L}} 3I_0 + \frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}} 3I_{0п}} = \frac{\underline{U}}{I + k_0 3I_0 + k_{0M} 3I_{0п}}, \quad (7.94)$$

где  $k_{0M} = \frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}}$ .

В этом случае с учетом (7.88) из (7.94) для поврежденной линии имеем неискаженное значение  $Z_{изм}$  при однофазном КЗ

$$\underline{Z}_{изм} = \frac{x}{l} \underline{Z}_{1L},$$

характеризуемое линейной зависимостью  $Z_{изм} = f(x/l)$ , представленной на рис. 7.23,в.

Однако при использовании компенсации влияния параллельной линии на основе выражения (7.94) замер защиты  $S_n$  на параллельной неповрежденной линии может быть существенно искажен. Для оценки искажений, рассмотрим замер защиты  $S_n$  параллельной линии (рис. 7.23,а) при наличии компенсации. Для этого, подставив в выражение (7.94) значение фазного напряжения  $\underline{U}$  из (7.92), получим после преобразований значение сопротивления  $Z_{изм.п}$  защиты параллельной (неповрежденной) линии

$$\underline{Z}_{изм.п} = \left( \frac{2l-x}{x} \right) \underline{Z}_{1L} \left[ 1 + \frac{\left( \frac{x}{2l-x} - \frac{2l-x}{x} \right) k_{0M}}{1 + k_0 + k_{0M} \frac{2l-x}{x}} \right]. \quad (7.95)$$

Зависимость  $Z_{изм.п} = f(x/l)$  приведена на рис. 7.23,в. Как видно из рис. 7.23,в, замер  $Z_{изм.п}$  защиты неповрежденной линии су-

щественно отличается от замера в случае отсутствия компенсации (рис. 7.23,б). При этом защита неповрежденной линии, охватывая «свою» линию, срабатывает при КЗ на параллельной поврежденной линии, а при КЗ в начале соседней линии ( $x = 0$ ) измеряемое сопротивление  $Z_{\text{изм.п}}$  по выражению (7.95) также равно нулю. Указанное объясняется влиянием тока  $3I_0$  поврежденной линии на замер защиты неповрежденной линии при использовании компенсации по выражению (7.94). С учетом изложенного применение рассматриваемой компенсации возможно только при выявлении КЗ на «своей» линии.

Известное решение [9] основано на том, что ток нулевой последовательности «своей» линии  $I_0$  всегда больше тока  $I_{0\text{п}}$  неповрежденной линии. Поэтому измеряется соотношение токов  $I_0/I_{0\text{п}}$  обеих линий, и только при превышении этим соотношением определенного значения вводится компенсация параллельной линии током  $I_{0\text{п}}$ . В частности, при КЗ на границе 85% линии ( $x/l = 0,85$ ) из выражения (7.90) имеем  $I_0/I_{0\text{п}} \approx 1,35$ . Это означает, что для обеспечения точного измерения в пределах 85% длины линии компенсация должна вводиться при условии  $I_0/I_{0\text{п}} > 1,35$ .

## 7.6. Сопротивление на входах ДЗ при повреждениях в зонах резервирования

Основной особенностью измерения входного сопротивления резервными ступенями защит, действующими, как правило, с выдержкой времени, является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения. Указанное иллюстрируется рис. 7.24.

При КЗ в точке  $K_1$ , ток  $I$  на входе защиты ДЗ, установленной в точке  $I$ , не равен току  $I'$ , протекающему по поврежденному участку линии в зоне резервирования, вследствие подпитки места повреждения током  $I'''$  от генератора ГЗ. Указанное имеет место и при КЗ в точке  $K_2$  вследствие неравенства токов  $I$  и  $I'$ . Если  $I_{A1}, I_{A2}, I_{A0}$  — симметричные составляющие тока  $I_A$  в месте установки защиты,  $I'_{A1}, I'_{A2}, I'_{A0}$  — составляющие тока  $I'_A$  в месте повреждения  $K_1$ , то справедливо соотношение

$$U_{AB} = I_{A1}Z_1 + I_{A2}Z_1 + I_{A0}Z_0 + I'_{A1}Z_{1к} + I'_{A2}Z_{1к} +$$

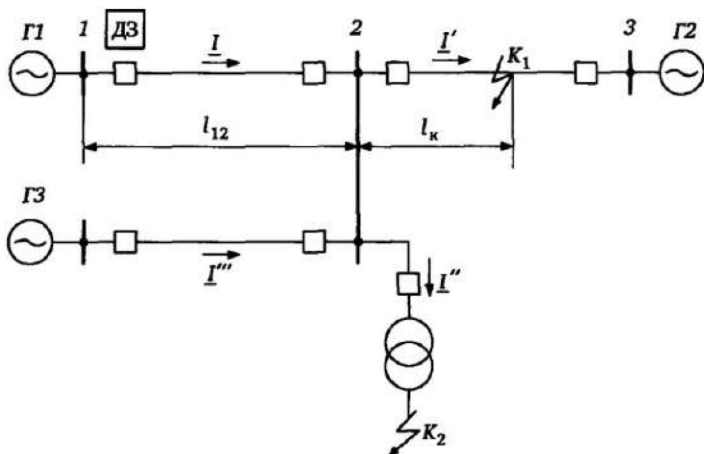


Рис. 7.24. Повреждения в зонах резервирования

$$\begin{aligned}
 &+ I'_{A0} Z_{0K} - [I_{B1} Z_1 + I_{B2} Z_1 + I_{A0} Z_0 + I'_{B1} Z_{1K} + I'_{B2} Z_{1K} + I'_{A0} Z_{0K}] = \\
 &= (I_A - I_B) Z_1 + (I'_A - I'_B) Z_{1K}, \quad (7.96)
 \end{aligned}$$

где  $Z_1 = Z_{1уд} l_{12}$ ;  $Z_{1K} = Z_{1уд} l_k$ ;  $l_{12}$  — длина участка 1—2, в начале которого установлена ДЗ;  $l_k$  — длина поврежденной части смежного участка 2—3.

С учетом (7.96) имеем

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{I}_A - \underline{I}_B} = \underline{Z}_{1уд} (l_{12} + k_p l_k), \quad (7.97)$$

где коэффициент разветвления токов  $k_p$  определяется соотношением (7.29). Таким образом, сопротивление  $\underline{Z}_{AB}$  пропорционально расстоянию  $l_{\Sigma} = l_{12} + l_k$  от места установки ДЗ до места повреждения  $K_1$  лишь при отсутствии подпитки от генератора Г3, когда токи повреждения на участках  $l_{12}$  и  $l_k$  одинаковы и  $k_p = 1$ . Аналогичные (7.97) соотношения имеют место и для  $\underline{Z}_{A0}$  по выражению (7.19).

При повреждениях, отключаемых с выдержкой времени, необходимо учитывать возможность изменения ЭДС генераторов по фазе и модулю, что обусловлено динамическими процессами в ЭС при скачкообразных изменениях мощностей,

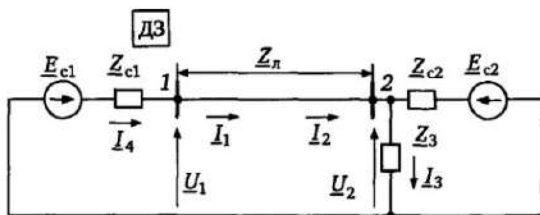


Рис. 7.25. Эквивалентная схема замещения ЭС при КЗ в зоне резервирования

возникающих при КЗ. При этом возможны существенные расхождения ЭДС по фазе, в том числе возникновение режимов синхронных качаний и асинхронного хода. При дуговых замыканиях в первой зоне и КЗ в зоне резервирования сопротивление на входе ДЗ изменяется во времени, так как зависит не только от расстояния до места КЗ, но и от соотношений эквивалентных ЭДС по модулю и фазе, что определяется влиянием на измерения соотношений между токами в месте установки защиты и в месте повреждения, определяемых режимами ЭС.

Для нахождения траекторий сопротивления на входе ДЗ с учетом расхождений по фазе эквивалентных ЭДС рассмотрим эквивалентную схему замещения ЭС при дуговых повреждениях в первой зоне и при повреждениях в зоне резервирования, приведенную на рис. 7.25.

При этом  $E_{c1}$ ,  $E_{c2}$ ,  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$  — эквивалентные ЭДС и сопротивления систем;  $Z_{л}$  — сопротивление участка между точками 1 и 2 ВЛ с сосредоточенными параметрами;  $Z_3$  — сопротивление участка между концом ВЛ (точка 2) и местом повреждения ( $K_1$  или  $K_2$  на рис. 7.24). Эта же схема соответствует и повреждению через переходное сопротивление  $R_{п}$  на защищаемом участке (см. рис. 7.12), если принять  $Z_3 = R_{п}$ ;  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$  — сопротивления систем ЭС', ЭС'';  $Z_{л}$  — эквивалентное сопротивление защищаемой ВЛ. В дальнейшем с целью упрощения при нахождении сопротивлений  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  будем рассматривать на входе ДЗ в точке 1 (рис. 7.25) токи  $I_1$ , равные разности фазных токов, и соответствующие линейные напряжения.

Если защищаемая ВЛ на участке 1—2 учитывается сосредоточенными параметрами (сопротивлением  $Z_{л}$ ), то сопротивление  $Z$  на входе ДЗ определится соотношением

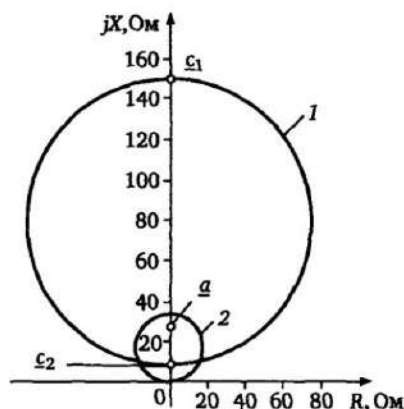


Рис. 7.26. Сопротивление на входе ДЗ при изменении угла между эквивалентными ЭДС

$$\underline{Z} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\underline{Z}_л I_1 + \underline{Z}_3 I_3}{I_1} = \underline{Z}_л + \underline{Z}_3 \frac{I_3}{I_1}. \quad (7.98)$$

Вычислив токи  $I_1$  и  $I_3$  в схеме на рис. 7.25, получим после подстановки в (7.98)

$$\underline{Z} = \underline{Z}_л + \underline{Z}_3 \frac{\underline{E}_{c1} \underline{Z}_{c2} + \underline{E}_{c2} \underline{Z}_4}{\underline{E}_{c1} (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{c2}) - \underline{E}_{c2} \underline{Z}_3}, \quad (7.99)$$

где  $\underline{Z}_4 = \underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_л$ .  
Обозначив

$$\underline{q} = \frac{\underline{E}_{c2}}{\underline{E}_{c1}} = q e^{j\varphi}; \quad q = \left| \frac{\underline{E}_{c2}}{\underline{E}_{c1}} \right|; \quad \varphi = \arg \frac{\underline{E}_{c2}}{\underline{E}_{c1}}, \quad (7.100)$$

приведем (7.99) к следующему виду:

$$q e^{j\varphi} = \frac{\underline{Z} (\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_3) - (\underline{Z}_л \underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_л \underline{Z}_3 + \underline{Z}_{c2} \underline{Z}_3)}{\underline{Z} \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_{c1}}. \quad (7.101)$$

Выделим параметр, зависящий только от угла  $\varphi$  между ЭДС  $\underline{E}_{c1}$  и  $\underline{E}_{c2}$ :

$$e^{j\varphi} = \frac{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_3}{q\underline{Z}_3} \frac{\underline{Z} - (\underline{Z}_l \underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_l \underline{Z}_3 + \underline{Z}_{c2} \underline{Z}_3) / (\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_3)}{\underline{Z} + \underline{Z}_{c1}}. \quad (7.102)$$

При изменении угла  $\varphi$  между эквивалентными ЭДС в схеме на рис. 7.25 левая часть (7.102) не изменяется по модулю, равному единице. Приняв обозначения

$$k = \left| \frac{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_3}{q\underline{Z}_3} \right|; \quad \underline{b} = -\underline{Z}_{c1}; \quad \underline{a} = \frac{\underline{Z}_l \underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_l \underline{Z}_3 + \underline{Z}_{c2} \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_3}, \quad (7.103)$$

получим для любого угла  $\varphi$ , рассматривая модули левой и правой частей (7.102), условие, которому должен удовлетворять вектор  $\underline{Z}$  на входе ДЗ:

$$k \frac{|\underline{Z} - \underline{a}|}{|\underline{Z} - \underline{b}|} = 1,$$

что полностью соответствует выражению (П2.3). Отсюда, с учетом рассмотренных в приложении П2 соотношений, следует, что при изменении угла между эквивалентными ЭДС в диапазоне  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  сопротивление  $\underline{Z}$  на входе ДЗ опишет траекторию в виде окружности (при  $k \neq 1$ ) или прямой (при  $k = 1$ ). Центр  $\underline{Z}_0$  и радиус  $R_0$  окружности определяются соотношениями (П2.10) и (П2.11) при значениях  $k$ ,  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$  из (7.103).

**Пример.** Определить траекторию сопротивления на входе ДЗ в диапазоне углов между ЭДС  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  при следующих данных системы, представленной на рис. 7.25:  $\underline{Z}_{c1} = j10$  Ом;  $\underline{Z}_l = j20$  Ом;  $\underline{Z}_3 = j10$  Ом;  $q = |E_{c2}|/|E_{c1}| = 1,2$  для случаев  $\underline{Z}_{c2} = j5$  Ом;  $\underline{Z}_{c2} = j20$  Ом.

Из (7.103) при  $\underline{Z}_{c2} = j5$  Ом имеем

$$k = \frac{5+10}{1,2 \cdot 10} = 1,25; \quad \underline{b} = -j10 \text{ Ом};$$

$$\underline{a} = j \frac{20 \cdot 5 + 20 \cdot 10 + 5 \cdot 10}{5+10} = j23,3 \text{ Ом}.$$

Из (П2.10) и (П2.11) имеем:

$$Z_0 = \frac{k^2 \underline{a} - \underline{b}}{k^2 - 1} = \frac{1,25^2 j23,3 + j10}{1,25^2 - 1} \approx j82,6 \text{ Ом};$$

$$R_0 = \frac{k|\underline{a} - \underline{b}|}{|k^2 - 1|} = \frac{1,25|j23,3 + j10|}{|1,25^2 - 1|} \approx 74 \text{ Ом}.$$

Траектория  $Z$  приведена на рис. 7.26 (характеристика 1).

При этом точки  $\underline{c}_1$  и  $\underline{c}_2$  пересечения характеристики с осью  $jX$  определяют  $Z$  соответственно при углах между ЭДС  $E_{c1}$  и  $E_{c2}$  0 и  $180^\circ$ . При  $Z_{c2} = j20$  Ом имеем:  $k = 2,5$ ;  $\underline{b} = j10$  Ом;  $\underline{a} = j26,6$  Ом;  $Z_0 = 33,6$  Ом;  $R_0 = 17,4$  Ом. Этим значениям соответствует характеристика 2 на рис. 7.26.

В [5] рассмотрены траектории  $Z$  при КЗ в зоне резервирования для случая протяженной ВЛ, когда необходимо учитывать распределенные параметры ВЛ. Указанные траектории также являются в общем случае окружностями, зависящими от параметров электрической системы.

## 7.7. Сопротивления на входах ДЗ в режимах без коротких замыканий

### 7.7.1. Режим нагрузки

В данном параграфе рассмотрим симметричные режимы ЭС, не сопровождающиеся короткими замыканиями. К ним относятся нагрузочные режимы, в которых ЭС находится в устойчивом состоянии, и режимы качаний (асинхронного хода), когда частоты эквивалентных генераторов ЭС неодинаковы. Эквивалентная схема ЭС в симметричном режиме представлена на рис. 7.27, где  $E_1$ ,  $E_2$  и  $Z_1$ ,  $Z_2$  — эквивалентные ЭДС и сопротивления системы с двусторонним питанием, приведенные к точке 1, включая и участки ЭС с протяженными ВЛ.

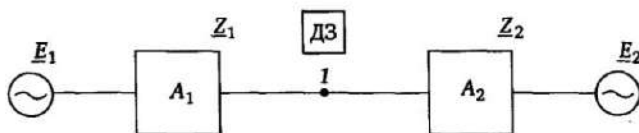


Рис. 7.27. К анализу ДЗ в нагрузочных режимах ЭС



В симметричном нагрузочном режиме ток  $I_H$ , напряжение  $\underline{U}_H$  и входное сопротивление  $\underline{Z}_H$  на входе ДЗ определяются соотношениями:

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{E}_1 - \underline{E}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{U}_H = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_2 + \underline{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (7.104)$$

$$\underline{Z}_H = \frac{\underline{U}_H}{\underline{I}_H} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_2 + \underline{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{E}_1 - \underline{E}_2} = \frac{\underline{Z}_2 + q \underline{Z}_1}{1 - q}; \quad q = \frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1}. \quad (7.105)$$

Найдем области, в которых располагается сопротивление  $\underline{Z}_H$  на входе ДЗ в нагрузочном режиме с учетом ограничений, определяемых тем, что соотношение ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  по модулю не выходит за пределы

$$q_1 \leq |q| \leq q_2, \quad (7.106)$$

где  $q_1 < 1$ ;  $q_2 > 1$ . Другое ограничение определяется тем, что из условия устойчивости ЭС угол  $\varphi = \arg q$  не выходит за пределы

$$\alpha_1 \leq \arg q \leq \alpha_2, \quad (7.107)$$

где  $\alpha_1 > -90^\circ$ ;  $\alpha_2 < 90^\circ$ .

Преобразуем (7.105) к виду

$$q = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1}, \quad (7.108)$$

Условие  $|q| \geq q_1$  с учетом (7.108) примет вид

$$\frac{1}{q_1} \left| \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1} \right| \geq 1. \quad (7.109)$$

Выражение (7.109), если оставить в нем только знак равенства, аналогично выражению (П2.3) при  $a = \underline{Z}_2$ ;  $b = -\underline{Z}_1$ ;  $k = 1/q_1$ . Оно определяет при  $q_1 \neq 1$  в плоскости  $\underline{Z}$  окружность, параметры которой с учетом (П2.10) и (П2.П.11) равны

$$\underline{Z}_0 = \frac{k^2 a - b}{k^2 - 1} = \frac{\underline{Z}_2 + q_1^2 \underline{Z}_1}{1 - q_1^2}; \quad R_0 = \frac{k|a - b|}{|k^2 - 1|} = \frac{|\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1| q_1}{|1 - q_1^2|}. \quad (7.110)$$

Неравенство (7.109) определяет область нагрузочного режима в плоскости  $Z_{\text{н}}$ , границей которой является окружность. Для того чтобы определить, находится ли данная область внутри или вне окружности, подставим значение  $Z_{\text{н}} = \infty$ , находящееся всегда вне окружности, в неравенство (7.109). В данном случае  $Z_{\text{н}} = \infty$  удовлетворяет условию (7.109), так как это соответствует  $1/q_1 > 1$ , что и имеет место при  $q_1 < 1$ . Таким образом, условие (7.109) определяет область в плоскости  $Z_{\text{н}}$ , находящуюся вне окружности с параметрами  $Z_0, R_0$ , по выражению (7.110). При  $q_1 = 1$  из П2 следует, что область нагрузочного режима есть полуплоскость, разделяемая прямой, относительно которой точки  $a = Z_2$  и  $b = -Z_1$  являются симметричными. При этом область находится в той же полуплоскости, что и точка  $-Z_1$ , так как при подстановке в (7.109)  $Z_{\text{н}} = -Z_1$  имеем  $\infty > 1$ , т. е. условие (7.109) выполняется.

На рис. 7.28 для ЭС с параметрами  $Z_1 = 20e^{j80^\circ}$  Ом;  $Z_2 = 30e^{j60^\circ}$  Ом эта область построена для  $q_1 \geq 0,8$  — заштрихованная область вне дуги окружности 1 с параметрами, определяемыми из (7.110):

$$Z_0 = \frac{30e^{j60^\circ} + 0,8^2 20e^{j80^\circ}}{1 - 0,8^2} \approx 117,1e^{j66^\circ} \text{ Ом;}$$

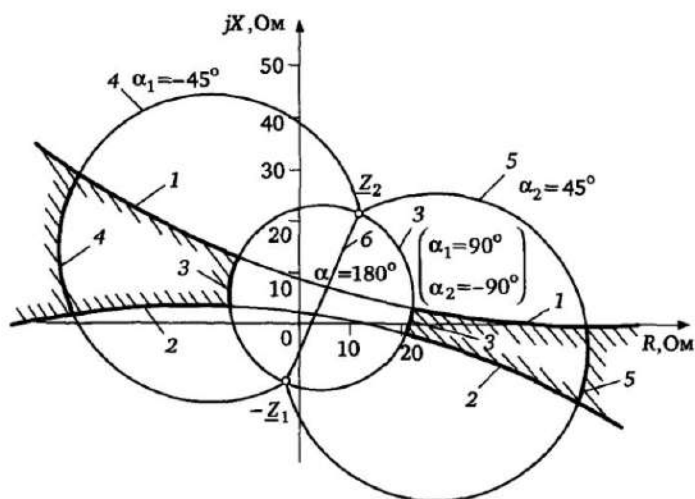


Рис. 7.28. Области расположения входного сопротивления ДЗ в нагрузочных режимах

$$R_0 = \frac{0,8 \left| 30e^{j60^\circ} + 20e^{j80^\circ} \right|}{1 - 0,8^2} \approx 109 \text{ Ом.}$$

Условие  $|q| \leq q_2$ , также вытекающее из (7.106), приводит с учетом (7.108) к неравенству

$$\frac{1}{q_2} \left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| \leq 1. \quad (7.111)$$

Выражение (7.111) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами  $Z_0$ ,  $R_0$ , определяемыми (7.110) при замене  $q_1$  на  $q_2$ . Эта область также находится вне окружности, так как при  $Z_H = \infty$  из (7.101) имеем  $1/q_2 < 1$ , что и имеет место в данном случае при  $q_2 > 1$ . Область, соответствующая неравенству (7.91), построена при  $q_2 = 1,2$ , на рис. 7.28 — это заштрихованная область вне дуги окружности 2 с параметрами

$$Z_0 = \frac{30e^{j60^\circ} + 1,2^2 \cdot 20e^{j80^\circ}}{1 - 1,2^2} \approx 132e^{j250^\circ} \text{ Ом;}$$

$$R_0 = \frac{1,2 \left| 30e^{j60^\circ} + 20e^{j80^\circ} \right|}{1 - 1,2^2} \approx 134 \text{ Ом.}$$

Таким образом, условие (7.106) ограничивающее соотношение модулей ЭДС, определяет область вне окружностей 1 и 2 на рис. 7.28 (часть указанной области заштрихована).

Найдем ограничения на области расположения  $Z_H$ , определяемые условием (7.107), по предельным углам расхождения ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . С учетом (7.108) условие (7.107) примет вид

$$\alpha_1 \leq \arg \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \leq \alpha_2, \quad (7.112)$$

Это условие полностью аналогично условию (П1.8). С учетом приложения 1 имеем граничную линию в плоскости  $Z_H$ , отделяющую область расположения входного сопротивления, которая

образуется двумя дугами окружностей с вписанными углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , опирающимися на точки  $\underline{a} = Z_2$ ,  $\underline{b} = -Z_1$  (см. рис. П1.1,б). В данном случае при  $Z_H = \infty$  имеем из (7.108)  $\arg q = 0$ . Так как  $\alpha_1 < 0$ ,  $\alpha_2 > 0$ , то точки с  $\arg q = 0$  расположены с учетом (7.112) в области возможных нагрузочных режимов. Следовательно, точки  $Z_H = \infty$  соответствуют области нагрузочных режимов и находятся вне области, ограниченной дугами.

Таким образом, область возможных нагрузочных режимов расположена снаружи граничной линии, определяемой условием (7.107). Граничные линии, соответствующие условию (7.107), построены на рис. 7.28 при  $\alpha_1 = -90^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$  (окружность 3) и  $\alpha_1 = -45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$  (соответственно дуги 4 и 5, опирающиеся на точки  $Z_2$  и  $-Z_1$ ). При расхождении ЭДС на  $180^\circ$  линия входного сопротивления расположена на прямой, соединяющей точки  $-Z_1$  и  $Z_2$ .

Результирующие области нагрузочных режимов определяются как общие для условий (7.106) и (7.107). На рис. 7.28 заштрихованная область между линиями 1 и 2 соответствует условию (7.106) при  $q_1 = 0,8$  и  $q_2 = 1,2$ . Результирующие области при  $\alpha_1 = -45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$  ограничены дугами 1, 2, 5 в I и IV квадрантах плоскости  $Z_H$  и дугами 1, 2, 4 во II и III квадрантах. При предельных расхождениях между ЭДС до  $\pm 90^\circ$  (область вне окружности 3) результирующие области нагрузочного режима ограничиваются линиями 1, 2, 3 и находятся ближе к началу координат по сравнению с предыдущим случаем. Все области находятся вне дуг окружностей 1—5.

### 7.7.2. Режимы качаний и асинхронного хода

Возникновение крупных аварий в энергетических системах характеризуется нарушением баланса мощностей, сопровождающимся отклонением частот генераторов электрических станций. При этом устройства релейной защиты и автоматики функционируют в условиях, отличающихся от обычных, и во многих случаях могут действовать неправильно, что в свою очередь приводит к отключению новых объектов энергосистем и развитию аварий. С учетом этого важны вопросы анализа поведения ДУ при качаниях и асинхронном ходе в ЭС. Эти режимы характеризуются тем, что ЭДС эквивалентных генераторов  $e_1$  и  $e_2$  (см. рис. 7.27) имеют неодинаковые частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , отличающиеся от синхронной частоты  $\omega_0$ , т. е.

$$\begin{aligned}
 e_1 &= E_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) = \text{Im} \left[ E_1 e^{j(\omega_0 t + \varphi_1 + \Delta\omega_1 t)} \right] = \text{Im} \left[ e^{j\omega_0 t} \underline{E}_1(t) \right]; \\
 e_2 &= E_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) = \text{Im} \left[ E_2 e^{j(\omega_0 t + \varphi_2 + \Delta\omega_2 t)} \right] = \text{Im} \left[ e^{j\omega_0 t} \underline{E}_2(t) \right]; \\
 \underline{E}_1(t) &= E_1 e^{j(\varphi_1 + \Delta\omega_1 t)}; \\
 \underline{E}_2(t) &= E_2 e^{j(\varphi_2 + \Delta\omega_2 t)}.
 \end{aligned}$$

Широко применяемая методика анализа поведения ДЗ при качаниях [4, 37] состоит в том, что для возможности графического представления в плоскости сопротивлений ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  принимаются равными по частоте ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ ), а расхождение частот, реально имеющее место, учитывается изменяющимся во времени сдвигом фаз  $\Delta\varphi(t)$  между ЭДС генераторов, т. е. при векторном представлении сигналов принимается

$$\frac{\underline{E}_2(t)}{\underline{E}_1(t)} = \underline{q}(t); \quad \Delta\varphi(t) = \arg \underline{q}(t) = \varphi_2 - \varphi_1 + (\omega_2 - \omega_1)t.$$

При данном допущении для схемы ЭС на рис. 7.27 при установке ДО в точке 1 имеем токи и напряжения на входе ДО

$$\underline{I}(t) = \frac{\underline{E}_1(t) - \underline{E}_2(t)}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{U}(t) = \frac{\underline{E}_1(t)\underline{Z}_2 + \underline{E}_2(t)\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (7.113)$$

где  $\underline{Z}_1$  и  $\underline{Z}_2$  — эквивалентные сопротивления ЭС относительно точки 1 установки ДО при  $\omega = \omega_0$ . Кажущееся сопротивление на входе ДО определится при этом выражением

$$\underline{Z}_p(t) = \frac{\underline{U}(t)}{\underline{I}(t)} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{q}(t)\underline{Z}_1}{1 - \underline{q}(t)}, \quad (7.114)$$

откуда получим уравнение траектории  $\underline{Z}_p(t)$  в плоскости сопротивлений при неизменном соотношении модулей  $|\underline{E}_2|/|\underline{E}_1| = q = \text{const}$  и изменяющемся угле  $\Delta\varphi(t)$

$$q \frac{|\underline{Z}_p(t) + \underline{Z}_1|}{|\underline{Z}_p(t) - \underline{Z}_2|} = 1. \quad (7.115)$$

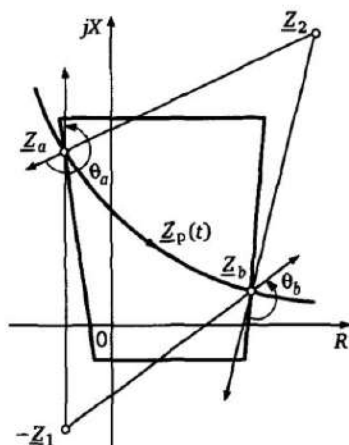


Рис. 7.29. Анализ ДО при качаниях и асинхронном ходе в ЭС на основе траектории входного сопротивления

С учетом приложения 2 траектория  $Z_p(t)$  по выражению (7.115) есть окружность с координатой центра  $Z_0$  и радиусом  $R_0$ :

$$Z_0 = -\frac{q^2 Z_1 + Z_2}{q^2 - 1}; \quad R_0 = -\frac{q|Z_1 + Z_2|}{|q^2 - 1|}.$$

В частном случае при  $q = 1$  траектория  $Z_p(t)$  есть прямая линия, относительно которой точки  $-Z_1$  и  $Z_2$  симметричны. Анализ поведения ДЗ производится на основе сопоставления траектории  $Z_p(t)$  с расположением характеристики срабатывания ДЗ (рис. 7.29).

При этом возможность срабатывания ДЗ определяется нахождением участков траектории  $Z_p(t)$  внутри характеристики срабатывания, а точки  $Z_a$  и  $Z_b$  пересечения траектории с ХС определяют углы расхождения эквивалентных ЭДС  $\theta_a, \theta_b$ , соответствующие срабатыванию и возврату ДО.

Из (7.114) при  $Z_p(t) = Z_a$  и  $Z_p(t) = Z_b$  имеем:

$$\theta_a = \arg \frac{E_1}{E_2} = -\arg q_a = \arg \frac{Z_a + Z_1}{Z_a - Z_2};$$

$$\theta_b = \arg \frac{E_1}{E_2} = -\arg q_b = \arg \frac{Z_b + Z_1}{Z_b - Z_2}.$$

Одним из основных допущений при подобном подходе является замена подводимых к ДЗ действительных токов и напряжений с составляющими частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , эквивалентными синусоидальными сигналами с частотой  $\omega_0$  с переменной амплитудой и фазой, определяемыми выражением (7.113). В то же время ЭС и практически все ДЗ содержат частотно-зависимые цепи, параметры которых (сопротивление, коэффициенты передачи) зависят от частоты сигналов.

Анализ с учетом указанных факторов рассмотрен в [5].

## 7.8. Характеристики срабатывания дистанционных органов и определяющие их факторы

**Областью срабатывания ДО** называется область в плоскости одного из входных сопротивлений  $Z$ , например, по выражениям (7.8) и (7.9), соответствующая срабатыванию ДО при нахождении в ней контролируемого параметра  $Z_p = U_p/I_p$ .

**Характеристикой срабатывания ДО** называется граничная линия в плоскости  $Z$ , отделяющая область срабатывания от области несрабатывания при идеализированных условиях, соответствующих отсутствию влияния на область срабатывания ряда факторов (порога чувствительности, температуры, переходных процессов и т. д.).

В соответствии с дистанционным принципом защиты основным требованием, предъявляемым к характеристикам ДО, является обеспечение действия при одних удаленностях повреждений и недействия при других удаленностях и в режимах отсутствия повреждений. Для обеспечения этого требования ДО должен иметь характеристику срабатывания, охватывающую по крайней мере линию входного сопротивления при металлических повреждениях на ВЛ (пунктирная линия на рис. 7.6). Однако подобная узкая характеристика не обеспечивает полноценную защиту вследствие того, что необходимо учитывать влияние ряда других факторов, также определяющих действие ДО в режимах наличия и отсутствия повреждений. Наличие этих факторов требует как расширения области срабатывания ДО для обеспечения охвата возможных повреждений, так и сужения этой области для обеспечения несрабатывания при повреждениях вне защищаемых зон и в режимах отсутствия повреждений (см. §7.6). В первую очередь это следующие факторы.

**Переходное сопротивление в месте повреждения.** Наличие данного фактора обуславливает необходимость расширения ХС для охвата области входных сопротивлений при КЗ через переходное сопротивление (см. §7.3, рис. 7.11, 7.13 и 7.26). Однако следует учитывать, что при существенных сдвигах эквивалентных ЭДС по фазе и больших значениях коэффициента разветвления  $k_p$  по выражению (7.29), что имеет место при мощной системе, подпитывающей противоположный конец ВЛ ( $|Z_{c2}| < |Z_{c1} + Z_n|$  на рис. 7.25,а) эквивалентное переходное сопротивление  $Z_{п}$  по выражению (7.29) может вызывать излиш-

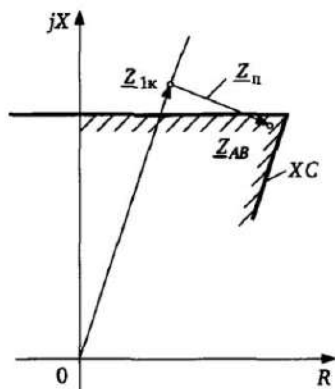


Рис. 7.30. Возможность излишнего срабатывания ДО при КЗ через переходное сопротивление

нее срабатывание при внешних повреждениях вследствие попадания результирующего вектора входного сопротивления по выражению (7.28) в область срабатывания ДО (см. рис. 7.22,б и 7.30).

**Различие токов в месте установки ДЗ и в месте КЗ для ДО резервных ступеней.** Как показано в §7.5, возможны значительные области расположения вектора входного сопротивления при повреждениях в зонах резервирования, отключаемых с выдержкой времени (см. например, рис. 7.26). Указанные области обусловлены наличием подпитки

места повреждения токами от различных источников и расхождением эквивалентных ЭДС по фазе. С учетом этого необходимо соответствующее расширение  $XС$  для обеспечения охвата области входного сопротивления при КЗ в зоне резервирования.

**Изменение областей срабатывания в зависимости от вида повреждения.** Как видно из табл. 2.2, входное сопротивление пропорционально расстоянию до места повреждения. Пропорциональность обеспечивается для отдельных ДО лишь при определенных видах повреждения, которые будем в дальнейшем называть *основными*, например для ДО<sub>AB</sub> при КЗ ABC, AB, AB0. Однако, определенные значения  $U_p = U_A$  и  $I_p = I_A - I_B$  подводятся к ДО<sub>AB</sub> и при других видах повреждений — *неосновных* для данного ДО (например A0, B0). В большинстве случаев при неосновных видах повреждений ДО не срабатывают или срабатывают лишь при близких к месту установки ДЗ повреждениях. При этом области срабатывания при неосновных повреждениях зависят от параметров нагрузочного режима ЭС (см. ниже).

В некоторых случаях, например при наличии устройства однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) на линиях, срабатывание ДО при неосновных повреждениях нежелательно даже при КЗ в зоне действия защиты, так как необходимо правильно фиксировать поврежденную фазу. Для



обеспечения этих требований ХС должна иметь определенную конфигурацию, в частности не охватывать области, куда может попасть входное сопротивление при неосновных повреждениях.

**Влияние режима нагрузки.** Характеристика срабатывания должна иметь такую конфигурацию, чтобы области нахождения входного сопротивления в нагрузочном режиме (см. §7.7, рис. 7.28) не пересекались с областями срабатывания. Указанное условие в ряде случаев вступает в противоречие с требованиями охвата дуговых повреждений и повреждений в зонах резервирования и требует определенных компромиссных решений при выборе характеристики срабатывания.

**Влияние режимов качаний и асинхронного хода.** Должно быть обеспечено отсутствие срабатывания ДО в режимах качаний и асинхронного хода с учетом возможных траекторий вектора входного сопротивления. Обычно это требование обеспечивается дополнительными функциями. Однако имеется ряд вариантов ДО, которые отстроены от режимов качаний по принципу действия. В любом случае бóльшая степень отстройки от этих режимов достигается при уменьшении областей срабатывания ДО.

**Погрешности, вносимые измерительными трансформаторами напряжения и тока.** Эти погрешности вызывают появление на входах к ДО величин  $U_p$ ,  $I_p$ , не соответствующих имеющемуся в действительности сопротивлению петли КЗ. Поэтому ХС должна обеспечивать с запасом охват необходимых областей с учетом погрешностей ТН и ТТ.

**Факторы, влияющие на статическую устойчивость функционирования ДО.** Конечная чувствительность и нелинейность элементов ДО, влияние температуры и других климатических факторов обуславливают отклонения ХС. Эти отклонения характеризуют статическую устойчивость функционирования ДО и должны учитываться для обеспечения правильного функционирования ДЗ в нагрузочных и установившихся режимах КЗ.

**Факторы, влияющие на динамическую устойчивость функционирования ДО [15].** При любых скачкообразных возмущениях (КЗ, коммутациях) в ЭС возникают переходные процессы, которые на определенное время искажают входные сигналы  $U_p$ ,  $I_p$ . Это приводит к неправильным действиям ДО (замедлениям при КЗ в зонах действия или излишним срабатываниям) и на-

рушениям динамической устойчивости функционирования. Конфигурация ХС также определенным образом влияет на динамическую устойчивость функционирования ДО. Так, расширение ХС приводит к уменьшению замедления в переходных режимах, но увеличивает область излишних срабатываний при внешних повреждениях; сужение ХС вызывает обратный эффект. Данные вопросы рассмотрены в гл. 2.

С учетом рассмотренных факторов определяются требования к характеристикам срабатывания отдельных ступеней ДЗ, в частности [16]. Основные требования к ХС первой ступени рассмотрим на примере ДО с четырехугольной ХС (рис. 7.31,а).

Ограничение сверху определяется уставкой ДО  $Z_y$ , характеризуемой выражением (7.2), а также вершинами  $Z_1, Z_2$ , выбираемыми на расстоянии от  $Z_y$  с целью охвата дуговых повреждений и обеспечения надежности и скорости срабатывания с учетом различных влияющих факторов. Небольшой наклон верхней стороны обеспечивает повышение селективности при внешних дуговых повреждениях (см. рис. 7.30).

Ограничение справа выбирается на определенном расстоянии от характеристики короткозамкнутой линии с целью охвата дуговых повреждений. Сопrotивление дуги  $R_d$  нелинейно и с приближением места КЗ к источнику питания значение  $R_d$  падает (см. §7.3). Поэтому правая сторона ХС  $Z_1Z_4$  (рис. 7.31,а) имеет наклон к оси  $R$ , учитывающий меньшие возможные значения  $R_d$  при близких дуговых замыканиях.

Ограничение области действия слева определяется возможными погрешностями ДО в статических и динамических режимах, а также и требованием необходимого быстродействия. При этом, чем больше точка  $Z_k$  удалена от стороны  $Z_2Z_3$ , тем с большими запасами обеспечивается срабатывание, и ДО имеет меньшие времена срабатывания. Существенное расширение области слева нежелательно ввиду возрастающей подверженности ДО влиянию качаний и ухудшения динамических характеристик в части расширения областей излишних срабатываний в переходных режимах.

Нижняя сторона  $Z_3Z_4$  характеристики в IV квадранте плоскости  $Z$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить надежное срабатывание при близких повреждениях через переходное сопротивление, когда входное сопротивление располагается вблизи активной оси.

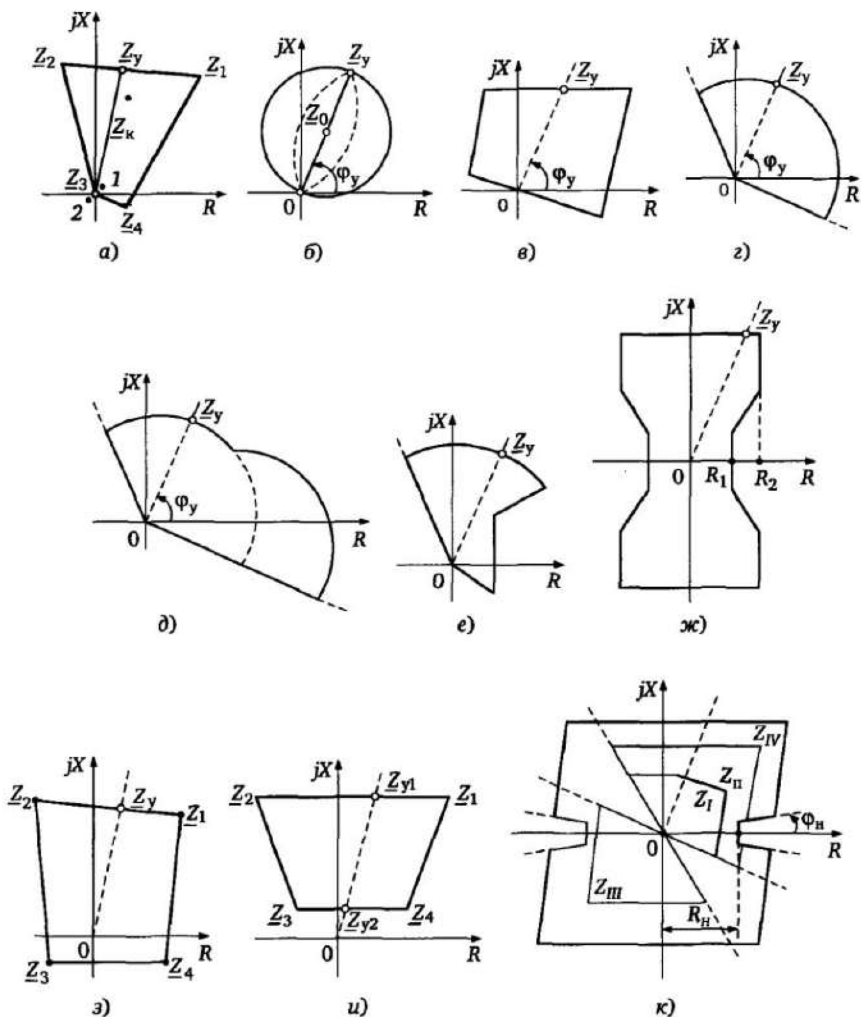


Рис. 7.31. Виды характеристик срабатывания ДО

Особые меры должны приниматься по обеспечению направленности ДО при повреждениях вблизи места установки ДЗ. Они определяются тем, что ДО должен надежно срабатывать при повреждениях в начале защищаемого участка (точка 1 на рис. 7.31,а) и надежно не срабатывать при повреждениях «за спиной» (точка 2). Точки 1 и 2 располагаются близко к точке  $Z = 0$  и характеризуются снижением практически до нуля на-

пряжения  $U_p$ . Токи при КЗ в точках 1 и 2 протекают в противоположных направлениях. Для четкой фиксации КЗ в этих точках необходимо принятие специальных мер — введение поляризующих цепей от других фаз, контуров памяти (см. §2,6).

Четырехугольная характеристика (рис. 7.31,а) не является единственно возможной для ДО первой ступени. В зависимости от класса напряжения и протяженности линий электропередачи, от значения передаваемых мощностей, ответственности объектов, возможностей технической реализации могут применяться различные виды ХС (рис. 7.31,б—е).

При этом возможны как повышение чувствительности к переходным сопротивлением при КЗ, например, для защит кабельных линий (рис. 7.31,з,д), так и в необходимых случаях дополнительные меры по отстройке от нагрузки защит протяженных ВЛ (рис. 7.31,е).

В отличие от ХС первой ступени, характеристика второй ступени должна перекрывать с учетом (7.5) всю защищаемую линию и участки соседних линий. Обеспечение надежного отключения повреждений в конце защищаемой линии требует расширения области срабатывания в верхней части ХС с учетом охвата повреждений при дуговых замыканиях и наличия подпиток места повреждения токами, протекающими через место установки ДЗ (см. §7.3). В этом плане многоугольные ХС имеют существенные преимущества перед круговыми.

Ограничение ХС справа выполняется с учетом тех же факторов, что и для ДО первой ступени. При выполнении второй ступени направленной требования к нижней части ХС такие же, как и для ДО первой ступени. При смещении ее в III и IV квадранты плоскости  $Z$  (рис. 7.31,ж, з) обеспечивается надежное действие второй ступени при КЗ в начале защищаемого участка и резервирование действия первых ступеней защит при КЗ на шинах подстанции.

Характеристики срабатывания третьей ступени имеют наибольшую зону срабатывания и выполняют функции дальнего резервирования (охвата смежного элемента сети). При этом необходимо обеспечить охват удаленных повреждений с учетом подпитки места КЗ от других источников и расхождений углов эквивалентных ЭДС (см. §7.6, рис. 7.26), что обуславливает необходимость охвата значительных областей плоскости  $Z$  в верхней части ХС (расширение ХС и увеличение уставок). Однако при

этом четырехугольные и круговые характеристики, проходящие через начало координат или охватывающие его, не всегда обеспечивают отстройку от нагрузочных режимов.

Поэтому принимают компромиссное решение, исключаяющее (рис. 7.31,и) или сужающее (рис. 7.31,е) с целью отстройки от нагрузки области в нижней части ХС, но расширяющее области в конце зоны действия.

Смещение ХС вверх (рис. 7.31,и) обеспечивает отстройку от нагрузочных режимов при сохранении чувствительности к удаленным повреждениям.

На рис. 7.31,к иллюстрируются возможности использования направленных в прямом направлении ( $Z_I, Z_{II}$ ), в обратном направлении ( $Z_{III}$ ) и ненаправленных ( $Z_{IV}$ ) ступеней дистанционной защиты [9]. При этом величины  $\varphi_n$  и  $R_n$  характеризуют максимальную нагрузку и также являются параметрами и устанавливаются пользователем.

Это позволяет иметь конфигурацию характеристики срабатывания ДО, оптимизированную относительно параметров нагрузочного режима. В зависимости от конкретных условий, в первую очередь от параметров, режимов и конфигурации сети, требуются различные формы ХС, обеспечивающие необходимые чувствительность и селективность ДЗ. Поэтому одним из требований к ХС является возможность их регулировки применительно к реальным изменяющимся условиям. Во всех ДО имеется регулировка масштаба, а часто и конфигурации ХС в плоскости сопротивлений.

## 7.9. Характеристики срабатывания ДО при различных видах повреждений в трехфазных сетях

### 7.9.1. Основные и неосновные повреждения

Как следует из изложенного в гл. 2, пофазные и трехфазные ДО наиболее эффективно действуют лишь при определенных видах повреждений в трехфазных сетях, когда входное сопротивление  $Z_p = U_p/I_p$  характеризует в существенной степени удаленность места повреждения от места установки защиты. С учетом этих видов повреждений выбираются характеристики и уставки ДО. Эти повреждения являются *основными* для рассматриваемых ДО. Обеспечение отключений всех возможных повреждений производится совокупностью различных ДО либо ДО и измерительных органов другого типа (тока, напряжения, направ-

ления мощности). При этом нельзя не учитывать то обстоятельство, что при повреждениях, которые не являются для данного ДО основными, на входе ДО также имеются токи и напряжения, на которые ДО определенным образом реагирует. В таких условиях ДО не должен действовать при КЗ вне защищаемой зоны, а иногда, например при наличии устройства ОАПВ, и при некоторых видах повреждений на защищаемом участке, что дает возможность различать однофазные и междуфазные КЗ. Поэтому поведение ДО должно анализироваться и при неосновных для него повреждениях в ЭС.

Многочисленные исследования (например, [4, 5, 47]) показывают, что у многих пофазных ДО и у всех трехфазных ДО характеристики срабатывания как при основных, так и неосновных повреждениях неоднозначны и зависят не только от выполнения ДО, но и от параметров ЭС (соотношений между сопротивлениями отдельных последовательностей в ЭС, переходного сопротивления КЗ, передаваемых по ВЛ мощностей в доаварийном режиме, вида и места повреждения).

В частности, поведение пофазного ДО, например, ДО<sub>AB</sub> анализируется достаточно просто лишь при металлических КЗ АВ, АВ0, АВС на основе соотношений (7.8) и при КЗ через переходное сопротивление при одностороннем питании на основе соотношения (7.30) путем сопоставления значения  $Z_{\text{лк}}$  с характеристикой срабатывания ДО в плоскости  $Z_{AB}$  (см. рис. 7.31).

Замер ДО при этом зависит только от сопротивления петли КЗ и не зависит от параметров и режимов ЭС. При этих же видах КЗ через переходное сопротивление в сети с двусторонним питанием замер ДО определяется с учетом (7.28) и (7.29) не только сопротивлением петли КЗ, но и параметрами ЭС, от которых зависит коэффициент разветвления токов  $k_p$ . В данном случае также можно использовать характеристику срабатывания ДО в плоскости  $Z_{AB}$ . Возникает вопрос об анализе поведения ДО<sub>AB</sub> при других видах КЗ (BC, CA, BC0, CA0, A0, B0, C0). Использование в прямом виде характеристик ДО в плоскости основного повреждения  $Z_{AB}$  при этом невозможно.

В то же время, этот анализ необходим для оценки правильности и эффективности функционирования ДО при различных видах повреждений в зоне и вне зоны действия. Так же как и при основных повреждениях, для оценки поведения ДО при неосновных повреждениях необходимо иметь характеристики ДО в той

плоскости, которой соответствует повреждение и где можно построить характеристику ВЛ по сопротивлению петли КЗ. Для этого надо получить характеристики срабатывания ДО<sub>AB</sub> в плоскостях входных сопротивлений  $\underline{Z}_{BC}$  (при КЗ BC и BC0),  $\underline{Z}_{AC}$  (при КЗ AC и AC0),  $\underline{Z}_{A0}$ ,  $\underline{Z}_{B0}$ ,  $\underline{Z}_{C0}$  (при однофазных КЗ), определяемых соотношениями (7.8) и (7.9). Однако характеристики пофазных ДО в плоскостях неосновных повреждений неоднозначны; их построение достаточно сложно и зависит от конфигурации, параметров и режима ЭС.

### 7.9.2. Измерение петли фаза—земля при двухфазных КЗ на землю

Рассмотрим, в качестве примера, практически важный случай анализа ДО, измеряющих петлю фаза—земля (B0, C0) при междуфазных замыканиях на землю BC0 через переходное сопротивление (см. рис. 7.18,в). С учетом обозначений (7.68) при КЗ через переходное сопротивление  $R_{\pi}$  справедливы следующие значения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_0$  в выражениях (7.70) и (7.71):

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_{\pi}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + 2(\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_{\pi})}; \quad \alpha_0 = \frac{\underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + 2(\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_{\pi})}. \quad (7.117)$$

По аналогии с (7.73) имеем значение фазного тока  $I_B$

$$\begin{aligned} I_B &= a^2 I_N + a^2 I_{1ав} + a I_2 + I_0 = \\ &= \frac{U_{к.н}}{\underline{Z}_{1\Sigma}} \left[ a^2 (k_n - \alpha_1) - a \alpha_2 - \alpha_0 \frac{\underline{Z}_{1\Sigma k}}{\underline{Z}_{0\Sigma k}} \right]. \end{aligned} \quad (7.118)$$

Сопротивление на входе ДО, измеряющего петлю B0 фаза—земля, имеет значение

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{B0} &= \frac{U_B}{I_B + k_0 3I_0} = \frac{a^2 \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{1к} + a \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{1к} + I_0 (\underline{Z}_{0к} + 3R_{\pi})}{a^2 \underline{I}_{A1} + a \underline{I}_{A2} + I_0 + (\underline{Z}_{0к} - \underline{Z}_{1к}) \frac{I_0}{\underline{Z}_{1к}}} = \\ &= \underline{Z}_{1к} + \frac{R_{\pi}}{\frac{I_B}{3I_0} + k_0} \frac{I_{0к}}{I_0}. \end{aligned} \quad (7.119)$$

Подставив в (7.119) значение  $I_B$  из (7.118), получим с учетом значений  $\alpha$  из (7.117) и значения  $I_0$  из (7.72)

$$\underline{Z}_{B0} = \underline{Z}_{1к} + k_1 \frac{R_{\pi}}{\frac{R_{\pi}}{k_{3B}} + k_2}, \quad (7.120)$$

где  $k_1$  — определяется выражением (7.75);

$$\left. \begin{aligned} k_{3B} &= -\frac{\underline{Z}_{1\Sigmaк} \underline{Z}_{1\Sigma}}{(1+2a^2 k_H) \underline{Z}_{0\Sigmaк}}; \\ k_2 &= -\frac{(1+2a^2 k_H) \underline{Z}_{0\Sigmaк}}{3 \underline{Z}_{1\Sigmaк} \underline{Z}_{0\Sigma}} - \frac{a^2 k_H \underline{Z}_{1\Sigma} \underline{Z}_{0\Sigmaк}}{3 \underline{Z}_{1\Sigmaк}} + \frac{3k_0 + 1}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (7.121)$$

Значения  $k_0$  и  $k_H$  в (7.121) определяются соответственно выражениями (7.18) и (7.69). Выражение (7.120) преобразуем к виду

$$\frac{R_{\pi}}{b_1} = \frac{\underline{Z}_{B0} - \underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{B0} - \underline{Z}_{FB}}, \quad (7.122)$$

где

$$\underline{Z}_{FB} = \underline{Z}_{1к} + k_1 k_{3B} = \underline{Z}_{1к} - \frac{\underline{Z}_{1\Sigmaк}}{1+2a^2 k_H}; \quad (7.123)$$

$$b_1 = -k_2 k_{3B} = -\frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{0\Sigma} + \frac{a^2 k_H \underline{Z}_{1\Sigmaк}}{1+2a^2 k_H} - \frac{(3k_0 + 1) \underline{Z}_{1\Sigmaк}}{1+2a^2 k_H} \right]. \quad (7.124)$$

При изменении  $R_{\pi}$  от 0 до  $\infty$  аргумент левой части выражения (7.122) не изменяется и равен  $\delta = -\arg b_1$ . С учетом этого линия замера ДО в плоскости  $\underline{Z}_{B0}$  определяется соотношением

$$\arg \frac{\underline{Z}_{B0} - \underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{B0} - \underline{Z}_{FB}} = -\arg b_1 = \delta_1. \quad (7.125)$$

В соответствии с приложением 1 выражению (7.125) соответствует в плоскости  $\underline{Z}_{B0}$  дуга окружности с вписанным углом  $\delta_1$ ,



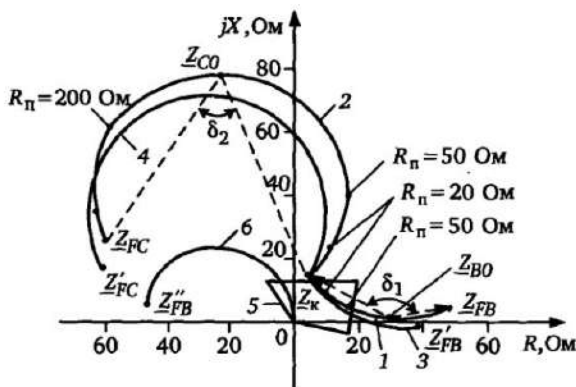


Рис. 7.32. Траектории опережающей фазы  $BO$  (1, 3) и отстающей фазы  $CO$  (2, 4) при КЗ  $BCO$  с переходным сопротивлением  $R_n$ , изменяющимся от 0 до  $\infty$ : 1, 2 — при одностороннем питании; 3, 4 — при двустороннем питании; 5 — характеристика срабатывания ДО; 6 — траектория фазы  $BO$  при КЗ  $BCO$  «за спиной»

опирающимся на точки  $Z_k = Z_{1k}$  и  $Z_{FB}$  (рис. 7.32). При этом точка  $Z_{BO} = Z_{1k}$  соответствует замеру при металлическом КЗ  $BCO$  на землю ( $R_n = 0$ ), а точка  $Z_{BO} = Z_{FB}$  соответствует замеру  $BO$  при междуфазном КЗ  $BC$  в той же точке ( $R_n = \infty$ ). Центр окружности определится выражением (7.83) при  $\gamma = -\delta_1$ ,  $Z_H = Z_{FB}$ .

Аналогичные соотношения имеют место для траектории замера фазы  $C$  (рис. 7.32).

При этом траектория  $Z_{CO}$  также является дугой окружности, опирающейся на точки  $Z_{1k}$  и  $Z_{FC}$ , описываемой уравнением

$$\arg \frac{Z_{CO} - Z_{1k}}{Z_{CO} - Z_{FC}} = -\arg b_2 = \delta_2, \quad (7.126)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Z_{FC} &= Z_{1k} - \frac{Z_{1\sigma k}}{1 + 2ak_H}; \\ b_2 &= -\frac{1}{3} \left[ Z_{0\sigma k} + \frac{ak_H Z_{1\sigma k}}{1 + 2ak_H} - \frac{(3k_0 + 1)Z_{1\sigma k}}{1 + 2ak_H} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7.127)$$

При одностороннем питании ( $k_H = 1$ ;  $Z_{1\sigma k} = Z_{1\sigma}$ ;  $Z_{0\sigma k} = Z_{0\sigma}$ ) выражения для коэффициентов, определяющих траектории  $Z_{BO}$ ,  $Z_{CO}$  несколько упрощаются:

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{Z}_{FB} &= \underline{Z}_{1к} - \frac{\underline{Z}_{1\Sigmaк}}{a^2 - a} = \underline{Z}_{1к} - \frac{j}{\sqrt{3}}(\underline{Z}_{1s} + \underline{Z}_{1к}); \\
 \underline{Z}_{FC} &= \underline{Z}_{1к} + \frac{\underline{Z}_{1\Sigmaк}}{a^2 - a} = \underline{Z}_{1к} + \frac{j}{\sqrt{3}}(\underline{Z}_{1s} + \underline{Z}_{1к}); \\
 \delta_1 &= -\arg \left\{ \underline{Z}_{1\Sigmaк} \left[ \frac{k_0}{a^2 - a} + \frac{1}{3}a - \frac{\underline{Z}_{0\Sigmaк}}{3\underline{Z}_{1\Sigmaк}} \right] \right\}; \\
 \delta_2 &= -\arg \left\{ \underline{Z}_{1\Sigmaк} \left[ \frac{k_0}{a - a^2} + \frac{1}{3}a^2 - \frac{\underline{Z}_{0\Sigmaк}}{3\underline{Z}_{1\Sigmaк}} \right] \right\}.
 \end{aligned} \right\} \quad (7.128)$$

В качестве примера на рис. 7.32 приведены траектории  $\underline{Z}_{B0}$  и  $\underline{Z}_{C0}$  для случаев ЭС с односторонним и двусторонним питанием при двухфазном КЗ на землю BC0 с переходным сопротивлением  $R_{п}$ , изменяющимся от 0 до  $\infty$ . Параметры ЭС, Ом:  $\underline{Z}_{1s} = 6 + j73$ ;  $\underline{Z}_{0s} = 100 + j8$ ;  $\underline{Z}_{1к} = 0,9 + j12,6$ ;  $\underline{Z}_{0к} = 8 + j48$ ;  $\underline{Z}_{1q} = 3,6 + j50$ ;  $\underline{Z}_{0q} = 5,54 + j70$ . При двустороннем питании по линии передается номинальная мощность.

Как видно из рис. 7.32, замер петли фаза—земля при двухфазных КЗ на землю через переходное сопротивление может существенно уменьшиться по реактивной составляющей для опережающей фазы, например фазы В, при КЗ BC0 (характеристики 1 и 3). Без принятия специальных мер это может привести к неселективному действию защиты при внешних КЗ, например, на шинах смежной подстанции. Рисунок 7.32 иллюстрирует указанный случай, когда при внешнем КЗ BC0, соответствующем токе  $\underline{Z}_к = \underline{Z}_{1к}$ , расположенной вне характеристики срабатывания 5, замер фазы B0 при переходном сопротивлении на землю  $R_{п} \approx 10 \div 50$  Ом входит в характеристику срабатывания ДО.

Рассмотренный эффект необходимо учитывать при проектировании защит, принимая специальные меры, например, выделяя двухфазные КЗ на землю и блокируя замеры петли фаза—земля в этих случаях. Для этого необходима фиксация вида повреждения (см. §7.11).

Аналогичный эффект срабатывания опережающей фазы может происходить при двухфазном КЗ через переходное сопротивление «за спиной» ( $\underline{Z}_{1к} = 0$ ) — дуга окружности б, опирающаяся на точки  $\underline{Z}_{1к} = 0$  и  $\underline{Z}'_{FB}$  (см. рис. 7.32).

Другой возможностью предотвращения неправильного действия ДО в данном случае в цифровых защитах является коррек-

тировка  $Z$ -измерений, рассмотренная в §7.3. Эффект корректировки измерений при однофазных КЗ (см. рис. 7.19,б) заключается в том, что траектория замера 1 опирается не на точку  $Z_H$ , а на точку  $Z'_K$ , расположенную значительно ближе к точке замера  $Z_K$  при металлических КЗ.

Уравнения траектории  $Z_{B0}$  и  $Z_{C0}$  определяется в этом случае выражениями (7.125) и (7.126) при новых координатах точек  $Z'_{FB}$  и  $Z'_{FC}$ :

$$\left. \begin{aligned} Z'_{FB} &= k Z_K + (1-k)Z_{FB}; \\ Z'_{FC} &= k Z_K + (1-k)Z_{FC}, \end{aligned} \right\}$$

где коэффициент  $k$  определяется выражением (7.84).

### 7.9.3. Анализ характеристик ДО в плоскостях неосновных повреждений

Характеристики ДО в областях основных повреждений (см. рис. 7.31) определяют прежде всего защищаемую зону объекта, например ВЛ, при основных повреждениях, в том числе с учетом определенных ограничений (см. §7.3) при КЗ через переходное сопротивление.

Однако при рассматриваемом виде КЗ изменяются в общем случае токи и напряжения всех фаз, в том числе используемых для обнаружения повреждений другого вида, что при определенных условиях может привести к их срабатыванию. Данные повреждения являются для органов обнаружения других видов КЗ неосновными. Анализ повреждения ДО при неосновных повреждениях достаточно важен, так как позволяет избежать неселективного срабатывания ДО, включаемых на неповрежденные фазы. Это дает возможность также правильно выбрать алгоритмы и характеристики органов фиксации поврежденных фаз, в частности при использовании однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) линии.

Для ЭС (см. рис. 7.18,а) имеем следующие значения токов и напряжений в месте установки ДО (точка 1):

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_H + I_{1ав} + I_2 + I_0; \\ I_B &= a^2 I_H + a^2 I_{1ав} + a I_2 + I_0; \\ I_C &= a I_H + a I_{1ав} + a^2 I_2 + I_0 \end{aligned} \right\} \quad (7.129)$$

Значения  $I_A, I_B, I_C$  получены на основе использования метода наложения, т. е. путем суммирования составляющих двух режимов в ЭС — нагрузочного (предаварийного) режима, в котором определяется значение тока нагрузки  $I_H$  в фазе А, и дополнительного режима, получающегося при подключении к месту КЗ соответствующих напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей при равенстве нулю ЭДС генераторов. При этом  $I_{1ав}$  — аварийная составляющая тока прямой последовательности, создаваемая в точке 1 (см. рис. 7.18,а) напряжением прямой последовательности в дополнительном режиме;  $I_2, I_0$  — составляющие обратной и нулевой последовательностей в точке 1;  $a = e^{j120^\circ}$  — оператор поворота вектора. Составляющие фазных напряжений в точке 1 установки ДО с учетом применения метода наложения равны

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_H - I_{1ав} \underline{Z}_{1c} - I_2 \underline{Z}_{1c} - I_0 \underline{Z}_{0c}; \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_H - a^2 I_{1ав} \underline{Z}_{1c} - a I_2 \underline{Z}_{1c} - I_0 \underline{Z}_{0c}; \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_H - a I_{1ав} \underline{Z}_{1c} - a^2 I_2 \underline{Z}_{1c} - I_0 \underline{Z}_{0c}, \end{aligned} \right\} \quad (7.130)$$

где  $\underline{U}_H$  — напряжение в точке 1 в нагрузочном режиме.

Обозначив

$$\underline{k}_{21} = \frac{I_2}{I_{1ав}}; \quad \underline{k}_{01} = \frac{I_0}{I_{1ав}}, \quad (7.131)$$

из (7.129) и (7.130) получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_H + \underline{k}_A I_{1ав}; \quad \underline{k}_A = 1 + \underline{k}_{21} + \underline{k}_{01}; \\ \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_H + \underline{k}_B I_{1ав}; \quad \underline{k}_B = a^2 + a \underline{k}_{21} + \underline{k}_{01}; \\ \underline{I}_C &= a \underline{I}_H + \underline{k}_C a I_{1ав}; \quad \underline{k}_C = a + a^2 \underline{k}_{21} + \underline{k}_{01}; \end{aligned} \right\} \quad (7.132)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{I}_H \underline{Z}_H - \underline{d}_A I_{1ав}; \quad \underline{d}_A = (1 + \underline{k}_{21}) \underline{Z}_{1c} + \underline{k}_{01} \underline{Z}_{0c}; \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{I}_H \underline{Z}_H - \underline{d}_B I_{1ав}; \quad \underline{d}_B = (a^2 + a \underline{k}_{21}) \underline{Z}_{1c} + \underline{k}_{01} \underline{Z}_{0c}; \\ \underline{U}_C &= a \underline{I}_H \underline{Z}_H - \underline{d}_C I_{1ав}; \quad \underline{d}_C = (a + a^2 \underline{k}_{21}) \underline{Z}_{1c} + \underline{k}_{01} \underline{Z}_{0c}, \end{aligned} \right\} \quad (7.133)$$

где  $\underline{Z}_H = \underline{U}_H / I_H$  — сопротивление на входе ДО в нагрузочном режиме. Входные сопротивления  $\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{BC}, \underline{Z}_{CA}, \underline{Z}_{A0}, \underline{Z}_{B0}, \underline{Z}_{C0}$ , в пло-

скостях которых строятся характеристики линии в зависимости от видов междуфазных и однофазных повреждений, и характеристики пофазных ДО для оценки защищаемых зон определяются соотношениями (7.8) и (7.9).

Вводя параметр

$$\underline{g} = \frac{I_{1ab}}{I_H}, \quad (7.134)$$

выразим с учетом значений  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C, \underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  в (7.132) и (7.133) входные сопротивления  $\underline{Z}_{AB}, \dots, \underline{Z}_{C0}$  по выражениям (7.8) и (7.9) как функцию  $\underline{g}, \underline{Z}_H$  и параметров ЭС, характеризуемых коэффициентами  $\underline{k}_A, \underline{k}_B, \underline{k}_C, \underline{d}_A, \underline{d}_B, \underline{d}_C$ . В результате получим при  $\underline{k} = 3\underline{k}_0$ :

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\underline{I}_A - \underline{I}_B} = \frac{\underline{Z}_H(1 - a^2) - \underline{g}\underline{d}_{AB}}{1 - a^2 + \underline{g}\underline{k}_{AB}}; \quad (7.135)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{\underline{I}_B - \underline{I}_C} = \frac{\underline{Z}_H(a^2 - a) - \underline{g}\underline{d}_{BC}}{a^2 - a + \underline{g}\underline{k}_{BC}}; \quad (7.136)$$

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_A}{\underline{I}_C - \underline{I}_A} = \frac{\underline{Z}_H(a - 1) - \underline{g}\underline{d}_{CA}}{a - 1 + \underline{g}\underline{k}_{CA}}; \quad (7.137)$$

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A + \underline{k}\underline{I}_0} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{g}\underline{d}_A}{1 + \underline{g}\underline{k}_{A0}}; \quad (7.138)$$

$$\underline{Z}_{B0} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{I}_B + \underline{k}\underline{I}_0} = \frac{a^2 \underline{Z}_H - \underline{g}\underline{d}_B}{a^2 + \underline{g}\underline{k}_{B0}}; \quad (7.139)$$

$$\underline{Z}_{C0} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{I}_C + \underline{k}\underline{I}_0} = \frac{a \underline{Z}_H - \underline{g}\underline{d}_C}{a + \underline{g}\underline{k}_{C0}}; \quad (7.140)$$

где

$$\begin{aligned}
 k_{AB} &= k_A - k_B; \quad k_{BC} = k_B - k_C; \quad k_{CA} = k_C - k_A; \quad d_{AB} = d_A - d_B; \\
 d_{BC} &= d_B - d_C; \quad d_{CA} = d_C - d_A; \quad k_{A0} = k_A + k k_{01}; \quad k_{B0} = k_B + k k_{01}; \\
 k_{C0} &= k_C + k k_{01}.
 \end{aligned}
 \tag{7.141}$$

Значения коэффициентов  $k_{AB}$ — $k_{C0}$  различны в зависимости от вида повреждения, так как каждому виду повреждения соответствуют свои коэффициенты  $k_{21}$ ,  $k_{01}$ , входящие в выражения (7.131) и (7.132).

На основе соотношений (7.135)—(7.140) найдем зависимости между замерами в различных плоскостях при одном и том же виде повреждения. Рассмотрим, в частности, КЗ АВ в трехфазной сети. Построив в плоскости  $Z_{AB}$  характеристику линии и характеристику срабатывания ДО<sub>AB</sub>, можно проанализировать поведение ДО<sub>AB</sub>. Для оценки поведения ДО<sub>AB</sub> при КЗ ВС необходимо построить характеристику ДО<sub>AB</sub> в плоскости  $Z_{BC}$ , где строится характеристика линии.

На основе соотношений (7.135) и (7.136) при фиксированном виде повреждения и параметрах ЭС можно найти зависимости, связывающие замеры в плоскостях  $Z_{AB}$  и  $Z_{BC}$ . Для этого необходимо выразить значения параметра  $g$ , входящего в оба указанных выражения, через  $Z_{AB}$  и  $Z_{BC}$  и приравнять  $g$  между собой. Из (7.135) — (7.140) имеем следующие значения  $g$ , выраженные через входные сопротивления в различных плоскостях:

$$g = \frac{(1-a^2)(Z_H - Z_{AB})}{k_{AB} Z_{AB} + d_{AB}};
 \tag{7.142}$$

$$g = \frac{(a^2-a)(Z_H - Z_{BC})}{k_{BC} Z_{BC} + d_{BC}};
 \tag{7.143}$$

$$g = \frac{(a-1)(Z_H - Z_{CA})}{k_{CA} Z_{CA} + d_{CA}};
 \tag{7.144}$$

$$g = \frac{Z_H - Z_{A0}}{k_{A0} Z_{A0} + d_A};
 \tag{7.145}$$

$$\underline{g} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_{B0}}{\underline{k}_{B0}\underline{Z}_{B0} + \underline{d}_B}; \quad (7.146)$$

$$\underline{g} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_{C0}}{\underline{k}_{C0}\underline{Z}_{C0} + \underline{d}_C}. \quad (7.147)$$

Для одного и того же любого вида КЗ и режима ЭС все значения  $\underline{g} = I_{1ав}/I_H$  одинаковы. Поэтому, приравнявая любые два значения  $\underline{g}$  из (7.142) — (7.147), можно получить связь между замерами в соответствующих плоскостях сопротивлений. В частности, в рассматриваемом случае воспользуемся соотношениями (7.142) и (7.143). Приравняв в них значения  $\underline{g}$ , получим после преобразований

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{\underline{Z}_{AB}(\underline{Z}_H \underline{k}_{AB} + a \underline{d}_{BC}) + \underline{Z}_H(\underline{d}_{AB} - a \underline{d}_{BC})}{\underline{Z}_{AB}(\underline{Z}_H \underline{k}_{AB} - a \underline{k}_{BC}) + a \underline{Z}_H \underline{k}_{BC} + \underline{d}_{AB}} = \frac{a_1 \underline{Z}_{AB} + b_1}{c_1 \underline{Z}_{AB} + d_1}. \quad (7.148)$$

Таким образом, характеристику  $\underline{D}O_{AB}$  в плоскости  $\underline{Z}_{BC}$  можно построить по известной ХС в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$  путем преобразования каждой ее точки на основе (7.148). Построив подобным образом ХС в плоскости, соответствующей повреждению (в частности, характеристику  $\underline{D}O_{AB}$  в плоскости  $\underline{Z}_{BC}$ ), можно определить с учетом характеристики ВЛ в данной плоскости области действия и недействия ДО при неосновном повреждении.

Преобразование типа (7.148) является дробно-линейным, откуда следует, что любые ХС, ограниченные прямыми, окружностями и их комбинациями в плоскости основного повреждения, конформно отображаются в плоскости неосновного повреждения также в ХС, ограниченных прямыми, окружностями и их комбинациями. Пусть характеристика  $\underline{D}O_{BC}$  в плоскости основного повреждения  $\underline{Z}_{BC}$  является произвольно расположенной окружностью радиусом  $r$  с центром в точке  $\underline{m}$  (рис. 7.33,а, характеристика 1).

Уравнение этой характеристики в плоскости основного повреждения имеет вид

$$\underline{Z}_{BC} = \underline{m} + re^{j\psi}; \quad 0 \leq \psi \leq 2\pi. \quad (7.149)$$

Уравнение срабатывания  $\text{ДО}_{BC}$  в плоскости неосновного повреждения  $\underline{Z}_{AB}$  получим, используя соотношение (7.148), подставив в его левую часть вместо  $\underline{Z}_{BC}$  его значение при срабатывании из (7.149). В результате получим уравнение с одним неизвестным  $\underline{Z}_{AB}$ , соответствующее характеристике срабатывания  $\text{ДО}_{BC}$  в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$ :

$$\underline{m} + re^{j\psi} = \frac{a_1 \underline{Z}_{AB} + b_1}{c_1 \underline{Z}_{AB} + d_1}, \quad (7.150)$$

Приведем (7.150) к виду

$$e^{j\psi} = \underline{h} \frac{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_1}{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_2}, \quad (7.151)$$

где

$$\underline{h} = \frac{a_1 - c_1 \underline{m}}{r c_1}; \quad \underline{p}_1 = \frac{b_1 - \underline{m}_1 d_1}{c_1 \underline{m}_1 - a_1}; \quad \underline{p}_2 = -\frac{d_1}{c_1}. \quad (7.152)$$

Так как при любом  $\psi$  модуль левой части (7.151) равен единице, то уравнение ХС в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$  примет вид

$$\underline{h} \left| \frac{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_1}{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_2} \right| = 1. \quad (7.153)$$

Уравнения (7.153) и (П2.3) полностью эквивалентны при замене  $\underline{h}$  на  $\underline{k}$ ,  $\underline{p}_1$  на  $\underline{a}$ ,  $\underline{p}_2$  на  $\underline{b}$ . Поэтому ХС в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$  — есть окружность, имеющая с учетом (П2.10) и (П2.11) координату центра  $\underline{M}$  и радиус  $A$ :

$$\underline{M} = \frac{h^2 \underline{p}_1 - \underline{p}_2}{h^2 - 1}; \quad A = \frac{h |\underline{p}_1 - \underline{p}_2|}{|h^2 - 1|}. \quad (7.154)$$

В частном случае, при  $h = 1$ , ХС — есть прямая в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$ , относительно которой точки  $\underline{p}_1$ , и  $\underline{p}_2$  расположены симметрично. При характеристике срабатывания  $\text{ДО}_{BC}$  в плоскости  $\underline{Z}_{BC}$  в виде произвольно расположенной прямой (рис. 7.33,а, характеристика 2) уравнение граничной линии имеет вид



$$\underline{Z}_{BC} = \left( |\underline{m}| + D e^{\pm j \frac{\pi}{2}} \right) e^{j\alpha}; \quad -\infty \leq D \leq \infty. \quad (7.155)$$

Подставив данное значение  $\underline{Z}_{BC}$  в (7.148), после преобразований получим уравнение характеристики срабатывания ДО<sub>BC</sub> в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$  при  $\alpha = \arg \underline{m}$  (см. рис. 7.33,а):

$$D e^{j\alpha} e^{\pm j \frac{\pi}{2}} = \underline{h} \frac{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_1}{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_2}; \quad -\infty \leq D \leq \infty, \quad (7.156)$$

где  $\underline{h}$ ,  $\underline{p}_1$ ,  $\underline{p}_2$  определяются из (7.152).

Учитывая, что при изменении  $D$  аргумент левой части (7.150) не изменяется, уравнение (7.156) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{\pi}{2} + \alpha - \arg \underline{h} = \arg \frac{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_1}{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_2}; \\ \varphi_2 &= \frac{\pi}{2} + \alpha - \arg \underline{h} = \arg \frac{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_1}{\underline{Z}_{AB} - \underline{p}_2}. \end{aligned} \right\} \quad (7.157)$$

С учетом приложения 1, выражению (7.157) соответствуют в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$  две дуги, опирающиеся на точки  $\underline{p}_1$ ,  $\underline{p}_2$  с вписанными углами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ . В совокупности они образуют окружность (рис. 7.33,б), которая и является в данном случае характеристикой ДО<sub>BC</sub> в плоскости  $\underline{Z}_{AB}$ . В частном случае, при  $\varphi_1 = 0(\pi)$ ,  $\varphi_2 = \pi(0)$ , ХС есть прямая, проходящая через точки  $\underline{p}_1$ ,  $\underline{p}_2$ .

Аналогичным методом на основе соотношений (7.135)—(7.140) и (7.142)—(7.147) можно проанализировать поведение других пофазных ДО при любом из неосновных повреждений (междуфазном или однофазном). Для этого необходимо, приравняв значения  $g$  для плоскостей основного и неосновного повреждений, получить в явном виде зависимость типа (7.148), характеризующую связь между соответствующими входными сопротивлениями.

Таким образом, методика анализа пофазных органов ступени ДЗ при любом виде повреждения, которое принимается в данном случае основным, сводится к построению в плоскости основного повреждения помимо характеристики ДО, предназ-

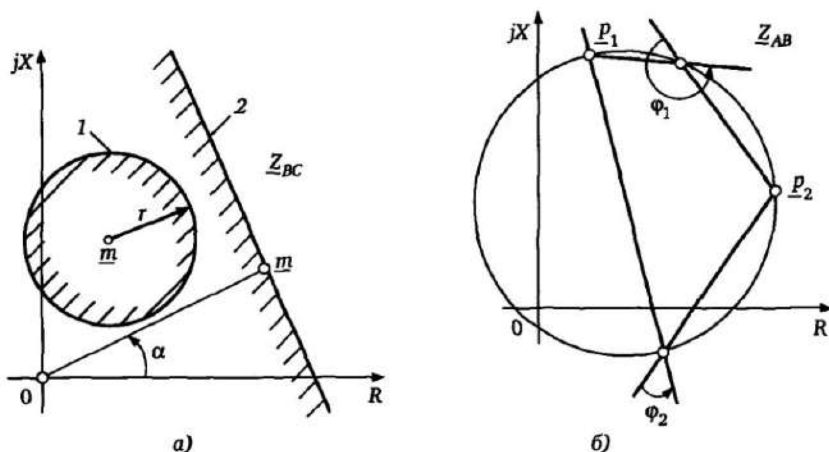


Рис. 7.33. Конформное отображение характеристик ДО в плоскостях основных и неосновных повреждений

наченного для действия при этом виде повреждения, характеристик двух других ДО, для которых данное повреждение не является основным. При этом используются соотношения (7.152), (7.154) и (7.157) для ДО с круговыми и прямолинейными характеристиками в плоскости основного повреждения или более сложными комбинированными характеристиками, ограниченными комбинациями окружностей и прямых. Коэффициенты, необходимые для нахождения значений  $\underline{L}$ ,  $\underline{P}_1$ ,  $\underline{P}_2$ ,  $\varphi$  в выражениях (7.152), (7.154) и (7.157), определяются параметрами  $\underline{m}$ ,  $r$ ,  $\alpha$  характеристик ДО в плоскости основного повреждения (см. рис. 7.33). Поведение отдельных ДО, установленных в различных фазах, при рассматриваемом виде повреждения анализируется путем сопоставления одного входного сопротивления при данном виде повреждения с характеристиками всех ДО, построенными в одной плоскости основного повреждения.

При повреждениях в обратном направлении по отношению к месту установки ДО («за спиной») изменяются направления токов  $I_{1ав}$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  в уравнениях (7.130), так как место приложения аварийных составляющих отдельных последовательностей изменилось по отношению к месту установки ДО. С учетом этого необходимо изменить знаки коэффициентов  $\underline{d}_A$ ,  $\underline{d}_B$ ,  $\underline{d}_C$  в (7.133) и в последующих выражениях.

Значение коэффициента  $k_{01} = I_0/I_{1ав}$  в общем случае изменяется при перемещении КЗ по линии и определяется соотношением  $k_{01} = k_p k'_0$ , где  $k'_0 = I_{0к}/I'_{ав}$  — соотношение между током нулевой последовательности и аварийной составляющей тока прямой последовательности в месте КЗ;  $k_p$  — коэффициент, учитывающий неодинаковость распределения в ЭС токов нулевой и прямой последовательностей ввиду различия схем замещения для этих последовательностей. В пределах рассматриваемых участков линий для упрощения анализа можно принять коэффициент  $k_{01}$  в (7.131) постоянным [47] либо построить характеристики, соответствующие его нескольким значениям при КЗ в различных точках линии.

Значения коэффициентов  $k_{21}$  и  $k_{01}$  по выражению (7.131) при различных видах КЗ и условии равенства сопротивлений прямой и обратной последовательности элементов ЭС приведены в табл. 7.1, где  $k_c = Z_0/Z_1$  — принимаемый приближенно постоянным коэффициент.

В качестве примера на рис. 7.34 приведены характеристики ДО поврежденной фазы А0 избирателя поврежденных фаз устройства ОАПВ [5], имеющего характеристику срабатывания в виде комбинации двух окружностей  $1_{A0}$ ,  $2_{A0}$  (заштрихованные области на рис. 7.34,а,б).

Там же приведены характеристики этого же избирателя поврежденных фаз при КЗ В0 ( $1_{В0}$ ,  $2_{В0}$ ) и КЗ С0 ( $1_{С0}$ ,  $2_{С0}$ ). Характеристики приведены при двух значениях передаваемой по линии мощности, характеризуемых значениями сопротивлений  $Z_H$  на входе ДО. Как видно из рис. 7.34, существуют области входного сопротивления  $Z_{A0}$  при КЗ через переходное сопротивление, зависящие от значения и направления пере-

Таблица 7.1. Значения коэффициентов при различных видах КЗ

Кoeffици- ент	ABC	AB	BC	CA	A0	BO	CO	ABO	BCO	CAO
$k_{21}$	0	$e^{j\pi/3}$	-1	$e^{-j\pi/3}$	1	$e^{j2\pi/3}$	$e^{-j2\pi/3}$	$\frac{k_c}{k_c+1} e^{j\pi/3}$	$-\frac{k_c}{k_c+1}$	$\frac{k_c}{1+k_c} e^{-j\pi/3}$
$k_{01}$	0	0	0	0	1	$e^{-j2\pi/3}$	$e^{j2\pi/3}$	$\frac{k_c}{1+k_c} e^{-j\pi/3}$	$-\frac{k_c}{k_c+1}$	$\frac{1}{k_c+1} e^{j\pi/3}$

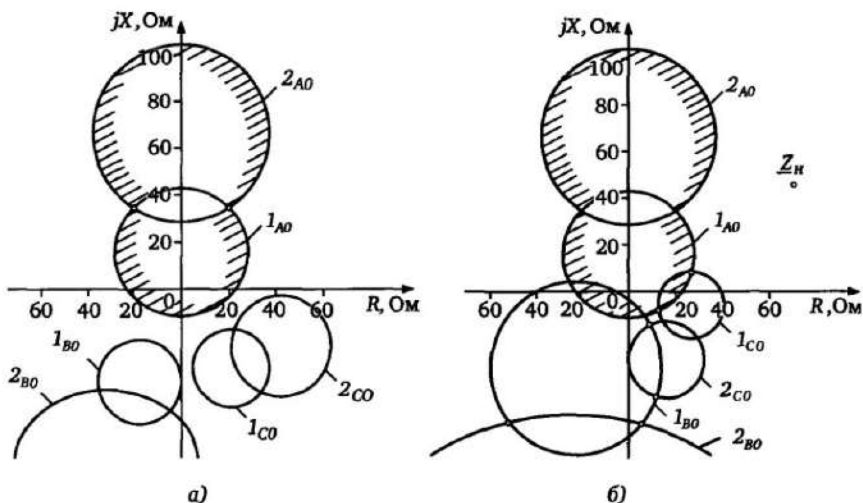


Рис. 7.34. Характеристики избирательных органов ОАПВ при основных и неосновных повреждениях в зависимости от предшествующего нагрузочного режима:  
 а —  $Z_H = 160 e^{j30^\circ}$  Ом; б —  $Z_H = 80 e^{j30^\circ}$  Ом

даваемой мощности, характеризуемой сопротивлением  $Z_H$ , при которых при КЗ А0 могут срабатывать органы выбора фаз В0 и С0. При увеличении передаваемой мощности (рис. 7.34,б) возможно пересечение характеристик основных и неосновных повреждений, что соответствует одновременному срабатыванию при КЗ А0 органов выбора двух поврежденных фаз (А0 и С0).

## 7.10. Характеристики срабатывания направленных ДО с поляризующими цепями

### 7.10.1. Общие соотношения

Построение ДО с характеристиками, проходящими через начало координат имеет особенности, связанные с обеспечением направленности при близких КЗ, сопровождающихся снижением входного напряжения до нуля (см. §2.6). Так как поляризующее напряжение  $E_{\Pi}$  в этом случае зависит от запоминаемого предшествующего напряжения  $\underline{U}_p$  или от напряжения неповрежденных фаз  $\underline{U}_d$  (см. рис. 2.33), то характеристики срабатывания

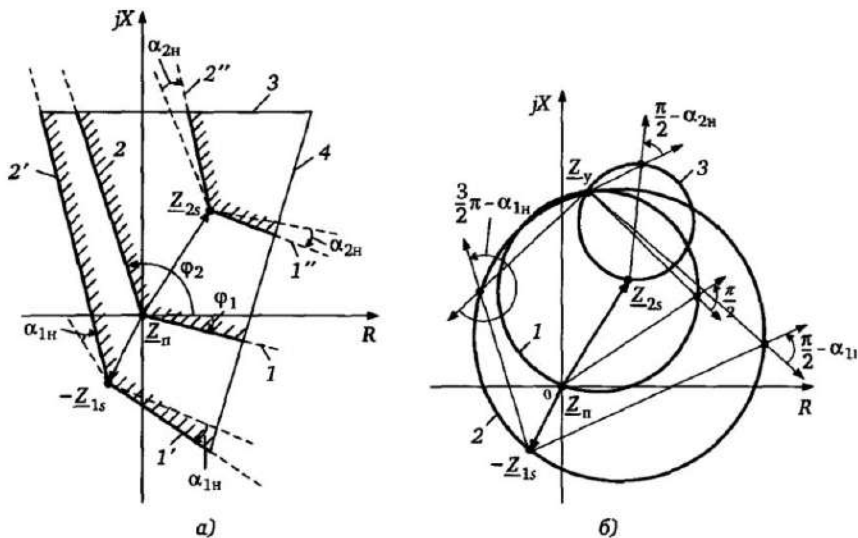


Рис. 7.35. Характеристики ДО с поляризующими цепями при внешних и внутренних КЗ

ДО не являются однозначными и зависят от предшествующего режима и параметров ЭС. Рассмотрим ДО на основе сравнения фаз (см. §2.5), в частности ДО с многоугольной ХС (рис. 7.35,а), где направленность характеристики обеспечивается двумя лучами 1, 2, выходящими из начала координат и направленный ДО с круговой ХС (рис. 7.35,б, характеристика 1).

В обоих случаях особая точка, соответствующая поляризующей величине зависящей только от напряжения, находится в начале координат ( $Z_{п} = 0$ ). Для ДО с многоугольной ХС (рис. 7.35,а) уравнение срабатывания, обеспечивающее нижнюю направленную часть характеристики (лучи 1, 2), без принятия специальных мер по обеспечению направленности при близких КЗ имеет вид

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{k_u U_p}{k_i I_p} \leq \varphi_2. \quad (7.158)$$

С учетом решений по обеспечению направленности ДО при близких КЗ (см. §2.6), неравенство (7.158) примет вид

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{\underline{E}_n}{k_i \underline{I}_p} \leq \varphi_2, \quad (7.159)$$

где величина  $\underline{E}_n$  в зависимости от выбранного варианта поляризации (варианты I ... IV) принимает значения, по-разному зависящие от напряжений  $\underline{U}_p$  и  $\underline{U}_n$  (см. рис. 2.32). Эквивалентные схемы ЭС при КЗ в положительном ( $K'$ ) и отрицательном ( $K''$ ) направлениях приведены на рис. 7.36. Если  $\underline{U}_n, \underline{I}_n, \underline{Z}_n = \underline{U}_n / \underline{I}_n$  — ток, напряжение и сопротивление на входе ДО в нагрузочном режиме и  $\underline{U}, \underline{I}, \underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$  — в режиме КЗ, то в режиме нагрузки имеем

$$\underline{Z}_n = \frac{\underline{U}_n}{\underline{I}_n} = \frac{\underline{E}_{1s} \underline{Z}_{2s} + \underline{E}_{2s} \underline{Z}_{1s}}{\underline{E}_{1s} - \underline{E}_{2s}},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_n &= \underline{E}_{1s} \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1s}} = \underline{k}_{1n} \underline{E}_{1s}; & \underline{k}_{1n} &= \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1s}}; \\ \underline{U}_n &= \underline{E}_{2s} \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n - \underline{Z}_{2s}} = \underline{k}_{2n} \underline{E}_{2s}; & \underline{k}_{2n} &= \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n - \underline{Z}_{2s}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.160)$$

При КЗ в положительном (рис. 7.36,а) и отрицательном (рис. 7.36,б) направлениях с учетом принятого положительного направления тока соответственно имеем

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_{1s}}{\underline{Z} + \underline{Z}_{1s}}; \quad \underline{I} = \frac{\underline{E}_{2s}}{\underline{Z} - \underline{Z}_{2s}} \quad (7.161)$$

Для дальнейших преобразований примем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1n} &= \arg \underline{k}_{1n} = \arg \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1s}}; \\ \alpha_{2n} &= \arg \underline{k}_{2n} = \arg \frac{\underline{Z}_n}{\underline{Z}_n - \underline{Z}_{2s}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.162)$$

### 7.10.2. Динамические характеристики отдельных вариантов ДО с поляризующими цепями (см. рис. 2.32)

**Вариант I.** Запоминание основного напряжения  $\underline{U}_p$ . В данном случае всё напряжение  $\underline{U}_p$  запоминается, т.е.  $\underline{U}_p = \underline{U}_p^H = \underline{U}_H$  и поляризующая величина  $\underline{E}_H = k_H \underline{U}_H$ , где  $k_H$  — действительный коэффициент.

Условие срабатывания ДО с учетом выражения (7.159) примет вид:

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{k_H \underline{U}_H}{k_I I} \leq \varphi_2. \quad (7.162a)$$

Рассматривая КЗ в положительном направлении (рис. 7.36,а) и подставив значения  $\underline{U}_H$ ,  $I$ ,  $\alpha_{1H}$  из (7.160) — (7.162), получим после преобразований при действительном  $k_H$

$$\varphi_1 - \alpha_{1H} \leq \arg(\underline{Z} + \underline{Z}_{1s}) \leq \varphi_2 - \alpha_{1H}. \quad (7.163)$$

Неравенство (7.163) описывает область, ограниченную двумя лучами  $1'$  и  $2'$ , исходящими из точки  $\underline{Z}_1 = -\underline{Z}_{1s}$  (рис. 7.35,а). Эти лучи получены параллельным перемещением лучей  $1$ ,  $2$  из начала координат в точку  $\underline{Z}_1 = -\underline{Z}_{1s}$  и последующим поворотом их на угол  $-\alpha_{1H}$ . Отметим, что при отсутствии тока нагрузки ( $\underline{Z}_H = \infty$ ) имеем из (7.162)  $\alpha_{1H} = 0$ , и поворота лучей не происходит. Как видно из рис. 7.35,а, результирующая характеристика ДО в данном случае (если угол  $\alpha_{1H}$  недостаточно большой) охватывает начало координат, что соответствует срабатыванию ДО при рассматриваемом КЗ в начале зоны (КЗ в положительном направлении).

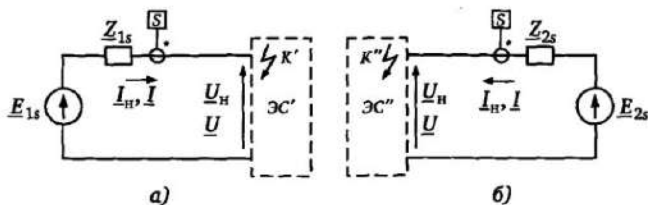


Рис. 7.36. Эквивалентные схемы ЭС при КЗ в положительном (а) и отрицательном (б) направлениях

При КЗ в отрицательном направлении (рис. 7.36,б), используя аналогично соотношения (7.161) и (7.162), получим условие срабатывания ДО

$$\Phi_1 - \alpha_{2н} \leq \underline{Z} - \underline{Z}_{2с} \leq \Phi_2 - \alpha_{2н}. \quad (7.164)$$

Данное условие описывает характеристику, ограниченную лучами 1'', 2'' (рис. 7.35,а), смещенную в I квадрант плоскости  $\underline{Z}$  на величину  $\underline{Z}_{2с}$  и не охватывающую начало координат. Это соответствует несрабатыванию ДО при КЗ в отрицательном направлении («за спиной»).

Как уже отмечалось, срабатывание при КЗ в зоне и несрабатывание при КЗ «за спиной» не является абсолютным фактором и определяется углами  $\alpha_{1н}$  и  $\alpha_{2н}$ , зависящими, в соответствии с выражением (7.162), от передаваемой мощности ( $\underline{Z}_н$ ) и параметров ЭС ( $\underline{Z}_{1с}$  или  $\underline{Z}_{2с}$ ). Ограничение области ДО сверху (линии 3, 4 на рис. 7.35,а) не зависит в данном случае от параметров поляризующей цепи и остается неизменным при КЗ в положительном и отрицательном направлениях.

Для направленного ДО с круговой ХС условие срабатывания при рассматриваемом варианте поляризации и «косинусной» схеме сравнения с учетом выражений (2.50), (2.52) примет вид

$$\frac{\pi}{2} \leq \arg \frac{\underline{E}_п}{k_1 \underline{U}_р + k_2 \underline{I}_р} \leq \frac{3\pi}{2}. \quad (7.165)$$

Как и в предыдущем случае, для варианта I имеем  $\underline{E}_п = k_п \underline{U}_н$  и при действительных коэффициентах  $k_п$  при  $\underline{Z}_у = -k_2/k_1$  из (7.165) получим:

$$\frac{\pi}{2} \leq \arg \frac{\underline{U}_н}{\underline{I}(\underline{Z} - \underline{Z}_у)} \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (7.166)$$

что соответствует окружности 1 (см. рис. 7.35,б), проходящей через точки  $\underline{Z} = 0$  и  $\underline{Z} = -\underline{Z}_у$ . Выразив  $\underline{U}_н$  через параметры ЭС с использованием соотношений (7.160) и (7.162), после преобразований получим уравнение срабатывания при КЗ в положительном направлении



$$\frac{\pi}{2} - \alpha_{1н} \leq \arg \frac{\underline{Z} + \underline{Z}_{1с}}{\underline{Z} - \underline{Z}_y} \leq \frac{3\pi}{2} - \alpha_{1н}. \quad (7.167)$$

Выражению (7.167) соответствует окружность 2 (см. рис. 7.35,б), охватывающая начало координат и проходящая через точки  $\underline{Z} = -\underline{Z}_{с1}$  и  $\underline{Z} = \underline{Z}_y$ , образованная двумя дугами с углами  $\pi/2 - \alpha_{1н}$  и  $3\pi/2 - \alpha_{1н}$ , опирающимися на указанные точки. Диаметр этой окружности не обязательно проходит через начало координат, это возможно лишь при  $\alpha_{1н} = 0$  ( $Z_n = \infty$ ).

При КЗ в отрицательном направлении аналогичными преобразованиями получим уравнение срабатывания ДО

$$\frac{\pi}{2} - \alpha_{2н} \leq \arg \frac{\underline{Z} - \underline{Z}_{2с}}{\underline{Z} - \underline{Z}_y} \leq \frac{3\pi}{2} - \alpha_{2н}, \quad (7.168)$$

что соответствует окружности 3 (см. рис. 7.35,б), смещенной в I квадрант плоскости  $\underline{Z}$  и проходящей через точки  $\underline{Z}_{2с}$  и  $\underline{Z}_y$ .

При КЗ в положительном направлении охват окружностью 2 начала координат соответствует срабатыванию ДО при КЗ на шинах. При КЗ в отрицательном направлении окружность 3 не охватывает начало координат, что соответствует несрабатыванию ДО при КЗ «за спиной». Отметим, что селективность ДО в этих случаях также может быть нарушена при определенных значениях углов  $\alpha_{1н}$ ,  $\alpha_{2н}$ , зависящих от  $\underline{Z}_н$ ,  $\underline{Z}_{1с}$ ,  $\underline{Z}_{2с}$ , когда точка  $\underline{Z} = 0$  может не охватываться ХС при КЗ в зоне действия или охватываться при КЗ «за спиной» (см. ниже).

**Вариант II. Использование дополнительных напряжений** (см. табл. 2.3) для различных видов КЗ без запоминания.

Указанный способ используется также при выполнении реле направления мощности (см. §2.4, табл. 2.1).

В качестве примера анализа рассмотрим ДО<sub>АВ</sub>, использующий в поляризирующей цепи напряжения  $\underline{U}_д = k_n e^{-j90^\circ} \underline{U}_{C0}$  или, что эквивалентно,  $\underline{U}_д = k_n (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC})$  — см. табл. 2.3. Для ДО с характеристикой, ограниченной двумя лучами (см. рис. 7.35,а), имеем условие срабатывания

$$\varphi_1 \leq \frac{k_n e^{-j90^\circ} \underline{U}_{C0}}{k_i I_{AB}} \leq \varphi_2. \quad (7.169)$$

Для анализа характеристики ДО в плоскости основного повреждения  $\underline{Z}_{AB}$  необходимо выразить параметр  $\underline{U}_{CO}/\underline{I}_{AB}$  в выражении (7.169) через  $\underline{Z}_{AB}$ , т.е. представить его в виде

$$\underline{U}_{CO}/\underline{I}_{AB} = \underline{\Delta}_1 \underline{Z}_{AB} + \underline{\Delta}_2. \quad (7.170)$$

Для этого воспользуемся общими соотношениями (7.132)—(7.134)

$$\frac{\underline{U}_C}{\underline{I}_{AB}} = \frac{a \underline{Z}_H \underline{I}_H - \underline{d}_C \underline{I}_{1AB}}{(1-a^2) \underline{I}_H + \underline{k}_{AB} \underline{I}_{1AB}} = \frac{a \underline{Z}_H - \underline{d}_C \underline{g}}{1-a^2 + \underline{k}_{AB} \underline{g}} = \underline{\Delta}_1 \underline{Z}_{AB} + \underline{\Delta}_2. \quad (7.171)$$

Значение  $\underline{Z}_{AB}$  определяется выражением (7.135), подставляя которое в (7.171) и приравнявая значения  $\underline{g}$ , получим значения  $\underline{\Delta}_1$  и  $\underline{\Delta}_2$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Delta}_1 &= \frac{a \underline{Z}_H \underline{k}_{AB} - (1-a^2) \underline{d}_C}{(1-a^2) \underline{k}_{AB} \underline{Z}_H + (1-a^2) \underline{d}_{AB}}; \\ \underline{\Delta}_2 &= \frac{a \underline{Z}_H \underline{d}_{AB} - (1-a^2) \underline{Z}_H \underline{d}_C}{(1-a^2) \underline{Z}_H \underline{k}_{AB} + (1-a^2) \underline{d}_{AB}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.172)$$

Условие срабатывания ДО (7.169) при действительных  $k_n$  и  $k_i$  примет вид

$$\varphi_1 \leq -\frac{\pi}{2} + \arg \underline{\Delta}_1 + \arg(\underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_\Delta) \leq \varphi_2, \quad (7.173)$$

где

$$\underline{Z}_\Delta = -\frac{\underline{\Delta}_1}{\underline{\Delta}_2}. \quad (7.174)$$

На основе неравенства (7.173) возможен анализ ДО<sub>AB</sub> при любых видах КЗ. В частности, при двухфазных КЗ АВ имеем с учетом соотношений (7.132) и (7.133):

$$\underline{k}_{AB} = (1-a^2) + \underline{k}_{21}(1-a);$$

$$\underline{d}_{AB} = \underline{Z}_{1s} [(1-a^2) + (1-a)\underline{k}_{21}];$$

$$\underline{d}_C = (a + a^2 k_{21}) \underline{Z}_{1s}.$$

Взяв из табл. 7.1 значение  $k_{21} = e^{j60^\circ}$  для КЗ АВ, после преобразований получим

$$\begin{aligned} \underline{\Delta}_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j90^\circ} \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{1s}}; \\ \underline{\Delta}_2 &= \underline{Z}_{1s} \underline{\Delta}_1, \end{aligned}$$

откуда условие (7.173) срабатывания ДО примет вид

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{1s}} + \arg(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{1s}) \leq \varphi_2,$$

что полностью, учитывая значение угла  $\alpha_{1H}$  из (7.162), совпадает с неравенством (7.163). Совпадение с выражением (7.164) имеется и при КЗ в отрицательном направлении. Таким образом, использование дополнительных напряжений без запоминания напряжений от неповрежденных фаз по варианту II при формировании поляризующей величины обеспечивает при междуфазных КЗ те же свойства ДО, что и при использовании основного напряжения  $U_p$  (вариант I). Указанное определяется тем, что в режиме междуфазного КЗ фаза дополнительного напряжения не изменяется.

**Вариант III** отличается от варианта II наличием блока памяти II в тракте формирования величины  $\underline{E}_{II}$ , что обеспечивает функционирование при трехфазных КЗ в месте установки защиты. При использовании для ДО<sub>AB</sub> дополнительного напряжения  $\underline{U}_d = \underline{U}_{C0}$  запоминаемое напряжение на выходе блока памяти (см. рис. 2.33)  $\underline{U}_d^H$  пропорционально сдвинутому на угол  $-90^\circ$  напряжению  $\underline{U}_{C0}$  в предаварийном режиме и, следовательно, совпадающему по фазе с основным напряжением  $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_p^H$  в предаварийном режиме. Таким образом, в данном случае  $\underline{E}_{II} = k_{II} \underline{U}_d^H = k_{II} \underline{U}_p$ . Отсюда следует, что характеристики данного варианта и варианта II одинаковы и также определяются соотношениями (7.163) и (7.164).

**Вариант IV** — комбинированное формирование, которое характеризуется тем, что поляризующая величина  $\underline{E}_{II}$  имеют две составляющие: определяемую основным напряжением  $\underline{U}_p$  с за-

поминаем доаварийного напряжения  $k_{\text{п}} \underline{U}_{\text{p}}^{\text{H}}$  и пропорциональную входному напряжению  $k_{\text{u}} \underline{U}_{\text{p}}$ . Условие срабатывания ДО с характеристикой, ограниченной двумя лучами (рис. 7.35,а) примет с учетом выражения (7.159) вид

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{k_{\text{u}} \underline{U}_{\text{p}} + k_{\text{п}} \underline{U}_{\text{p}}^{\text{H}}}{k_{\text{i}} \underline{I}_{\text{p}}} \leq \varphi_2. \quad (7.175)$$

С учетом соотношений (7.160) — (7.162) при  $\underline{U}_{\text{p}} = \underline{U}$ ,  $\underline{U}_{\text{p}}^{\text{H}} = \underline{U}_{\text{H}}$ ,  $\underline{I}_{\text{p}} = \underline{I}$  при КЗ в положительном направлении имеем

$$\varphi_1 - \alpha_{3\text{H}} \leq \arg(\underline{Z} + \underline{k}_1 \underline{Z}_{1\text{s}}) \leq \varphi_2 - \alpha_{3\text{H}} \quad (7.176)$$

и при КЗ в отрицательном направлении

$$\varphi_1 - \alpha_{4\text{H}} \leq \arg(\underline{Z} - \underline{k}_2 \underline{Z}_{2\text{s}}) \leq \varphi_2 - \alpha_{4\text{H}}. \quad (7.177)$$

В выражениях (7.176) и (7.177) принято:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{3\text{H}} &= \arg \frac{k_{\text{u}} + k_{\text{п}} \underline{k}_{1\text{H}}}{k_{\text{i}}}; & \alpha_{4\text{H}} &= \arg \frac{k_{\text{u}} + k_{\text{п}} \underline{k}_{2\text{H}}}{k_{\text{i}}}; \\ \underline{k}_1 &= \frac{k_{\text{п}} \underline{k}_{1\text{H}}}{k_{\text{u}} + k_{\text{п}} \underline{k}_{1\text{H}}}; & \underline{k}_2 &= \frac{k_{\text{п}} \underline{k}_{2\text{H}}}{k_{\text{u}} + k_{\text{п}} \underline{k}_{2\text{H}}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.178)$$

Обычно принимается небольшая доля запоминаемого напряжения  $\underline{U}_{\text{p}}^{\text{H}}$  в общем напряжении  $\underline{E}_{\text{п}}$ , достаточная для действия при близких повреждениях ( $k_{\text{п}}/k_{\text{u}} \approx 0,01 + 0,05$ ). При этом абсолютные значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  соответственно при  $\underline{Z}_{1\text{s}}$  и  $\underline{Z}_{2\text{s}}$  в выражениях (7.176) и (7.177) также малы.

Указанное означает, что характеристики ДО по варианту IV с запоминанием лишь небольшой части общего напряжения имеют такой же вид, как и при запоминании всего поляризующего напряжения (см. рис. 7.35), но смещаются на существенно меньшие значения  $-\underline{k}_1 \underline{Z}_{1\text{s}}$  и  $\underline{k}_2 \underline{Z}_{2\text{s}}$ , достаточные, однако, для правильного действия при близких КЗ.

**Вариант V** отличается от варианта IV использованием для составляющей, обеспечивающей действие при близких КЗ, дополнительного напряжения  $\underline{U}_{\text{д}}$ . Как показано выше, свойства вари-

антов *I* и *III* использующих  $k_{п}U_{р}$  и  $k_{п}U_{д}$  одинаковы. С учетом этого одинаковы и свойства вариантов *IV* и *V*, имеющих такие же отличия.

**Варианты  $IV_{м}$  и  $V_{м}$**  характеризуются, в отличие от вариантов *IV* и *V*, тем, что запоминаемое предаварийное напряжение используется только лишь при снижении входного напряжения ниже порогового значения  $U_{пор} \approx 0,01 + 0,05U_{ном}$ . Поэтому динамические свойства этих вариантов при напряжении  $U < U_{пор}$  такие же, как и у вариантов *I* и *III*. При  $U > U_{пор}$  отклонений характеристики не имеется. При построении характеристик этих вариантов должны использоваться рассмотренные выше элементы анализа вариантов *I—III* с питанием поляризирующей цепи от основного  $U_{р}$  или дополнительного  $U_{д}$  напряжений.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что разброс динамических характеристик при комбинированном формировании поляризирующей величины (варианты *IV*, *V*,  $IV_{м}$ ,  $V_{м}$ ), когда запоминаемое напряжение представляет небольшую часть номинального предаварийного напряжения, существенно меньше, что делает использование этих вариантов предпочтительным.

### 7.10.3. Выявление предельных нагрузочных режимов ЭС для ДО с поляризирующими цепями

Как показано выше (см. рис. 7.35), характеристики ДО с поляризирующими цепями не только смещаются на величины  $Z_{1s}$  и  $Z_{2s}$  при КЗ в положительном и отрицательном направлении соответственно, но и одновременно поворачиваются на углы  $\alpha_{1н}$  и  $\alpha_{2н}$ , которые зависят от режима передачи мощности по линии, характеризуемого сопротивлением  $Z_{н}$  на входе ДО в нагрузочном режиме. При этом возможны такие режимы нагрузки, при которых указанный поворот характеристик может привести как к отказу в срабатывании при КЗ в зоне действия, так и к излишнему срабатыванию при КЗ «за спиной». Указанное поясняет рис. 7.37, где 1, 2 — лучи, образующие характеристику ДО без введения поляризирующей величины; 1', 2' (пунктир) — лучи образующие характеристику при отсутствии нагрузки в предаварийном режиме ( $\alpha_{1н} = 0$ ,  $\alpha_{2н} = 0$ ); 1'', 2'' — лучи, образующие характеристику в экстремальном аварийном режиме.

В частности, при КЗ в положительном направлении (рис. 7.37,а) угол поворота  $\alpha_{1н}$  смещенной на величину  $-Z_{1s}$  характеристики, зависящий в соответствии с выражением (7.162) от ве-

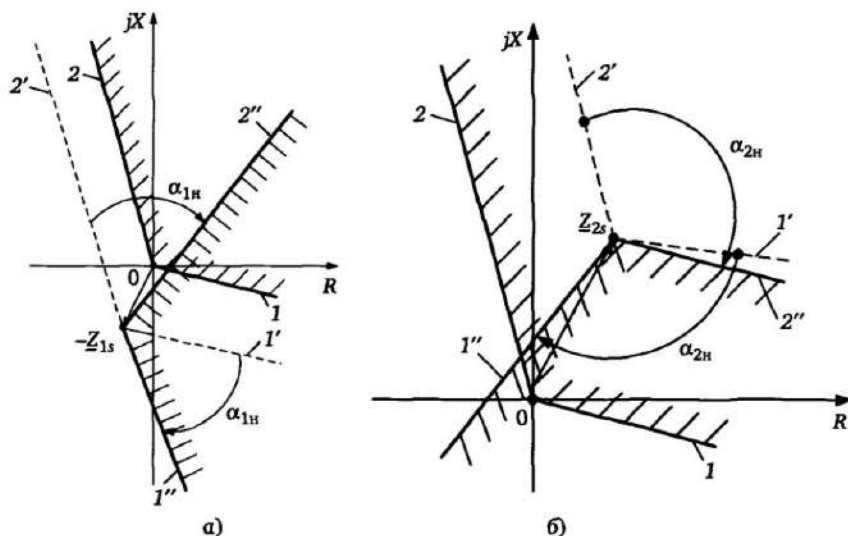


Рис. 7.37. Возможность неправильного действия ДО с поляризуемыми величинами при КЗ в положительном (а) и отрицательном (б) направлениях

личины  $\underline{Z}_H$ , имеет в данном случае такое значение, что динамическая характеристика (лучи  $1''$ ,  $2''$ ) не охватывает область вблизи начала координат, что соответствует отказу в срабатывании при КЗ в начале зоны действия. Рисунок 7.37,б поясняет возможность срабатывания при КЗ «за спиной», когда угол поворота  $\alpha_{2H}$  смещенной на  $\underline{Z}_{2s}$  характеристики (лучи  $1''$ ,  $2''$ ) приводит к охвату области вблизи начала координат при КЗ в отрицательном направлении. Возникает задача выявления областей недопустимых режимов ЭС, характеризующихся расположением вектора нагрузки  $\underline{Z}_H$ , нахождение в которых приводит к неправильным действием ДО при внутренних (рис. 7.37,а) и внешних (рис. 7.37,б) КЗ в месте установки направленных ДО с поляризуемыми цепями.

Анализируя КЗ в начале зоны действия, примем в неравенстве (7.163), описывающем область действия ДО,  $\underline{Z} = 0$ , откуда имеем

$$\varphi_1 - \alpha_{1H} \leq \arg \underline{Z}_{1s} \leq \varphi_2 - \alpha_{1H}.$$

В результате с учетом выражения (7.162) для  $\alpha_{1H}$  получим условие срабатывания ДО при КЗ в начале зоны действия в за-

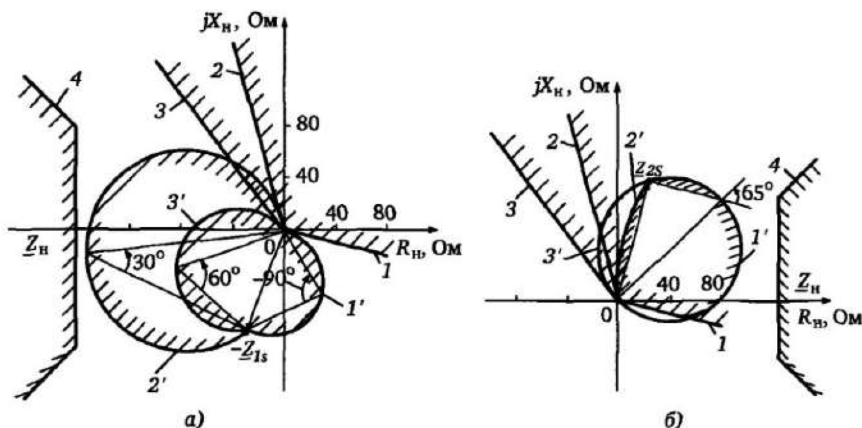


Рис. 7.38. Области недопустимых режимов нагрузки  $Z_N$  для ДО с поляризующими величинами при КЗ в месте установки защиты ( $Z = 0$ ):  
 а — КЗ в зоне действия; б — КЗ “за спиной”

висимости от расположения вектора  $Z_N$

$$\varphi_1 - \arg Z_{1s} \leq \frac{Z_N}{Z_N + Z_{1s}} \leq \varphi_2 - \arg Z_{1s}. \quad (7.179)$$

С учетом приложения 1, область нахождения параметра  $Z_N$ , соответствующая срабатыванию ДО, ограничивается в общем случае двумя дугами окружностей с вписанными углами  $\varphi_1 - \arg Z_{1s}$  и  $\varphi_2 - \arg Z_{1s}$ , опирающимися на точки  $Z_N = 0$  и  $Z_N = -Z_{1s}$  (рис. 7.38,а).

При этом область срабатывания лежит вне области, ограниченной указанными дугами, так как условие  $Z_N = \infty$  соответствует срабатыванию ДО. Внутренняя область  $Z_N$  (заштрихована) определяет искомую область опасных режимов  $Z_N$ , при которых происходит отказ ДО при КЗ в месте установки.

На рис. 7.38 показаны области недопустимых режимов  $Z_N$  для двух вариантов характеристик направленного ДО — узкой — лучи 1, 2 ( $\varphi_1 = -15^\circ$ ,  $\varphi_2 = 105^\circ$ ) и широкой — лучи 1, 3 ( $\varphi_1 = -15^\circ$ ,  $\varphi_2 = 135^\circ$ ). Результирующие сопротивления относительно места КЗ:  $Z_{1s} = 80e^{-j75^\circ}$ ;  $Z_{2s} = 100e^{-j80^\circ}$ .

При КЗ в зоне действия лучу 1 (рис. 7.38,а) соответствует дуга 1', опирающаяся на точки  $Z_N = 0$ ,  $Z_N = -Z_{1s}$  с вписанным углом  $\varphi_1 - \arg Z_{1s} = -15^\circ - 75^\circ = -90^\circ$ , а лучу 2 — дуга 2' с вписан-

ным углом  $\varphi_2 - \arg Z_{1s} = 105^\circ - 75^\circ = 30^\circ$ . Заштрихованная область внутри дуг  $1'$  и  $2'$  соответствует области нагрузочных режимов  $Z_{н}$ , при которых ДО не срабатывает при КЗ в начале защищаемой зоны. При более широкой характеристике ДО (лучи 1, 3) лучу 3 соответствует дуга  $3'$  с вписанным углом  $\varphi_1 - \arg Z_{1s} = 135^\circ - 75^\circ = 60^\circ$ , и область  $Z_{н}$ , при которых ДО не срабатывает при КЗ в начале зоны, уменьшается. Указанное объясняется тем, что при более широкой характеристике ДО условия для срабатывания облегчаются. С учетом изложенного, характеристики ДО должны быть выбраны таким образом, чтобы в максимальном режиме нагрузки область 4 нахождения  $Z_{н}$  (рис. 7.38,а) не заходила в полученную область недопустимых режимов.

Аналогичным образом выявляются области недопустимых режимов ЭС, при которых ДО срабатывает при внешних КЗ в месте установки защиты. Для выявления указанных областей преобразуем условия срабатывания ДО при КЗ в отрицательном направлении (7.164) при условии  $Z = 0$  и с учетом значения  $\alpha_{2н}$  из выражения (7.162) к виду

$$\varphi_1 + \arg Z_{2s} \leq \frac{Z_{н}}{Z_{н} - Z_{2s}} \leq \varphi_2 + \arg Z_{2s}. \quad (7.180)$$

В данном случае область недопустимых режимов также ограничивается дугами окружностей, опирающихся на точки  $Z = 0$ ;  $Z_{н} = Z_{2s}$  (рис. 7.38,б).

При приведенных выше данных ДО и ЭС лучу 1 соответствует дуга  $1'$  с вписанным углом  $\varphi_1 + \arg Z_{2s} = -15^\circ + 80^\circ = 65^\circ$ , а лучу 2 — дуга  $2'$  с вписанным углом  $105^\circ + 80^\circ = 185^\circ$ . Заштрихованная область, ограниченная дугами  $1'$  и  $2'$ , определяет недопустимые значения вектора нагрузки  $Z_{н}$ , при которых ДО срабатывает при КЗ «за спиной». Для более широкой характеристики ДО, ограниченной справа лучом 3, имеем расширенную область недопустимых режимов, ограниченную дугой  $3'$  с вписанным углом  $\varphi_2 + \arg Z_{2s} = +135^\circ + 80^\circ = 215^\circ$ . В данном случае расширение характеристики способствует излишнему срабатыванию при КЗ «за спиной», ввиду чего область недопустимых режимов расширяется.

Подобный анализ может быть проведен и для ДО с круговыми характеристиками на основе соотношений (7.167), (7.168) и других вариантов поляризующих величин (см. рис. 2.33).



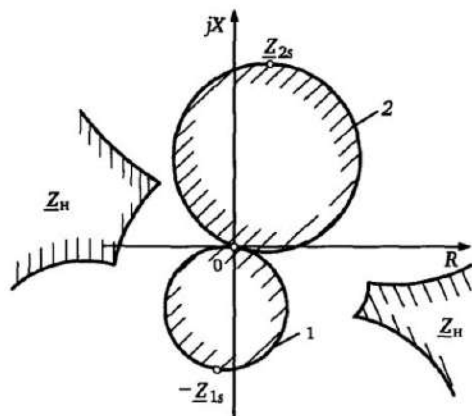


Рис. 7.39. Области недопустимых режимов нагрузки  $Z_H$  [5] для направленного ДО с круговой характеристикой при КЗ в начале зоны действия (1) и при КЗ за «спиной» (2)

При этом для ДО с круговой характеристикой на основе алгоритма (7.165) (см. рис. 7.35,б, характеристика 1) области недопустимых режимов в плоскости  $Z_H$  ограничиваются окружностями 1, 2 (рис. 7.39) соответственно при КЗ в положительном и отрицательном направлениях [5].

Указанные области описываются выражениями:

$$\frac{\pi}{2} + \arg \frac{Z_{1s}}{Z_y} \leq \arg \frac{Z_H}{Z_H + Z_{1s}} \leq 3\frac{\pi}{2} + \arg \frac{Z_{1s}}{Z_y}$$

при рассмотрении КЗ в начале зоны действия и

$$\frac{\pi}{2} - \arg \frac{Z_{2s}}{Z_y} \leq \arg \frac{Z_H}{Z_H - Z_{2s}} \leq 3\frac{\pi}{2} - \arg \frac{Z_{2s}}{Z_y}$$

при рассмотрении КЗ «за спиной».

Следует отметить, что комбинированное выполнение поляризующей величины, например, типа  $E_{пн} = k_u U_p + k_n U_d$  (варианты IV, V и рис. 2.33) не влияет на расположение областей опасных режимов  $Z_H$ .

Указанное обусловлено тем, что данные области получены при условии снижения основного напряжения до нуля ( $Z = 0$ ). Поэтому на поведение ДО влияет в данном случае только запо-

ненное предаварийное напряжение  $k_{\text{п}} \underline{U}_{\text{н}}$ , что и соответствует исходным уравнениям срабатывания (7.162,а), (7.166), учитывая в поляризирующей величине наличие только предаварийного напряжения  $\underline{U}_{\text{н}}$ .

## 7.11. Выбор поврежденных фаз в дистанционных защитах

### 7.11.1. Область использования

Правильный выбор поврежденных фаз является одним из условий обеспечения релейной защитой ее функций. Дистанционная защита, действующая как при междуфазных КЗ, так и при замыканиях на землю, в классическом исполнении контролирует с учетом выражений (7.14) — (7.20) шесть входных комплексных величин:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{U}_{AB}/(\underline{I}_A - \underline{I}_B); \quad \underline{Z}_{BC} = \underline{U}_{BC}/(\underline{I}_B - \underline{I}_C); \quad \underline{Z}_{CA} = \underline{U}_{CA}/(\underline{I}_C - \underline{I}_A);$$

$$\underline{Z}_{A0} = \underline{U}_{A0}/(\underline{I}_A + 3k_0 \underline{I}_0); \quad \underline{Z}_{B0} = \underline{U}_{B0}/(\underline{I}_B + 3k_0 \underline{I}_0);$$

$$\underline{Z}_{C0} = \underline{U}_{C0}/(\underline{I}_C + 3k_0 \underline{I}_0).$$

Многоступенчатые дистанционные защиты содержат резервные ступени, зоны действия которых могут охватывать значительные области комплексной плоскости сопротивлений (см. §7.6). Необходимость учета электрической дуги и переходного сопротивления в месте КЗ приводит к расширению требуемых областей действия, особенно ступеней, действующих при однофазных КЗ (см. §7.3).

В результате вполне вероятны случаи однофазных и двухфазных повреждений, когда вследствие изменения токов и напряжений одновременно несколько контролируемых комплексных сопротивлений оказываются в областях срабатывания отдельных ступеней защиты, например рис. 7.34,б. Прежде всего, указанное возможно при КЗ на протяженных нагруженных ВЛ (см. §7.9).

Учитывая, что ступени защиты от междуфазных и однофазных КЗ имеют в общем случае различные выдержки времени и различные зоны действия, неправильный выбор измеряемой

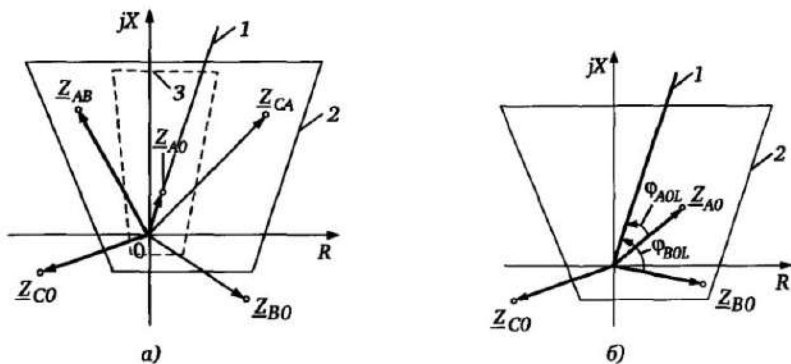


Рис. 7.40. Примеры измерения различных петель при однофазном КЗ  $A0$ :  
 а — металлическое КЗ; б — КЗ через переходное сопротивление

петли повреждения может привести как к потере селективности, так и к отказу при КЗ в зоне действия. В качестве примера на рис. 7.40,а приведены замеры контролируемых петель при однофазном КЗ  $A0$  (1 — характеристика защищаемой линии, 2 — характеристика одной из ступеней защиты).

Как видно из рис. 7.40, в данном случае более чем одна из петель замера находится в области действия ступени, и правильный выбор вида КЗ и селективное (с учетом вида КЗ) отключение невозможны.

### 7.11.2. Критерии выбора поврежденной фазы на основе $Z$ -измерений

**Отклонение входного сопротивления от характеристики линии.** При металлических КЗ входное сопротивление  $Z$  соответствующей петли фаза—фаза или фаза—земля лежит на характеристике линии. Поэтому с большой вероятностью и при КЗ через переходное сопротивление вектор  $Z$ , находящийся ближе к характеристике линии, соответствует действительной петле повреждения. С учетом этого для избирателей поврежденных фаз применяют достаточно узкие комбинированные (см. рис. 7.34) или многоугольные (рис. 7.40,а, характеристика 3) характеристики.

**Отклонение углов входного сопротивления от угла линии.** Применение достаточно узких характеристик не всегда обеспечивает чувствительность избирателей поврежденных фаз к однофазным замыканиям через переходное сопротивление.

Приходится расширять характеристику срабатывания, в результате чего в область срабатывания (рис. 7.40,б, характеристика 2) могут попадать входные сопротивления петель фаза—земля неповрежденных фаз. В этом случае дополнительным критерием для выбора поврежденной фазы может являться сравнение углов измеряемых сопротивлений, в частности углов  $\varphi_{A0L}$ ,  $\varphi_{B0L}$  относительно характеристики линии 1. Существенно большее значение угла  $\varphi_{B0L}$  по сравнению с  $\varphi_{A0L}$  в данном случае свидетельствует о том, что замер  $Z_{B0}$  является «кажущимся» сопротивлением, не соответствующим петле однофазного КЗ, и должен быть исключен из рассмотрения.

**Сравнение виртуальных сопротивлений.** В [9] используется метод сравнения модулей виртуальных сопротивлений  $Z'_{A0} = U_{A0}/I_A$ ;  $Z'_{B0} = U_{B0}/I_B$ ;  $Z'_{C0} = U_{C0}/I_C$ , не содержащих составляющих токов нулевой последовательности, при выборе поврежденных фаз.

Поврежденной фазе соответствует виртуальное сопротивление, имеющее минимальное значение модуля, в частности  $Z'_1$  на рис. 7.41 с модулем  $A_1 = |Z'_1|$ .

При этом исключаются из рассмотрения другие замеры  $Z'_2$ ,  $Z'_3$ , если модули соответствующих сопротивлений больше в  $k$  раз значения  $A_1$ , т.е. если они лежат вне окружности с радиусом  $A_2 = kA_1$ , где  $k$  — заданный коэффициент (в [9] принято  $k = 1,5$ ). В случае невыполнения этого условия, т.е. при нахождении замеров  $Z'$  других фаз между окружностями на рис. 7.41, необходимо использование дополнительных критериев для выбора поврежденной фазы.

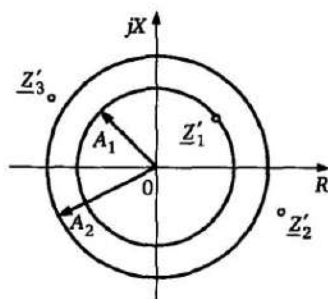


Рис. 7.41. Исключение замеров сравнением модулей виртуальных сопротивлений

Следует отметить, что с учетом возможного диапазона длин защищаемых линий, значений передаваемой мощности, значений переходного сопротивления в месте повреждения фиксация вида повреждений фаз только по факту нахождения замеров комплексных сопротивлений  $Z$  в заданной области затруднительна ввиду неоднозначности замеров  $Z$  при различных видах КЗ (см. §7.9). Поэтому наряду с измере-

нием  $Z$  целесообразно использование других критериев, дающих дополнительную информацию. Во многих случаях только совокупность нескольких критериев дает эффективное решение.

### 7.11.3. Выбор поврежденных фаз при замыканиях на землю с использованием угловых соотношений между симметричными составляющими токов $I_2$ и $I_0$ [9]

Соотношения между  $I_2$  и  $I_0$  при однофазных КЗ. В ЭС с двусторонним питанием (см. рис. 7.18,а) при эквивалентных сопротивлениях ЭС, определяемых выражением (7.68), симметричные составляющие  $I_{кA1}$ ,  $I_{кA2}$ ,  $I_{кA0}$  токов фазы А в точке К при металлическом однофазном КЗ А0 на линии имеют значения

$$I_{кA1} = I_{кA2} = I_{кA0} = \frac{E_{\Sigma}}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}}. \quad (7.181)$$

При этом здесь и в дальнейшем принято равенство сопротивлений прямой и обратной последовательности элементов ЭС;  $E_{\Sigma} = (E_1 Z_q + E_2 Z_{1\Sigma K}) / (Z_{1\Sigma K} + Z_q)$  — эквивалентная ЭДС относительно места КЗ К.

На рис. 7.42 приведены векторы симметричных составляющих отдельных фаз в месте КЗ при различных видах однофазного КЗ.

Как видно из рис. 7.42, угол  $\Delta\varphi_K$  между  $I_{A2}$  и  $I_{A0}$  равен 0 при КЗ А0 и соответственно  $240^\circ$  и  $120^\circ$  при КЗ В0 и С0, т.е. углы  $\Delta\varphi_K$  существенно различаются в зависимости от вида КЗ.

Угол  $\Delta\varphi_{A0}$  между составляющими токов обратной ( $I_{A2}$ ) и нулевой последовательностей в месте установки защиты при КЗ А0 в общем случае определяется по формуле:

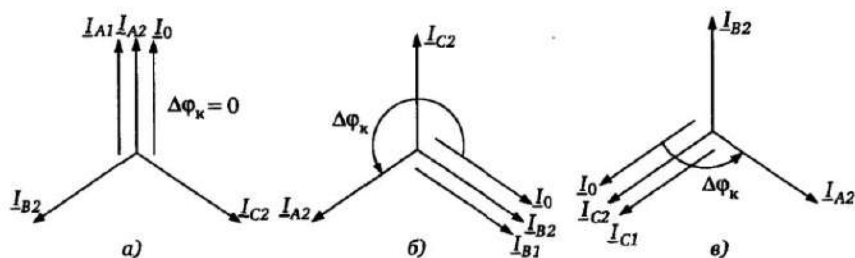


Рис. 7.42. Соотношение между симметричными составляющими токов отдельных фаз в месте однофазного КЗ:

а — КЗ А0; б — КЗ В0; в — КЗ С0

$$\Delta\varphi_{A0} = \arg \frac{Z_{2q}(Z_{0\Sigma k} + Z_{0q})}{Z_{0q}(Z_{2\Sigma k} + Z_{2q})}. \quad (7.182)$$

Обычно реактивные составляющие сопротивлений отдельных последовательностей, входящих в (7.182) значительно больше активных, и угол  $\Delta\varphi_{A0}$  в большинстве случаев не выходит за пределы  $\pm 60^\circ$ . Соответственно углы  $\Delta\varphi_{B0}$  и  $\Delta\varphi_{C0}$  между составляющими  $I_{A2}$  и  $I_{A0}$  в месте установки защиты при КЗ В0 и С0 находятся в пределах  $240^\circ \pm 60^\circ$  и  $120^\circ \pm 60^\circ$ . Сопротивление  $R_\Pi$  в месте КЗ не влияет на указанные углы, так как при любом  $R_\Pi$  имеем в месте КЗ  $I_{kA2} = I_{kA0}$ .

Симметричные составляющие  $I_{A2}$  и  $I_0$  в месте КЗ при двухфазном КЗ на землю ВС0 определяются по формуле:

$$I_{kA2} = -I_{kA1} \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}; \quad I_{kA0} = -I_{kA1} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}, \quad (7.183)$$

т.е. угол  $\Delta\varphi_k = \arg Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}$ .

На рис. 7.43 эти соотношения приведены для всех видов двухфазных КЗ на землю ВС0, АС0, АВ0 при примерном равенстве углов  $Z_{0\Sigma}$  и  $Z_{2\Sigma}$ .

Как видно из рис. 7.43, углы  $\Delta\varphi_k$  соответственно равны 0, 240,  $120^\circ$ . Угол сдвига между токами  $I_{A2}$  и  $I_{A0}$  в месте установки защиты в общем случае при наличии сопротивления  $R_\Pi$  в месте КЗ ВС0 (см. рис. 7.18, в) и с учетом обозначений (7.68) равен

$$\Delta\varphi_{BC0} = \arg \frac{(Z_{0\Sigma} + R_\Pi)Z_{q2}(Z_{0\Sigma k} + Z_{q0})}{Z_{2\Sigma}Z_{q0}(Z_{2\Sigma k} + Z_{q2})}. \quad (7.184)$$

Как показывает анализ, учитывая преобладание реактивных частей комплексных сопротивлений над активными, значение угла  $\Delta\varphi_{BC0}$  в большинстве случаев не выходит за пределы  $\pm 60^\circ$ . Соответственно при КЗ АС0 и ВС0 углы  $\Delta\varphi_{AC0}$  и  $\Delta\varphi_{BC0}$  находятся в пределах  $240^\circ \pm 60^\circ$  и  $120^\circ \pm 60^\circ$ .

С учетом изложенного, вводя коэффициент  $\underline{m} = I_{2A}/I_0$ , можно разбить комплексную плоскость  $\underline{m} = \text{Re}(\underline{m}) + j\text{Im}(\underline{m})$  на три сектора, характеризующие расположения углов  $\Delta\varphi_{A0}$ ,  $\Delta\varphi_{B0}$ ,  $\Delta\varphi_{C0}$  или  $\Delta\varphi_{BC0}$ ,  $\Delta\varphi_{AC0}$ ,  $\Delta\varphi_{AB0}$  (рис. 7.44).

При этом каждый сектор соответствует определенным видам КЗ А0 или ВС0, В0 или АС0, С0 или АВ0 с учетом возможных от-

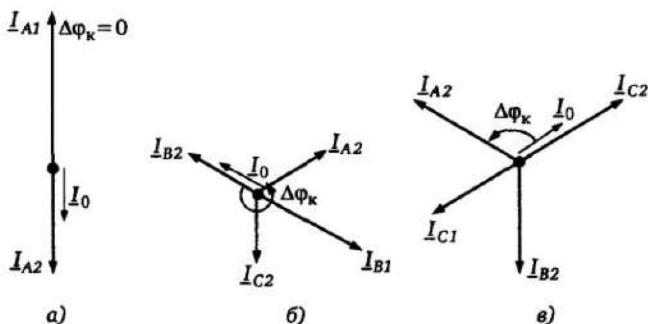


Рис. 7.43. Симметричные составляющие токов в месте двухфазного КЗ на землю при  $R_n = 0$  и  $\arg Z_{2\Sigma} = \arg Z_{0\Sigma}$ :  
 а — КЗ BC0; б — КЗ AC0; в — КЗ AB0

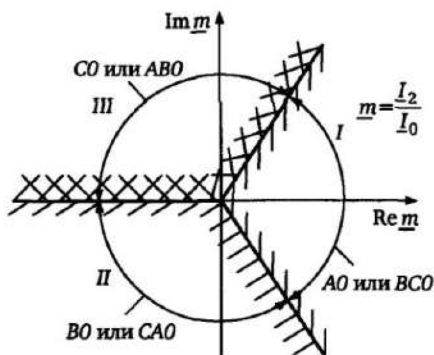


Рис. 7.44. Селекция вида КЗ по углу между составляющими  $I_2$ ,  $I_0$

клонений углов  $\Delta\varphi$ . Для дальнейшего уточнения вида КЗ необходимы дополнительные критерии.

**Использование аварийных составляющих токов КЗ.** Дополнительным критерием для выбора одного из двух возможных вариантов (однофазное КЗ или двухфазное КЗ на землю), полученных измерением угла между  $I_{A2}$  и  $I_0$ , может быть контроль токов других фаз. Например, при КЗ А0 токи фаз В и С в большинстве случаев меньше тока фазы А. Однако, данный критерий применим только при малых токах нагрузки и наиболее эффективен при использовании аварийных составляющих, соответствующих токам КЗ при отсутствии тока нагрузки ( $I_n = 0$ ). Возможности цифровой техники позволяют исключить влияние

токов нагрузки и использовать дополнительное сравнение аварийных составляющих фазных токов [9] для четкой фиксации в рассматриваемом случае поврежденной фазы. В соответствии с рис. 7.21 составляющие аварийного режима (см. рис. 7.21,в) могут быть получены вычитанием из тока  $I_K$  установившегося режима КЗ (рис. 7.21,а) значений  $I_H$  в предаварийном (нагрузочном) режиме (см. рис. 7.21,б).

Перейти от полных составляющих фазных токов  $I_K$  к аварийным составляющим  $I_{ав}$  достаточно просто, используя соотношение  $I_{ав} = I_K - I_H$ , где  $I_H$  — ток нагрузки, измеряемый до возникновения КЗ в момент  $t_1$ ,  $I_K$  — изменившийся вследствие КЗ ток, измеряемый в момент времени  $t_2$  (полный ток КЗ).

Реальные мгновенные значения векторов характеризуются проекциями вращающихся векторов на мнимую ось (см. рис. 2.6). Поэтому при вычислении аварийной составляющей необходимо откорректировать вектор  $I_H$ , измеряемый в момент  $t_1$ , приведя его к моменту  $t_2$  измерения вектора  $I_K$ , чтобы иметь общий момент отсчета. Вектор тока  $I_H$  повернется к моменту  $t_2$  на угол  $\Delta\varphi = \omega_0(t_2 - t_1)$ . Откорректированное значение вектора тока нагрузки  $I'_H$  с учетом этого равно  $I'_H = I_H e^{j\Delta\varphi}$ . С учетом этого аварийная составляющая фазного тока вычисляется на основе соотношения

$$I_{ав} = I_K - I_H e^{j\Delta\varphi}. \quad (7.185)$$

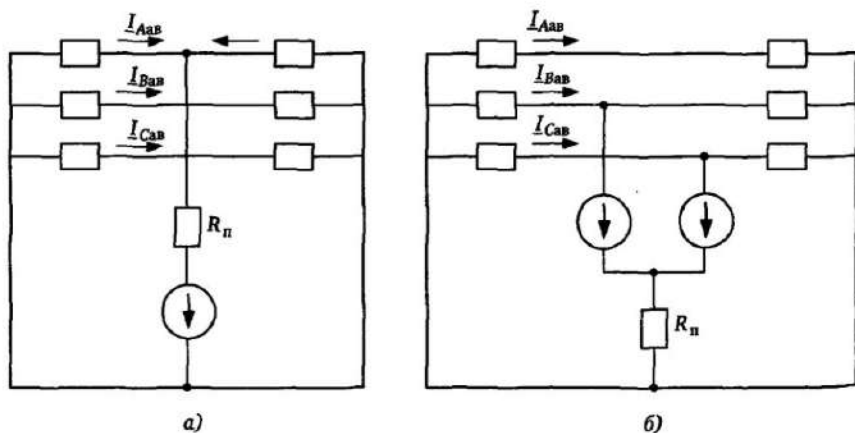


Рис. 7.45. Трехфазные схемы для аварийных составляющих:  
а — КЗ А0; б — КЗ ВС0



Таким образом, выполнение вычислений в соответствии с выражением (7.185) приводит к нахождению значений  $I_{ав}$ , соответствующих схемам замещения для аварийных составляющих на рис. 7.45.

Так как нагрузочный режим не содержит составляющих обратной и нулевой последовательностей, рассмотренные выше соотношения для определения  $I_{2A}$  и  $I_0$  полностью справедливы для схем замещения на рис. 7.45.

Однако полные аварийные составляющие токов отдельных фаз существенно изменяются в аварийном режиме ввиду исключения токов нагрузочного режима. При этом возникают следующие качественно новые признаки [9], позволяющие различить однофазные и двухфазные КЗ на землю, отобранные на основе угловых соотношений между векторами  $I_2$  и  $I_0$ .

*При однофазном КЗ*, например А0, аварийные составляющие токов неповрежденных фаз  $I_{Bав}$  и  $I_{Cав}$  одинаковы, т.е. равны по модулю и фазе (в частном случае равны нулю). Указанное обусловлено тем, что данные токи протекают по двум параллельным элементам схемы на рис. 7.45,а.

*При двухфазном КЗ на землю* (рис. 7.45,б) по поврежденным фазам протекают аварийные составляющие токов  $I_{Bав}$ ,  $I_{Cав}$  со значительным углом расхождения, который может находиться в пределах от  $120^\circ$  до  $180^\circ$  в зависимости от соотношений между сопротивлениями отдельных последовательностей и переходным сопротивлением  $R_{п}$ .

С учетом изложенного, выбор поврежденной фазы при КЗ на землю может быть осуществлен путем измерения угла между векторами  $I_{2A}$  и  $I_0$  в определенных областях, характеризующихся соотношениями:

$$-60^\circ \leq \varphi_{A20} < 60^\circ \text{ — при КЗ А0 или ВС0;}$$

$$60^\circ < \varphi_{A20} < 180^\circ \text{ — при КЗ С0 или АВ0;}$$

$$180^\circ < \varphi_{A20} < 300^\circ \text{ — при КЗ В0 или СА0.}$$

При однофазном КЗ должен выполняться хотя бы один из следующих дополнительных критериев:

а) аварийные составляющие токов в неповрежденных фазах не должны превышать определенное значение тока КЗ, т.е.  $I_{ав} \leq k_0 3I_0$ ;

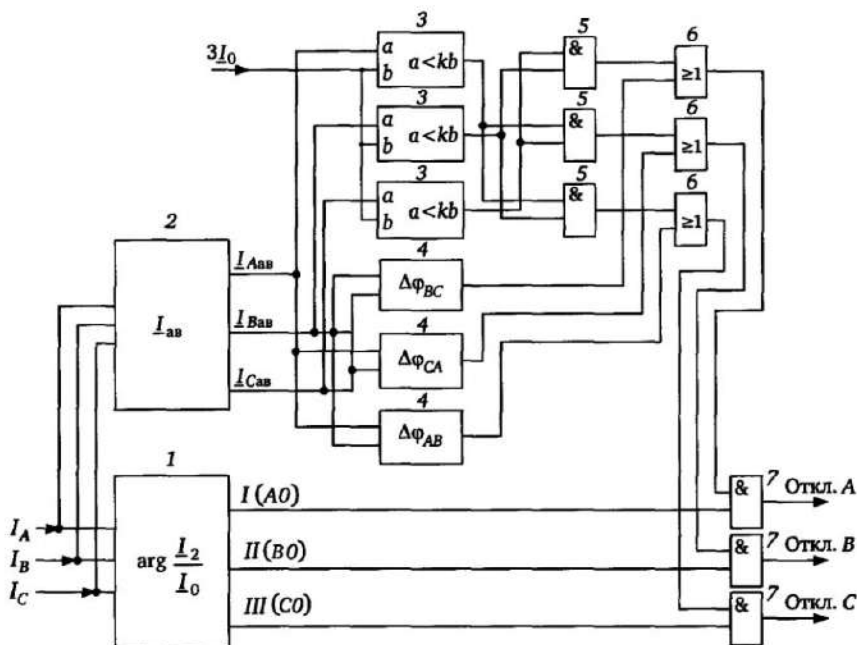


Рис. 7.46. Структура алгоритма выбора поврежденной фазы по критерию угла между токами  $I_2$  и  $I_0$

б) угол между аварийными составляющими токов неповрежденных фаз не должен превышать определенного значения  $\Delta\varphi_1$ .

Невыполнение данных дополнительных условий определяет двухфазное КЗ на землю.

На рис. 7.46 приведена упрощенная структура алгоритма выбора поврежденной фазы с контролем угла между токами  $I_{2A}$  и  $I_0$  [9].

Блок 1 анализирует угловые соотношения между токами  $I_2$  и  $I_0$  и выдает один из трех сигналов о возможном виде повреждения (см. рис. 7.44). Блок 2 формирует векторы аварийных составляющих токов в каждой фазе на основе соотношений (7.185). Блоки 3 и 5 контролируют выполнение условия протекания минимальных значений токов в обеих неповрежденных фазах при однофазных КЗ. Блоки 4 контролируют нахождение в заданном диапазоне угла  $\Delta\varphi$  между аварийными составляющими токов в неповрежденных фазах. Блоки 6 (схемы ИЛИ) оп-

ределяют выполнение хотя бы одного из двух дополнительных критериев. Блоки 7 формируют сигнал выбора поврежденной фазы.

#### 7.11.4. Совместное использование различных критериев фиксации поврежденных фаз

На ненагруженных ВЛ и линиях небольшой протяженности для выявления однофазного КЗ на землю достаточно выполнения критерия повышения фазного тока и снижения фазного напряжения при одновременном контроле значений фазных токов и напряжений других предположительно неповрежденных фаз. В частности, КЗ А0 может быть фиксировано при следующих условиях:

$$I_{A0} > k_{i1} I_{\text{ном}} \text{ при } I_{B0} < k_{i2} I_{\text{ном}}, I_{C0} < k_{i2} I_{\text{ном}};$$

$$U_{A0} < k_{u1} U_{\text{ном}} \text{ при } U_{B0} > k_{u2} U_{\text{ном}}, U_{C0} > k_{u2} U_{\text{ном}}.$$

Аналогичные условия применяются и для выбора других поврежденных фаз.

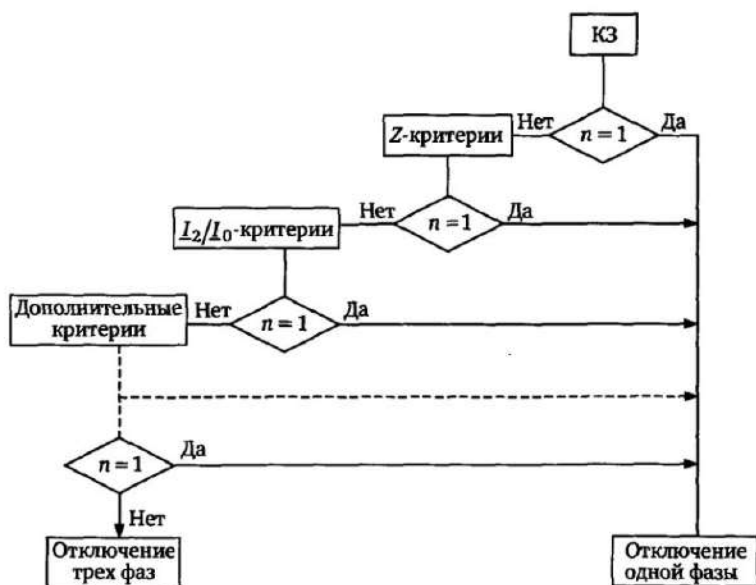


Рис. 7.47. Совместное использование различных критериев выбора поврежденных фаз методом исключения

В зависимости от режима ЭС и параметров ВЛ критерии выбора поврежденной фазы по току и напряжению могут объединяться по схеме И или ИЛИ.

Сложность выбора поврежденных фаз с учетом возможных режимов ЭС, длин защищаемых линий и переходных сопротивлений в месте КЗ обуславливает необходимость одновременного применения различных критериев. Последовательность применения поясняется на рис. 7.47 где  $n$  — число оставшихся к рассмотрению поврежденных фаз [9].

При использовании каждого из критериев исключаются из рассмотрения определенные фазы (петли замера, виды повреждения), т.е. число  $n$  оставшихся к рассмотрению фаз последовательно уменьшается. На любом из этапов при достижении условия  $n = 1$  фиксируется однофазное повреждение и вырабатывается сигнал разрешения отключения выбранной фазы. Если после использования всех критериев сохранится условие  $n > 1$ , то разрешается трехфазное отключение.

## **7.12. Обеспечение правильного функционирования дистанционных защит в условиях качаний и асинхронного хода в ЭС**

### **7.12.1. Основные принципы выполнения устройств блокирования дистанционных защит при качаниях (УБК)**

Режимы качаний и асинхронного хода в ЭС характеризуются возможностью нахождения входного сопротивления ДЗ в областях комплексной плоскости сопротивлений, расположенных внутри характеристик срабатывания ДО (см. §7.5) Указанное без принятия специальных мер приводит к неправильным действиям ДЗ и нарушениям электроснабжения при отсутствии повреждений в ЭС. Для исключения неправильных действий ДЗ в указанных случаях необходимы дополнительные устройства или схемные решения, позволяющие различить режимы качаний (асинхронного хода) и различные виды КЗ, даже в случаях, когда сопротивления на входах ДО в этих режимах одинаковы.

Имеются два основных критерия, по которым можно различить режимы качаний и КЗ:

появление при КЗ несимметрии трехфазной системы токов или напряжений (хотя бы кратковременной при трехфазных КЗ)

и отсутствие несимметрии (или малые ее значения) в режимах качаний;

наличие существенных изменений (приращений) электрических величин (фазных, линейных, симметричных составляющих) за малые промежутки времени при КЗ и незначительные изменения этих же величин за такие же малые промежутки времени при качаниях, что обусловлено более плавными изменениями величин при качаниях в ЭС по сравнению с изменениями при КЗ.

По принципам выполнения и реагирования на указанные факторы УБК можно разделить на две группы:

*Группа I* — устройства, содержащие пусковой орган (ПО) и обеспечивающие пуск ДЗ при КЗ на время, достаточное для ее срабатывания, с последующим выводом ДЗ из действия. При этом ПО выполняется таким образом, что запускается при КЗ и не запускается при качаниях.

*Группа II* — устройства, обеспечивающие нахождение ДЗ в состоянии готовности к срабатыванию и блокирующие ДЗ в условиях возникновения качаний и асинхронного хода путем фиксации медленного изменения контролируемого параметра (в основном входного сопротивления).

### 7.12.2. Элементы реализации УБК с пуском ДЗ при КЗ

Структура, поясняющая взаимодействие УБК группы I с различными ступенями ДЗ приведена на рис. 7.48,а.

Устройство состоит из пускового органа ПО и логической части ЛЧ и имеет два выхода 1 и 2. В нормальном режиме и при качаниях, если ПО не запущен, дистанционные органы ДО быстродействующей ступени I, объединенные схемой ИЛИ блокируются сигналом с выхода 1 УБК, воздействующим на схему ИИ. При возникновении повреждения в зоне или вне зоны действия, при котором срабатывает ПО, на выходе ПО возникает длительный или кратковременный сигнал на срабатывание (в зависимости от принципа выполнения ПО и вида повреждения). На рис. 7.48,б длительность этого сигнала  $t_{ПО}$  принята кратковременной. Логическая часть ЛЧ выполнена в УБК таким образом, чтобы при запуске ПО независимо от длительности  $t_{ПО}$  на выходе 1 УБК возникал импульс пуска быстродействующих ступеней заданной длительности  $t_n$  достаточный для срабатывания ДО и отключения повреждения. В необходимых случаях учитывает-



при повторном запуске ПО в течение времени приведения в состояние готовности  $t_r$ , после чего схема УБК возвращается в исходное состояние и обеспечивается готовность ДЗ к отключению через время  $t_r$ . Возможны варианты выполнения УБК, когда время  $t_r$  не является заданным, а определяется исчезновением факторов, характеризующих наличие КЗ, например исчезновением несимметрии в системе токов или напряжений и т.д.

Рассмотренный принцип введения быстродействующих ступеней на время  $t_n$  с последующим их выводом на заданное время  $t_r$  дает возможность обеспечить действие ДЗ на отключение при КЗ в защищаемой зоне и отсутствие излишних срабатываний при внешних КЗ, сопровождающихся развитием качаний в ЭС. В последнем случае предполагается, что в процессе развивающихся после внешнего КЗ качаний углы расхождения эквивалентных ЭДС за время  $t_n$  невелики, и входное сопротивление не успеет войти в зону действия ДО за время  $t_n$ , после чего быстродействующая ступень блокируется схемой 1И. Формируемый УБК сигнал  $t_n$  используется также для фиксации действия ступеней с выдержкой времени, если имеется одновременный запуск УБК и измерительных органов данной ступени.

Очевидно, что подобный принцип нельзя применить полностью для сравнительно медленнодействующих ступеней, например ступени II на рис.7.48,а, действующих с выдержкой времени, так как блокирование через время  $t_n$  препятствует действию на отключение элемента времени ступени В, если время  $t_n$  меньше его уставки. Поэтому выход 2ЛЧ, воздействующий на блокирование медленнодействующей ступени через схему 2И, выполнен таким образом, что после запуска ПО сигнал с его выхода подхватывается ЛЧ и существует на выходе 2 время  $t_r$ , достаточное для действия ступени ДЗ с наибольшей выдержкой времени.

В необходимых случаях время  $t_r$  выбирается большим длительности цикла автоматического повторного включения. Данное решение менее эффективно при качаниях, развивающихся после возникновения внешнего КЗ. Однако наличие выдержки времени ступени (элемента В) обеспечивает отстройку от качаний с малым периодом, так как за время нахождения входного сопротивления внутри области действия ДО элемент В в этом случае не успевает набрать необходимую выдержку времени. При медленных качаниях с большим периодом, не являющихся след-

ствием внешних КЗ, блокирование ДЗ обеспечивается отсутствием запуска ПО, отстроенного от таких режимов по принципу действия.

Распространенным вариантом является включение между схемой 2И и элементом выдержки времени ступени В (рис. 7.48,а) блока памяти П (выполнен на элементах ЗИЛИ, ЗИ). Наличие блока П обеспечивает подхват разрешающего импульса с выхода 2 ЛЧ и после истечения времени  $t_{\tau}$ , если к указанному времени ДО медленно действующих ступеней остались в сработанном состоянии (имеется сигнал на выходе элемента 2ИЛИ).

Этот подхват исчезает после возврата ДО, когда с выхода элемента 2ИЛИ приходит блокирующий сигнал на вход 2 элемента ЗИ. Указанное эффективно, в частности, при повторно следующих запусках УБК в течение времени, меньшего  $t_{\tau}$ , когда к началу повторного повреждения в зоне элемент выдержки времени в УБК, обеспечивающий время  $t_{\tau}$ , уже был запущен предварительно. Элемент П в этом случае не позволяет блокировать ступени ДЗ и обеспечивает отключение повреждения.

Пусковые органы УБК данного типа реагируют на скорость изменения величин, зависящих от тока или напряжения, и должны иметь достаточную чувствительность, чтобы надежно обеспечивать пуск дистанционный защиты при любых видах КЗ в том числе и при КЗ с малыми токами. В тоже время ПО не должны запускаться при качаниях с максимально возможными токами и минимальным периодом, когда скорость изменения измеряемых величин достигает максимальных значений. Одним из эффективных решений, с учетом этого, является использование ПО на основе выделения векторного приращения симметричных составляющих токов (напряжений) отдельных последовательностей [5].

В основу ПО данного типа положен принцип выделения при скачкообразном изменении вектора  $I_2$  или  $U_2$  разностного сигнала с выходов инерционного и безынерционного элементов, который в установившемся режиме равен нулю, а в переходном режиме отличается от нуля из-за процессов установления сигналов в инерционном элементе. Структурная схема на рис. 7.49,а поясняет данный принцип выполнения применительно к пусковым органам, реагирующим на приращение вектора  $I_2$ .

Сигнал с выхода фильтра токов обратной последовательности ФТОП поступает на инерционный ИЭ и безынерционный эле-



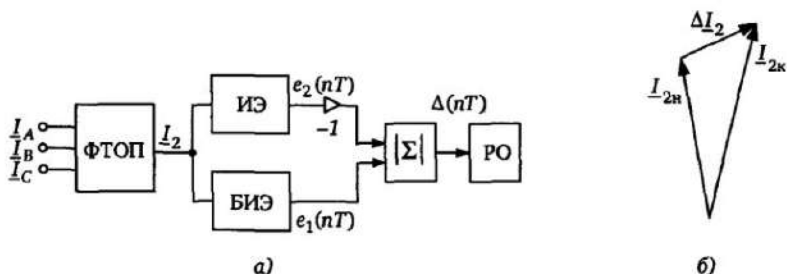


Рис. 7.49. Принцип выполнения пускового органа УБК на основе выделения векторного приращения тока обратной последовательности (а); соотношения между векторами (б)

менты БИЭ. Сигнал на выходе ИЭ инвертируется и складывается в сумматоре  $|\Sigma|$  с сигналом выхода БИЭ.

Далее используется абсолютное значение выходного сигнала сумматора  $\Delta(nT) = |e_1(nT) - e_2(nT)|$ . Инерционный элемент ИЭ задерживает сигнал на время  $\Delta t = mT_0$ , кратное периоду  $T_0$  основной частоты  $\omega_0$ . Поэтому в установившемся режиме с частотой  $\omega_0$  цифровой сигнал  $\Delta(nT)$  на выходе сумматора примерно равен нулю, так как сигналы  $e_1(nT)$  и  $e_2(nT)$  равны по модулю и по фазе и сигнал  $e_2(nT)$  дополнительно инвертируется.

При скачкообразном изменении вектора  $I_2$  при КЗ от значения  $I_{2н}$  до значения  $I_{2к}$  (рис. 7.49,б) сигнал  $e_1(nT)$  на выходе безынерционного элемента сразу же принимает значения, соответствующие вектору  $I_{2к}$ , а сигнал  $e_2(nT)$  на выходе инерционного элемента в течение времени  $mT_0$  остается прежним, т.е. соответствующим вектору  $I_{2н}$ . В результате на выходе сумматора на время  $mT_0$  возникает сигнал  $\Delta(nT)$ , пропорциональный геометрическому приращению  $\Delta I_2 = I_{2к} - I_{2н}$ . В указанный промежуток времени при достаточном значении сигнала  $\Delta(nT)$  реагирующий орган РО срабатывает и обеспечивает запуск дистанционной защиты при КЗ. Цифровая реализация данного принципа аналогична описанной в п. 3.5.3 (см. рис. 3.15).

Возможны случаи, когда ПО на основе данного решения недостаточно чувствителен из-за необходимости отстройки реагирующего органа от небалансов, возникающих при качаниях и асинхронном ходе вследствие значительного различия частот сигналов. В этом случае сигналы  $e_1(nT)$  и  $e_2(nT)$  уже не совпадают по фазе вследствие несоответствия задержки  $mT_0$  реальным частотам в сети в установившемся режиме качаний или

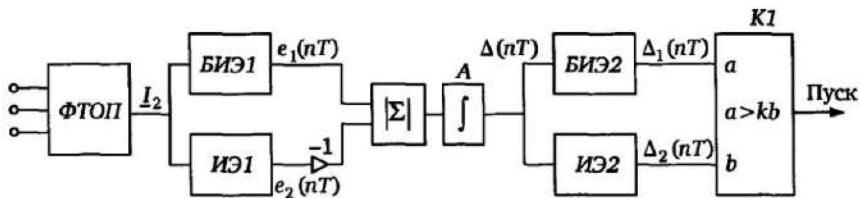


Рис. 7.50. Структура пускового органа УБК на основе двойного выделения приращения вектора тока обратной последовательности

асинхронного хода. В результате с учетом возможной несимметрии токов величина  $\Delta(nT)$  на выходе сумматора (рис. 7.49,а) может быть значительной. Указанное требует соответствующего закругления РО для отстройки от запуска ДЗ в условиях качаний.

В определенной степени этот недостаток УБК устраняет видоизменение данного принципа, заключающееся в повторном выделении приращения разностного сигнала. На рис. 7.50 приведена как пример структурная схема ПО на основе двойного выделения приращения вектора тока обратной последовательности.

В данном случае модуль  $\Delta(nT)$  векторного приращения тока  $I_2$  формируется так же как на рис. 7.49,а и интегрируется (блок А). Затем приращение  $\Delta(nT)$  подводится снова к инерционному ИЭ2 и безынерционному БИЭ2 элементам, а выходные сигналы этих элементов  $\Delta_1(nT)$  и  $\Delta_2(nT)$ , эквивалентные выпрямленным и сглаженным аналоговым сигналам сравниваются между собой с помощью компаратора К1 по условию  $\Delta_1(nT) > k\Delta_2(nT)$ , при  $k > 1$ .

В условиях качаний и асинхронного хода на выходе интегратора А возникает небаланс  $\Delta(nT)$ . Этому небалансу в установившемся режиме соответствуют примерно равные значения однополярных цифровых сигналов  $\Delta_1(nT)$  и  $\Delta_2(nT)$  на выходах блоков БИЭ2 и ИЭ2. Пуска ДЗ при этом не происходит, так как условие срабатывания компаратора К1  $\Delta_1(nT) - k\Delta_2(nT) > 0$  при  $k > 1$ , соответствующее рассмотренному повторному выделению приращения вектора  $I_2$  с использованием интегральных величин, не выполняется. Указанным обеспечивается дополнительная отстройка ПО от небалансов, возникающих вследствие отклонения частоты в условиях качаний и асинхронного хода.

При скачкообразном изменении амплитуды или фазы вектора  $I_2$ , сопровождающемся возникновением приращения  $\Delta I_2$  (см.

рис. 7.49,б) на выходе интегратора А вследствие инерционности блока ИЭ1 возникает небаланс  $\Delta(nT)$ , пропорциональный модулю  $|\Delta I_2|$  (рис. 7.50). Соответственно скачкообразно возникает сигнал  $\Delta_1(nT)$  на выходе безинерционного блока БИЭ2, в то время как сигнал  $\Delta_2(nT)$  на выходе инерционного блока ИЭ2 в первые моменты времени не изменяется. В результате условие  $\Delta_1(nT) > k\Delta_2(nT)$  при скачкообразном изменении контролируемого вектора выполняется, что и обеспечивает пуск ДЗ в данном случае.

Основными недостатками данного принципа блокирования ДЗ являются:

- возможность излишних срабатываний быстродействующих ступеней при внешних КЗ, сопровождающихся качаниями с малыми периодами (быстрым расхождением эквивалентных ЭДС), когда за время  $t_n$  входное сопротивление успевает войти в зону действия ДО, хотя подобный режим и маловероятен вследствие небольших значений  $t_n$ ;

- возможность отказа или существенного замедления действия защиты при быстро следующих друг за другом повторных КЗ, когда в момент КЗ защита выведена из действия предыдущим запуском пускового органа (особенно опасен этот недостаток при чувствительных ПО, запускающихся при переключениях нагрузки);

- ограничение чувствительности ДЗ с учетом необходимости отстройки ПО от срабатывания в условиях установившейся несимметрии сети в нагрузочном режиме при отклонении частоты сети от номинальной, а также при качаниях и асинхронном ходе;

- определенное снижение надежности действия при отключении КЗ вследствие возможности отказа действия ДЗ в результате неисправности УБК.

### **7.12.3. Устройства блокирования при качаниях на основе контроля скорости изменения сопротивления (« $\Delta Z/\Delta t$ »)**

**Принцип построения УБК.** На рис. 7.51,а поясняется принцип фиксации различия скоростей изменения сопротивления  $Z$  при КЗ и качаниях.

Дистанционный орган ДО имеет помимо основной характеристики 1 (рис. 7.51,б) пусковую характеристику 2, обеспечи-

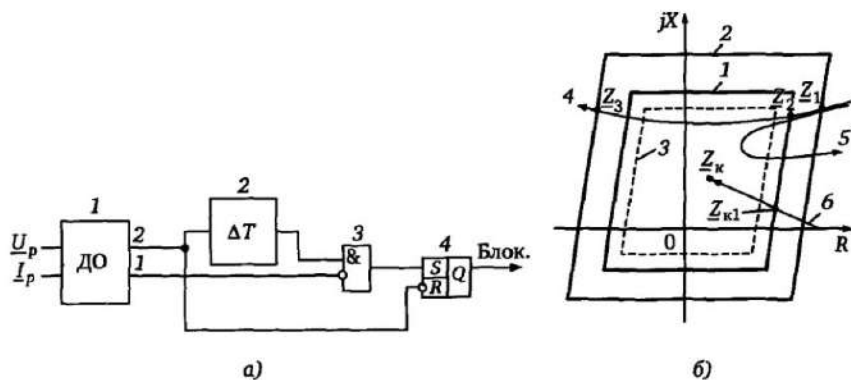


Рис. 7.51. Принцип выполнения УБК на основе фиксации скорости изменения сопротивления на входе ДО

вающую совместно с характеристикой 1 выявление качаний. Характеристика 2 с определенным запасом охватывает основную характеристику 1. Выходы 1 и 2 ДО на рис. 7.51,а соответствуют характеристикам 1 и 2. Сигнал выхода 2 задерживается на время  $\Delta T$  элементом выдержки времени 2. Блокирующий сигнал Блок. дистанционной ступени с характеристикой 1 в случае качаний формируется триггером 4 при отсутствии в течение времени  $\Delta T$  после вхождения вектора  $\underline{Z}$  в характеристику 2 срабатывания ДО по контролируемой характеристике 1. Указанное свидетельствует об относительно малой скорости изменения вектора  $\underline{Z}$ , что характеризует режим качаний.

При КЗ в области, ограниченной основной характеристикой 1 (точка  $\underline{Z}_k$ , траектория б на рис. 7.51,б), сигналы на выходах 2 и 1 ДО появляются с небольшой разницей во времени, меньшей  $\Delta T$  вследствие скачкообразного изменения сопротивления на входе ДО при КЗ. Поэтому к моменту истечения выдержки времени  $\Delta T$  сигнал на выходе 1 ДО меняет знак, что препятствует переключению схемы И (блок 3) и запуску триггера 4. При качаниях (траектории 4, 5 на рис. 7.51,б) элемент задержки 2 запускается в момент  $t_1$  вхождения  $\underline{Z}(t)$  в характеристику 2 (точка  $\underline{Z}_1$ ) и вырабатывает сигнал через время  $\Delta T$  в данном случае раньше времени  $t_2$  вхождения траектории  $\underline{Z}(t)$  в характеристику 1, т.е.  $t_2 - t_1 > \Delta T$ . Поэтому через время  $\Delta T$  схема И (блок 3) переключается и фиксирует режим качаний, запуская триггер 4 и вырабатывая блокирующий сигнал. Готовность ДЗ к

повторному срабатыванию наступает после выхода траектории  $\underline{Z}(t)$  из дополнительной характеристики 2, что обеспечивает возврат триггера 4.

Приведенное выше описание является упрощенным и поясняет лишь принцип выполнения УБК. Одним из недостатков данного решения является определенное сокращение зоны контролируемой характеристики 1 при КЗ вследствие того, что время срабатывания  $t_2$  при КЗ вблизи граничной линии может быть достаточно большим. Указанное приводит к условию  $t_2 - t_1 > \Delta T$  при КЗ вблизи точки  $\underline{Z}_{к1}$  (рис. 7.51,б) и отказу в действии. С учетом этого срабатывание ДО при данном способе блокирования при качаниях происходит реально в более узкой области, ограниченной пунктирной линией 3, где ДО срабатывает за время  $t_2$ , соответствующее условию  $t_2 - t_1 < \Delta T$ .

Таким образом, для выявления качаний можно использовать две дополнительные характеристики 1 и 2, с определенным запасом охватывающие основную характеристику, например, характеристику 3 (рис. 7.51,б).

*Основные недостатки данного принципа:*

- сложность реализации дополнительных характеристик, охватывающих на определенных расстояниях основные характеристики;
- меньшая степень отстройки от нагрузочных режимов или загромождение ДО в результате того, что отстройка от нагрузочных режимов определяется внешней характеристикой 2, а чувствительность к повреждениям — основной характеристикой 1;
- необходимость обеспечения определенного расстояния между внутренней и внешней характеристиками и достаточного быстроедействия ДО, так как в противном случае качания с малыми периодами будут восприниматься как КЗ, что вызывает излишние срабатывания ДО.

Чем больше разность частот  $\Delta f = f_1 - f_2$  эквивалентных ЭС, тем больше скорость изменения вектора  $\underline{Z}(t)$  при качаниях и тем больше должна быть уставка контроля УБК по скорости качаний  $V = |\Delta \underline{Z}| / \Delta T$ , где  $|\Delta \underline{Z}|$  — модуль расстояния между точками  $\underline{Z}_1$  и  $\underline{Z}_2$  прохождения характеристик 1 и 2,  $\Delta T$  — уставка по времени элемента, фиксирующего разновременность прохождения характеристик при качаниях. Существуют ограничения в увеличении расстояния  $|\Delta \underline{Z}_{\max}|$ , определяемые необходимостью отстройки от нагрузочных режимов, и уменьшении  $\Delta T$ , связан-

ные с максимально возможной разницей времен срабатывания при КЗ  $T_{\max} = t_{2\max} - t_{1\min}$ , от которой необходимо отстроиться при выявлении качаний. С учетом этого имеется предельная скорость  $V_{\text{пред}}$  изменения  $Z$  (разрешающая способность УБК), при превышении которой качания распознаются как КЗ, т.е. УБК не функционирует ( $V_{\text{пред}} > |\Delta Z_{\min}| / \Delta T_{\max}$ ).

#### 7.12.4. Граничные условия выявления качаний на основе критерия « $\Delta Z / \Delta t$ »

Траектория изменения сопротивления  $Z_p$  на входе ДО описывается в общем случае соотношением (7.114). Рассматривая эквивалентную систему (рис. 7.52,а) в условиях качаний, примем обозначения

$$\underline{q} = \frac{E_2}{E_1} = q e^{j\varphi}; \quad \varphi = \arg E_2 - \arg E_1; \quad \Delta f = f_1 - f_2,$$

где  $q$  — соотношение модулей эквивалентных ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ ;  $\varphi$  — угол между ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , изменяющийся в процессе качаний (асинхронного хода);  $\Delta f$  — разность частот эквивалентных генераторов.

С учетом принятых обозначений имеем значения угла  $\varphi$  в произвольный момент времени  $t$

$$\varphi = \arg E_2 - \arg E_1 = 2\pi f_2 t - 2\pi f_1 t = -2\pi \Delta f t. \quad (7.186)$$

Траектории  $Z$  при значениях  $q \neq 1$  являются окружностями с центром  $Z_0$  и радиусом  $R$ , описываемыми выражениями (7.116), а при  $q = 1$ , ( $E_1 = E_2$ ) — прямыми линиями, равноотстоящими

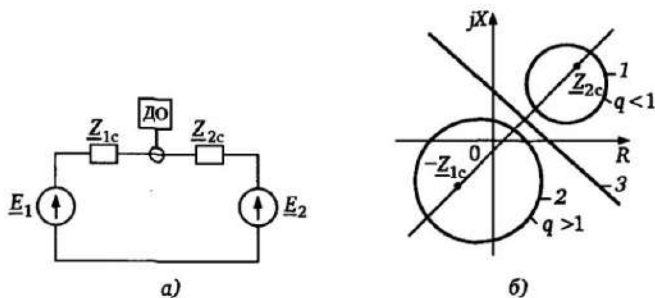


Рис. 7.52. Эквивалентная схема ЭС (а) и траектории изменения  $Z$  при качаниях (б)

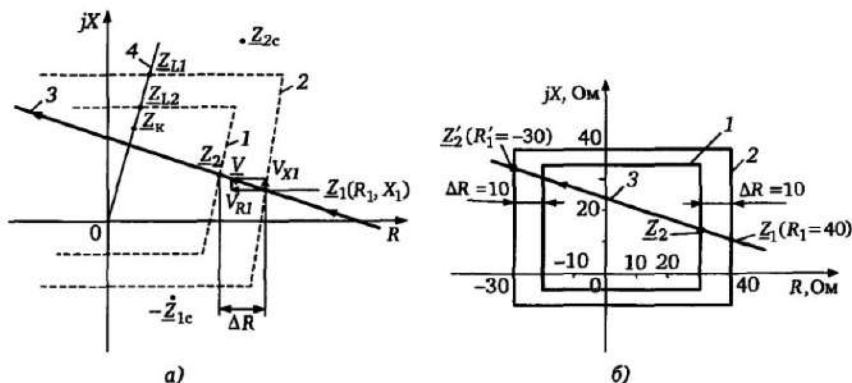


Рис. 7.53. К оценке предельной скорости качаний (а) и предельной частоты  $\Delta f_{\text{пред}}$  (б): 1, 2 — характеристики ДО для выявления качаний; 3 — траектория  $Z$  при качаниях; 4 — характеристика линии

от точек  $-Z_{1c}$  и  $Z_{2c}$  (рис. 7.52,б), соответствующих сопротивлениям эквивалентных систем (рис. 7.52,а).

Найдем линейную скорость  $\underline{V} = dZ/dt$  в заданной точке  $Z_1(R_1, X_1)$  траектории (рис. 7.53,а) для случая прямолинейной траектории 3 ( $q = 1$ ), соответствующей дуге окружности бесконечного радиуса (линейная скорость при этом максимальна).

В этом случае уравнение траектории (7.114) примет вид

$$\underline{Z} = \frac{Z_{2c} - e^{j\varphi} Z_{1c}}{1 - e^{j\varphi}}. \quad (7.187)$$

Выражение (7.187) преобразуем к виду

$$\underline{Z} = \frac{Z_{2c} - Z_{1c}}{2} + j \frac{Z_{2c} + Z_{1c}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \underline{Z}_a + j \frac{Z_{\Sigma}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}, \quad (7.188)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{\Sigma} &= R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = Z_{2c} + Z_{1c}; \\ \underline{Z}_a &= R_a + jX_a = \frac{Z_{2c} - Z_{1c}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (7.189)$$

Скорость  $\underline{V}$  изменения комплексного параметра  $Z$  определится соотношением

$$\underline{V} = \frac{dZ}{dt} = V_R + jV_X = j \frac{Z_\Sigma}{2} \frac{\pi \Delta f}{\sin^2 \pi \Delta f t}, \quad (7.190)$$

где

$$\left. \begin{aligned} V_R &= \frac{dR}{dt} = -\frac{X_\Sigma}{2} \frac{\pi \Delta f}{\sin^2 \pi \Delta f t}; \\ V_X &= \frac{dX}{dt} = \frac{R_\Sigma}{2} \frac{\pi \Delta f}{\sin^2 \pi \Delta f t}. \end{aligned} \right\} \quad (7.191)$$

Для нахождения скорости изменения сопротивления в точке  $Z_1(R_1, X_1)$  пересечения траектории  $Z$  с характеристикой 2 (рис. 7.53,а), примем в уравнении траектории качаний (7.188)  $Z = Z_1 = R_1 + jX_1$ . В результате, рассматривая отдельно вещественную или мнимую части уравнения (7.188), получим

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2(R_a - R_1)}{X_\Sigma} = \frac{2(X_a - X_1)}{R_\Sigma},$$

откуда имеем

$$\frac{1}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} = \frac{1}{\sin^2 \pi \Delta f t} = \frac{4(R_a - R_1)^2}{X_\Sigma^2} + 1 = \frac{4(X_a - X_1)^2}{R_\Sigma^2} + 1.$$

Значения составляющих скорости изменения сопротивления в точке  $Z_1$  получим, подставив в выражение (7.191) найденное значение  $\sin^2 \pi \Delta f t$ :

$$\left. \begin{aligned} V_{R1} &= -\frac{X_\Sigma}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(R_a - R_1)^2}{X_\Sigma^2} + 1 \right] = -\frac{X_\Sigma}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(X_a - X_1)^2}{R_\Sigma^2} + 1 \right]; \\ V_{X1} &= \frac{R_\Sigma}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(R_a - R_1)^2}{X_\Sigma^2} + 1 \right] = \frac{R_\Sigma}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(X_a - X_1)^2}{R_\Sigma^2} + 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7.192)$$

Отрицательный знак при значениях активной составляющей скорости  $V_{R1}$  означает, что в рассматриваемом случае направление этой составляющей противоположно направлению оси  $R$  (рис. 7.53). Полная скорость изменения сопротивления  $\underline{V}$  с учетом соотношений (7.192) равна



$$\begin{aligned} \underline{V} = \frac{dZ}{dt} &= j \frac{Z_{\Sigma}}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(R_a - R_1)^2}{X_{\Sigma}^2} + 1 \right] = \\ &= j \frac{Z_{\Sigma}}{2} \pi \Delta f \left[ \frac{4(X_a - X_1)^2}{R_{\Sigma}^2} + 1 \right]. \end{aligned} \quad (7.193)$$

На основе полученных соотношений определяется при известных параметрах ЭС ( $Z_{1c}$ ,  $Z_{2c}$ ,  $\Delta f$ ) скорость  $\underline{V}$  в момент входа траектории  $\underline{Z}$  при качаниях в характеристику срабатывания ДО. Практически важной задачей является оценка возможности блокирования ДО при качаниях, а также определение предельной разности частот  $\Delta f_{\text{пред}}$  соответствующей границе функционирования УБК. В частности, если  $\Delta R$  — разность  $R$ -координат точек  $Z_1$  и  $Z_2$ , фиксируемых при качаниях (рис. 7.53),  $\Delta T$  — уставка задержки для выявления качаний (см. рис. 7.51,а), то предельная выявляемая скорость качаний равна  $V_{\text{Рпред}} = \Delta R / \Delta T$ . Условие правильного функционирования УБК имеет в этом случае вид  $V_{R1} \leq V_{\text{Рпред}}$ , откуда с учетом выражения (7.192) получим предельную разность частот эквивалентных генераторов, при которой качания выявляются

$$f_{\text{пред}} = \frac{2V_{\text{Рпред}}}{\pi X_{\Sigma} \left[ \frac{4(R_a - R_1)^2}{X_{\Sigma}^2} + 1 \right]}. \quad (7.194)$$

В качестве примера определим предельную частоту качаний для ДО с характеристикой рис. 7.53,б при  $Z_{1c} = 20e^{j80^\circ}$  Ом,  $Z_{2c} = 50e^{j65^\circ}$  Ом. Внешняя характеристика 2 имеет  $R$ -координаты  $R_1 = 40$  Ом,  $R'_1 = -30$  Ом; расстояние между внешней и внутренней характеристикой  $\Delta R = 10$  Ом; задержка по времени, необходимая для выявления качаний  $\Delta T = 0,02$  с, что соответствует  $V_{\text{Рпред}} = 10/0,02 = 500$  Ом/с.

В данном случае с учетом (7.189) имеем, Ом:

$$Z_{\Sigma} = Z_{1c} + Z_{2c} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = 24,6 + 65j;$$

$$Z_a = 0,5(Z_{1c} - Z_{2c}) = R_a + jX_a = 8,84 + 12,8j,$$

т.е.  $X_{\Sigma} = 65$ ;  $R_a = 8,84$ . Максимальная допустимая разность частот  $\Delta f_{\text{пред}}$  при вхождении траектории  $\underline{Z}$  в правую область характеристики 1 ( $R_1 = 40$ ) определится из выражения (7.194)

$$\Delta f_{1\text{пред}} = \frac{2 \cdot 500}{3,14 \cdot 65 \left[ \frac{4(40 - 8,84)^2}{65^2} + 1 \right]} = 2,55 \text{ Гц.}$$

Максимальная допустимая разность частот  $\Delta f_{\text{пред}}$  при входе в характеристику в II квадранте определяется также из (7.194) при  $R_1 = -30$

$$\Delta f_{2\text{пред}} = \frac{2 \cdot 500}{3,14 \cdot 65 \left[ \frac{4(-30 - 8,84)^2}{65^2} + 1 \right]} = 2,02 \text{ Гц.}$$

Таким образом, разрешающая способность УБК в данном случае определяется значением  $\Delta f_2 = 2,02$  Гц.

### 7.12.5. Оценка быстродействия ДО и его влияние на параметры УБК «AZ/Δv»

В качестве показателя, характеризующего быстродействие ДО, в мировой практике применяются так называемые SIR — характеристики (рис. 7.54,б), показывающие изменение времени срабатывания ДО  $t_{\text{ср}}$  в зависимости от двух параметров:

$$\alpha_k = \left| \frac{Z_k}{Z_L} \right|; \quad \alpha_c = \left| \frac{Z_c}{Z_L} \right|, \quad (7.195)$$

где для ЭС принято:  $Z_k$  — сопротивление участка линии от места установки защиты до места КЗ;  $Z_L$  — сопротивление защищаемого участка линии (сопротивление уставки);  $Z_c$  — сопротивление эквивалентного источника.

Время срабатывания ДО  $t_{\text{ср}}$  увеличивается с ростом каждого из параметров  $\alpha_k$  и  $\alpha_c$ . Физически увеличение  $t_{\text{ср}}$  с ростом коэффициента  $\alpha_k$  объясняется приближением  $Z_k$  к границе зоны действия  $Z_L$ , т.е. уменьшением положительного момента на срабатывание. Увеличение  $t_{\text{ср}}$  с увеличением соотношения  $\alpha_c = |Z_c/Z_L|$ , соответствует уменьшению напряжения  $U_k$ , подводимого к ДО при КЗ, т.е. увеличению перепада между напряжением  $U_c$  в доаварийном режиме и напряжением  $U_k$  при КЗ.

Этот эффект объясняется, прежде всего, инерционными свойствами ДО, содержащих динамические элементы (трансформа-

торы, частотные фильтры), обуславливающими постепенное исчезновение информации о предаварийном «тормозящем» напряжении  $\underline{U}_c$ . Простейшая математическая модель, для оценки времени срабатывания ДО, основанная на учете динамических свойств ДО по цепям напряжения дифференциальным уравнением первого порядка, качественно описывает измеряемое алгоритмом ДО напряжение  $\underline{U}_p$  при скачке напряжения от предаварийного значения  $\underline{U}_c$  до напряжения КЗ  $\underline{U}_k$ :

$$\underline{U}_p = \underline{U}_c + (\underline{U}_k - \underline{U}_c)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (7.196)$$

При этом  $\tau$  — эквивалентная постоянная времени, характеризующая инерционные свойства ДО по цепям напряжения. С учетом обозначений (7.195) и схемы замещения ЭС (рис. 7.54,а) имеем  $I_k = \underline{U}_c / [(\alpha_c + \alpha_k)Z_L]$  и после преобразований в первом приближении для модуля  $U_p$  из (7.196) получим

$$U_p = U_c \frac{\alpha_k}{|\alpha_c + \alpha_k|} + e^{-\frac{t}{\tau}} \frac{\alpha_c}{|\alpha_c + \alpha_k|}. \quad (7.197)$$

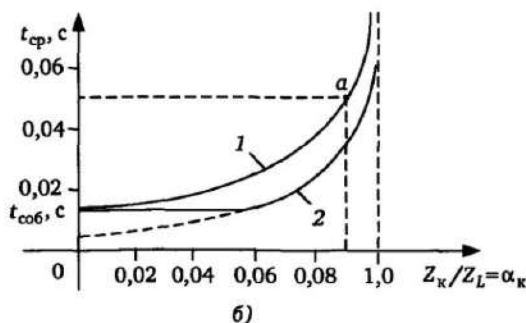
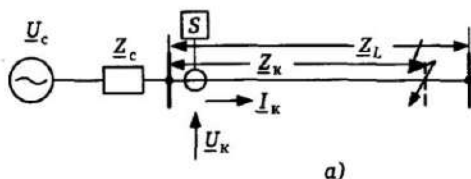


Рис. 7.54. К оценке быстродействия ДО

Условие срабатывания ДО наступит в момент  $t$ , когда напряжение  $U_p$  станет меньше напряжения  $U_{cp}$ , где

$$U_{cp} = I_k Z_L = \frac{U_c}{|\alpha_c + \alpha_k|}. \quad (7.198)$$

Условие срабатывания получим, приравнявая правые части выражений (7.197) и (7.198), откуда в первом приближении

$$\alpha_k + \alpha_c e^{-\frac{t_{cp}}{\tau}} = 1. \quad (7.199)$$

Из выражения (7.199) имеем оценку замедления срабатывания ДО

$$t_{cp} \approx \tau \ln \frac{\alpha_c}{1 - \alpha_k}. \quad (7.200)$$

Зависимость, определяемая выражением (7.200) при условии  $\alpha_c > 1 - \alpha_k$ , является возрастающей функцией при увеличении  $\alpha_k$  и характеризует замедление ДО при приближении к границе зоны действия.

При  $\alpha_c \leq 1 - \alpha_k$  замедление, рассчитанное на основе выражения (7.200), равно нулю, и время срабатывания ДО характеризуется его собственным временем срабатывания  $t_{соб}$ , определяемым алгоритмом обработки цифровых сигналов в ДО, т.е.  $t = t_{соб}$ . При КЗ вблизи конца зоны действия (большие значения  $\alpha_k$ ) и выполнении условия  $\alpha_c > 1 - \alpha_k$  собственное время срабатывания ДО можно в первом приближении не учитывать или учитывать лишь частично. Это обусловлено тем, что при плавном приближении к границе срабатывания параллельно происходит накопление необходимой информации в структуре алгоритма ДО (см. §3.5), и срабатывание происходит в этом случае без дополнительного собственного замедления.

Постоянная времени  $\tau$  определится по известным данным, например из имеющейся SIR-характеристики, полученной для других условий. Так, например, если известно что  $t_{cp} = 0,05$  с при  $\alpha_k = Z_k/Z_L = 0,9$ ;  $\alpha_c = Z_c/Z_L = 4$  (см. точка  $a$  на рис. 7.54,б), то из (7.200) имеем в первом приближении

$$\tau \approx t_{\text{cp}} \left[ \ln \frac{\alpha_c}{1 - \alpha_c} \right]^{-1} \approx 0,5 \left[ \ln \frac{4}{1 - 0,9} \right]^{-1} \approx 0,013 \text{ с.}$$

В качестве примера на рис. 7.54,б приведены зависимости  $t_{\text{cp}} = f(Z_{\text{к}}/Z_{\text{Л}})$  при различных значениях сопротивления источника  $Z_{\text{с}}$ , характеризующихся величиной  $\alpha = Z_{\text{с}}/Z_{\text{Л}}$  и  $t_{\text{собр}} = 0,015$  с. Характеристика 1 соответствует  $Z_{\text{с}} > Z_{\text{Л}}$ , т.е.  $\alpha_c > 1$ . Характеристика 2 соответствует  $\alpha_c = 0,4$ .

**Ограничения, накладываемые быстродействием ДО на величину задержки  $\Delta T$  в УБК по принципу « $\Delta Z/\Delta t$ ».** При заданных параметрах ЭС и характеристике ДО выявляемое предельное значение разности частот эквивалентных генераторов в соответствии с выражением (7.194) прямо пропорционально предельной линейной скорости  $V_{\text{Рпред}} = \Delta R/\Delta T$ . Увеличение  $\Delta R$  ограничивается требованиями, связанными с отстройкой внешней характеристики 2 (рис. 7.51,б) от нагрузочных режимов и невозможностью сужения внутренней характеристики 1 вследствие необходимости охвата повреждений через переходные сопротивления. Как уже указывалось, уменьшение задержки  $\Delta T$  ограничивается возможным замедлением реакции на КЗ внутренней характеристики 1 по сравнению с внешней характеристикой 2. Разность времен реагирования  $\Delta t_{12}$  характеристик 1 и 2 (см. рис. 7.53,а) на КЗ в точке  $Z_{\text{к}}$  можно оценить в первом приближении на основе соотношения (7.200), рассматривая точки  $Z_{\text{Л1}}$ ,  $Z_{\text{Л2}}$  как длины защищаемых зон по отношению к месту установки защиты

$$\Delta t_{12} = t_1 - t_2 \approx \tau \left( \ln \frac{Z_{\text{с}}}{Z_{\text{Л2}} - Z_{\text{к}}} - \ln \frac{Z_{\text{с}}}{Z_{\text{Л1}} - Z_{\text{к}}} \right) \approx \tau \left( \ln \frac{Z_{\text{Л1}} - Z_{\text{к}}}{Z_{\text{Л2}} - Z_{\text{к}}} \right). \quad (7.201)$$

Для того, чтобы при КЗ в точке  $Z_{\text{к}}$  короткое замыкание не воспринималось УБК (см. рис. 7.51,а) как качания, должно выполняться условие  $\Delta T > \Delta t_{12}$ .

### 7.12.6. Реализация цифрового УБК на основе принципа « $\Delta Z/\Delta t$ »

Структурная схема варианта УБК [9] приведена на рис. 7.55. В данном техническом решении можно выделить следующие основные моменты.

**Контроль измеряемых сопротивлений всех фаз трехфазной системы.** Качания могут возникать как в симметричном, так и в несимметричном режиме, например, в неполнофазном режиме или при однофазном КЗ. В связи с этим контролируются сопротивления каждой фазы (блок 1), а также состояния выключателей отдельных фаз (блок 7). При возникновении качаний происходит блокирование измерений всех фаз дистанционной защиты. При возникновении КЗ в определенных фазах на фоне качаний блокирование соответствующих фаз снимается, давая возможность произвести отключение КЗ от дистанционной защиты.

**Фиксация области действия УБК в плоскости  $Z$ .** Область функционирования УБК в плоскости  $Z$  ограничивается внешней характеристикой 2 (см. рис. 7.51,б), вход в которую фиксируется блоком 5 (рис. 7.55).

**Измерение скорости  $\Delta Z/\Delta t$**  обеспечивается блоком 2, контролирующим отсутствие быстрого изменения вектора  $Z$ . Блок 3 контроля симметрии с учетом состояния выключателей (блок 7) фиксирует симметричность измерений в трёх фазах. Блок 4 осуществляет контроль непрерывности траектории изменения  $Z$  (отсутствие разрывов в траекториях  $Z$  при качаниях).

**Фиксация качаний** (блок 11) происходит при соответствии критериям качаний траекторий  $Z$  отдельных фаз (блоки 2, 3, 4, 10), входе траекторий  $Z$  в область УБК (блок 5) и отсутствии сигнала отключения от защитных функций (блок 6).

**Замедление в снятии сигнала блокирования** (блок 12) необходимо для предотвращения неправильного действия защиты в случаях возможных коммутаций во время качаний, когда кратковременно не все критерии качаний выполняются вследствие скачкообразных изменений измеряемых величин.

**Различные возможности блокирования ступеней дистанционной защиты** (блок 8) позволяют в зависимости от конфигурации сети, уставок защиты и концепции резервирования выбирать ступени защиты, блокируемые при качаниях.

**Контроль асинхронного режима.** В зависимости от параметров ЭС траектории  $Z$  могут при качаниях (асинхронном ходе) существенно различаться (см. рис. 7.51,б).

Асинхронный режим (траектория 4) характеризуется, в отличие от качаний (траектория 5), дальнейшим увеличением угла  $\phi$  между эквивалентными ЭДС, что соответствует выходу траек-

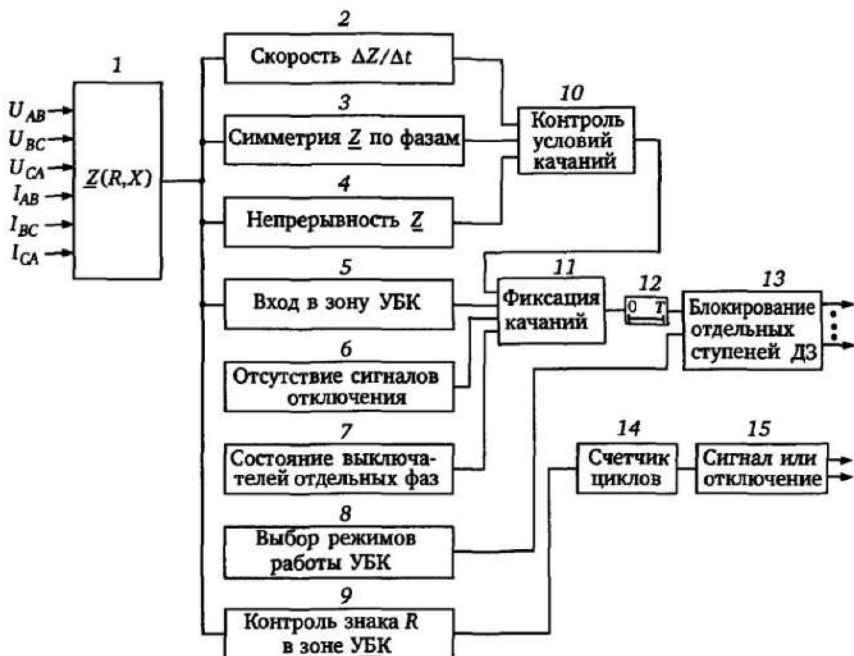


Рис. 7.55. Упрощенная структура УБК по принципу « $\Delta Z/\Delta t$ » [9]

тории  $\underline{Z}$  из контролируемой УБК области в точку  $\underline{Z}_3$  при отрицательном значении активной составляющей  $R$  измеряемого сопротивления  $\underline{Z}$ . Таким образом, контроль знака  $R$  в зоне УБК в совокупности с контролем входа и выхода в зону УБК дает информацию о проворотах эквивалентных ЭДС относительно друг друга. Указанное позволяет на основе структуры рис. 7.55 в необходимых случаях контролировать число циклов асинхронного режима (блок 14) и вырабатывать сигнал отключения (блок 15). На данной основе могут быть реализованы устройства автоматической ликвидации асинхронного режима в энергосистемах.

## Глава 8

# Функциональные элементы цифровой защиты и автоматики ВЛ

### 8.1. Структура программного обеспечения ЦРЗ

В общем плане основные элементы ЦРЗ и используемые потоки информации рассмотрены в гл. 1. Более развернуто основные функции программного обеспечения и взаимодействие основных программ, обеспечивающих функционирование ЦРЗ поясняет рис. 8.1.

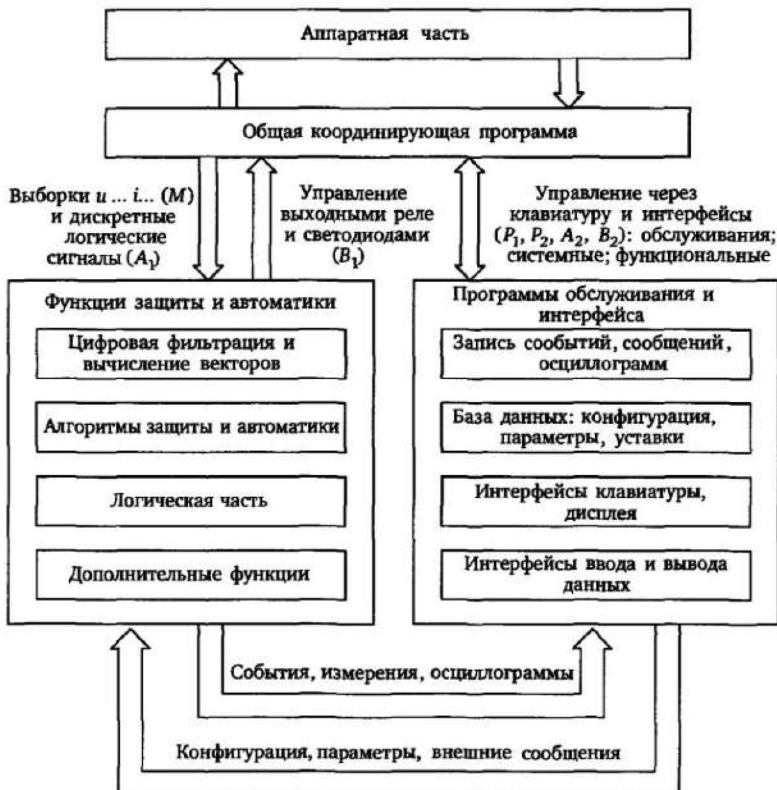


Рис. 8.1. Структура программной части ЦРЗ



Обозначения потоков информации соответствуют рис.1.1. Укрупненно можно выделить три программных блока, образующих программную структуру ЦРЗ:

- общая координирующая программа;
- обеспечение функций защиты и автоматики;
- программы интерфейса и обслуживания.

**Общая координирующая программа.** Данный блок программ обеспечивает, прежде всего, связь между аппаратной и программной частями ЦРЗ. В частности обеспечивается непрерывное поступление входной информации (выборки измеряемых величин, опрос входных дискретных сигналов, портов интерфейса), функционирование клавиатуры и дисплея, прохождение команд к группам выходных реле и светодиодам, интерфейсным портам и т. д.

**Программный блок обеспечения функций защиты и автоматики ЦРЗ.** Программы, содержащиеся в данном блоке, обеспечивают реализацию отдельных функций защиты и автоматики в соответствии с назначением рассматриваемого устройства ЦРЗ. В этом плане, прежде всего, следует выделить следующие группы функций.

**Цифровая обработка входных сигналов** в соответствии с предъявляемыми требованиями (цифровая фильтрация, формирование векторов, соответствующих сигналам переменного тока, использование интегральных значений и т.д., см. гл. 2 и 3).

**Алгоритмы отдельных функций защиты и автоматики.** В данном случае реализуются с использованием полученных цифровых значений контролируемых входных сигналов с учетом заданных параметров и уставок требуемые защитные функции устройства, в основном рассмотренные в предыдущих главах. Основные функции автоматики ВЛ рассматриваются ниже.

**Логическая часть защиты.** При реализации программных функций следует отдельно выделить логическую часть защиты. В задачи этих программ входят прежде всего: обеспечение необходимых выдержек времени отдельных каналов отключения; выработка команд и сообщений в соответствии с сигналами от других блоков и объектов и формирование соответствующих команд и сообщений (например, организация команд однофазного или трехфазного отключения в соответствии с информацией о виде КЗ, состоянии отдельных фаз выключателя, действия УРОВ, сигналов с противоположного конца линии); ускорение отключения

## Глава 8

# Функциональные элементы цифровой защиты и автоматики ВЛ

### 8.1. Структура программного обеспечения ЦРЗ

В общем плане основные элементы ЦРЗ и используемые потоки информации рассмотрены в гл. 1. Более развернуто основные функции программного обеспечения и взаимодействие основных программ, обеспечивающих функционирование ЦРЗ поясняет рис. 8.1.

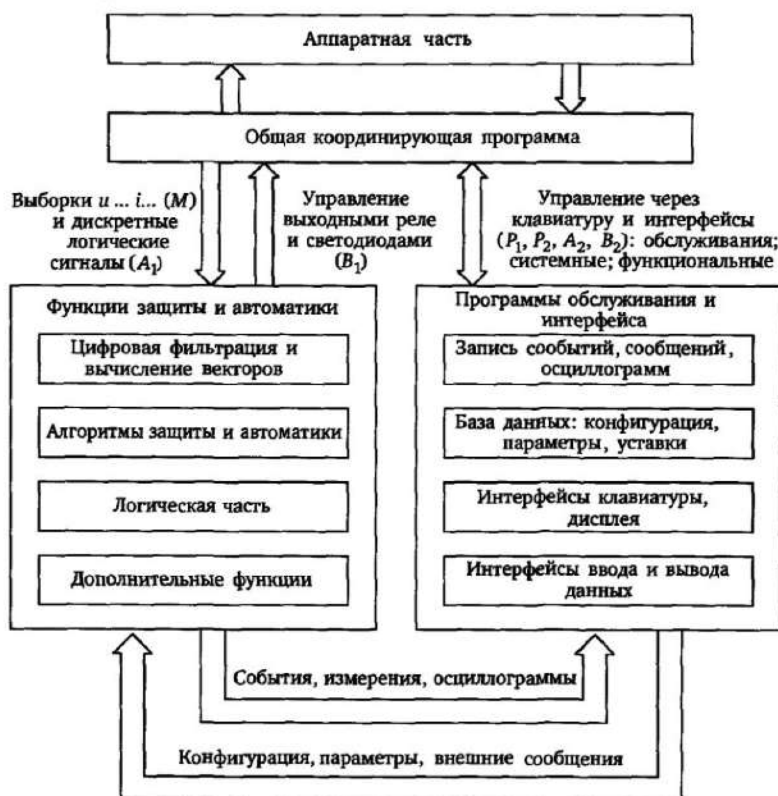


Рис. 8.1. Структура программной части ЦРЗ

Обозначения потоков информации соответствуют рис.1.1. Укрупненно можно выделить три программных блока, образующих программную структуру ЦРЗ:

- общая координирующая программа;
- обеспечение функций защиты и автоматики;
- программы интерфейса и обслуживания.

**Общая координирующая программа.** Данный блок программ обеспечивает, прежде всего, связь между аппаратной и программной частями ЦРЗ. В частности обеспечивается непрерывное поступление входной информации (выборки измеряемых величин, опрос входных дискретных сигналов, портов интерфейса), функционирование клавиатуры и дисплея, прохождение команд к группам выходных реле и светодиодам, интерфейсным портам и т. д.

**Программный блок обеспечения функций защиты и автоматики ЦРЗ.** Программы, содержащиеся в данном блоке, обеспечивают реализацию отдельных функций защиты и автоматики в соответствии с назначением рассматриваемого устройства ЦРЗ. В этом плане, прежде всего, следует выделить следующие группы функций.

**Цифровая обработка входных сигналов** в соответствии с предъявляемыми требованиями (цифровая фильтрация, формирование векторов, соответствующих сигналам переменного тока, использование интегральных значений и т.д., см. гл. 2 и 3).

**Алгоритмы отдельных функций защиты и автоматики.** В данном случае реализуются с использованием полученных цифровых значений контролируемых входных сигналов с учетом заданных параметров и уставок требуемые защитные функции устройства, в основном рассмотренные в предыдущих главах. Основные функции автоматики ВЛ рассматриваются ниже.

**Логическая часть защиты.** При реализации программных функций следует отдельно выделить логическую часть защиты. В задачи этих программ входят прежде всего: обеспечение необходимых выдержек времени отдельных каналов отключения; выработка команд и сообщений в соответствии с сигналами от других блоков и объектов и формирование соответствующих команд и сообщений (например, организация команд однофазного или трехфазного отключения в соответствии с информацией о виде КЗ, состоянии отдельных фаз выключателя, действия УРОВ, сигналов с противоположного конца линии); ускорение отключения

при включении линии на КЗ; блокирование отключения от отдельных функций при соответствующих внешних командах и т.д. Дополнительная гибкая программная логика, доступная пользователю, позволяет в необходимых случаях учесть специфику объекта и индивидуально конфигурировать ЦРЗ.

*Дополнительные функции ЦРЗ.* Необходимо выделить ряд дополнительных функций, обеспечивающих совместно с основными защитными функциями полноценное функционирование устройств ЦРЗ. К ним относятся, в первую очередь, следующие функции:

- определение расстояния до места повреждения;
- контроль исправности цепей переменного тока и напряжения;
- контроль исправности цепей отключения;
- измерение и фиксация электрических величин (токов, напряжений, сопротивлений, мощности, угла, частоты, температуры, симметричных составляющих) на входе ЦРЗ;
- статистическая обработка измерений.

*Программы обслуживания и интерфейса.* Данный блок программ обеспечивает запоминание и обмен информацией, необходимые для функционирования ЦРЗ. К нему относятся, прежде всего, следующие группы программ.

*Запись событий, сообщений, осциллограмм.* Обеспечиваются записи всех событий (изменений), происходящих в ЦРЗ, с фиксацией их по времени в том числе:

- возникновение неисправности (вид, время);
- эксплуатационные сообщения (например, ввод и вывод отдельных функций и всего ЦРЗ);
- возникновение определенных внешних команд и сигналов;
- возникновение повреждения;
- запись аналоговых и дискретных входных и выходных сигналов (сообщений) при повреждении.

*База данных (конфигурация ЦРЗ, параметры, уставки).* База данных содержит всю необходимую информацию, определяющую характеристики и режим работы ЦРЗ. К ним, в первую очередь, относятся, параметры, определяющие конфигурацию ЦРЗ (введенный объем функций и их взаимодействие); необходимые данные ЭС и защищаемого объекта; уставки и параметры отдельных функций, определяющие чувствительность и селективность ЦРЗ; объем и вид сообщений, генерируемых ЦРЗ; уставки вспомога-

ных функций (регистратор событий, контроль исправности устройства, измерение величин).

Уставки могут быть введены как пользователем непосредственно (через клавиатуру) или с помощью ПК и специальной обслуживающей программы, так и с более высокого уровня управления через системный интерфейс. Основные уставки содержат

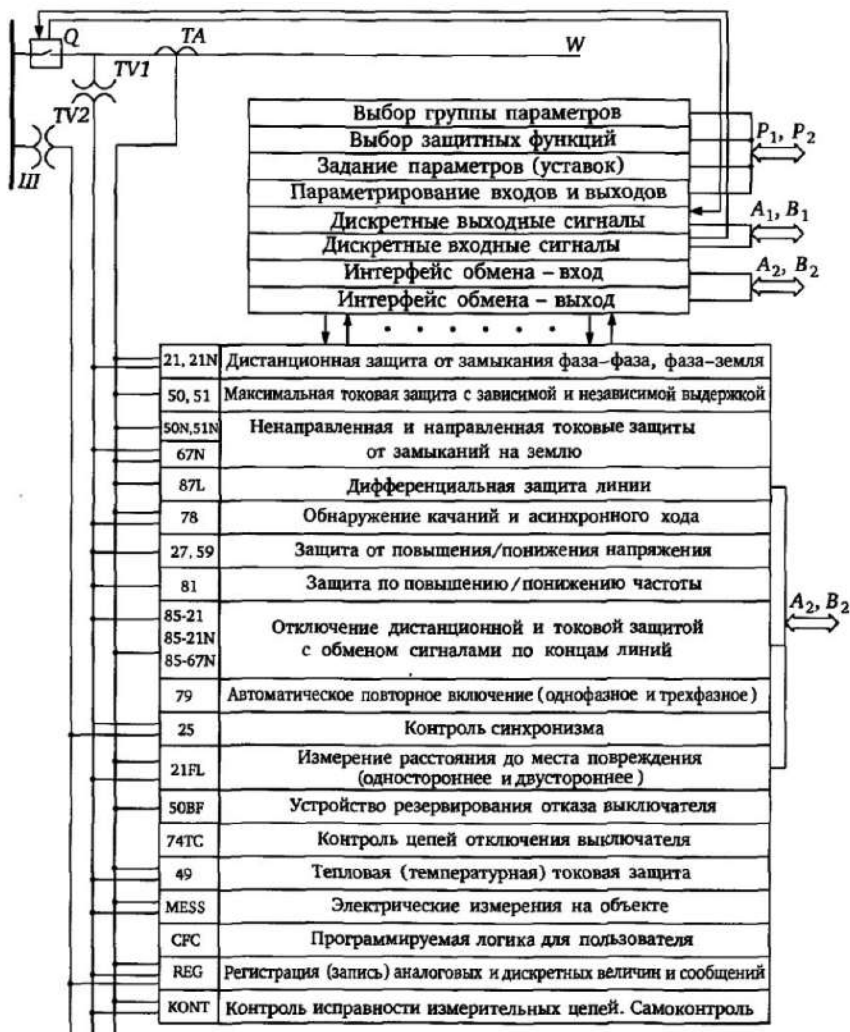


Рис. 8.2. Функциональная структура дифференциальной/дистанционной защиты 7SD52

ся в энергонезависимом устройстве памяти, что обеспечивает их сохранение после снятия питания с ЦРЗ и полное восстановление работоспособности после возобновления питания. Указанное относится и к сохранению основных сообщений и осциллограмм при перерывах питания ЦРЗ.

*Интерфейс ввода и вывода данных (сообщений).* Основной функцией данного интерфейса является связь пользователя (непосредственного и удаленного) с базой данных для считывания и ввода новых данных, а также передачи в необходимых случаях в базу данных информации для реализации защитных функций (например, сигналы с противоположного конца линии). Внутренний интерфейс обеспечивает непрерывный обмен информацией между базой данных и блоком программ защиты и автоматики ЦРЗ (см. рис. 8.1).

В качестве примера на рис. 8.2 приведена функциональная структура дифференциальной/дистанционной защиты ВЛ 7SD52 [9], включающая основные и дополнительные функции защиты и автоматики.

Там же показаны и основные потоки информации с учетом обозначений рис.1.1. Основные функции, используемые в защите, рассмотрены в гл. 4—7. Элементы автоматики и дополнительные функции ЦРЗ рассматриваются ниже.

## **8.2. Защита абсолютной селективности на основе обмена сигналами**

### **8.2.1. Общие соображения**

Основным недостатком ступенчатых защит является невозможность 100%-ного охвата защищаемой линии первой ступенью с минимальной выдержкой времени вследствие необходимости отстройки этой ступени от КЗ на соседней ВЛ. Особенности затруднения вызывает при этом защита коротких ВЛ, когда учет возможных погрешностей приводит к необходимости существенного сокращения зоны действия первой быстродействующей ступени.

Обмен информацией между защитами, установленными по концам защищаемой линии, о действии отдельных защитных функций позволяет осуществить быстродействующее отключение КЗ на всей линии, обеспечивая при этом абсолютную се-

лektivность (отсутствие срабатывания при КЗ соседних участках).

Данный обмен сигналами обеспечивается системой передачи сигналов, состоящей из передатчика команд (*Пер.*), приемника команд (*Пр.*), устанавливаемых по концам защищаемого объекта, и канала передачи, в качестве которого могут быть использованы проводные каналы, в том числе световоды, а также радио- и частотно-модулированные каналы. Ниже рассматриваются функционально основные виды (структуры) защит, использующие обмен сигналами. Данные функции являются обычно дополняющими функциями ступенчатых (дистанционной и токовой) защит ВЛ и используют сигналы, генерируемые защитами при возникновении КЗ.

### **8.2.2. Защиты на основе контроля приема отключающих сигналов**

В данном случае используются сигналы отключения, генерируемые направленными быстродействующими первыми зонами защит по концам линии. Эти зоны должны быть надежно отстроены от внешних КЗ на смежных линиях («за спиной» и на соседней линии, подходящей к противоположному концу). Эффективность защиты (отсутствие замедления при сохранении селективности) обеспечивается, если каждая их первых зон защит по концам линии охватывает с запасом более 50% линии, что обеспечивает взаимное перекрытие зон. Защита обеспечивается передачей отключающего сигнала первой зоны каждой защиты на противоположный конец. При перекрытии зон одна из защит всегда работает без замедления и передачей отключающего сигнала обеспечивает быстродействующее отключение КЗ на противоположной стороне. Для обеспечения надежности правильного отключения (предотвращения ложного срабатывания при возникновении помехи в канале передачи, соответствующей приходу отключающего импульса), отключение от приходящего импульса контролируется по факту пуска при КЗ отдельных органов защиты приемного конца. Возможный вариант защиты представлен на рис. 8.3 [9].

Отключающие сигналы формируются блоками  $Z1$ , фиксирующими нахождение  $Z$  в первой зоне защиты, передаются к защите противоположного конца передатчиками *Пер.* и принимаются приемниками *Пр.* Отключение контролируется сигналами от





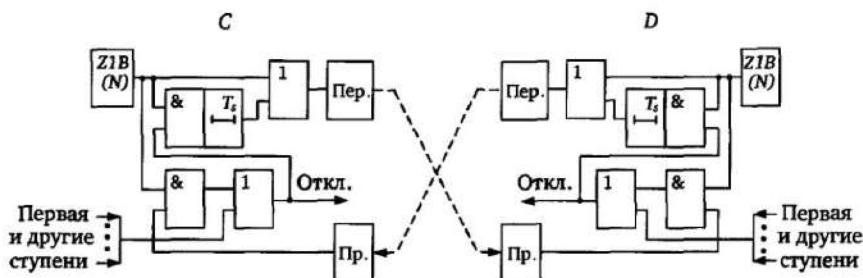


Рис. 8.5. Защита на основе обмена разрешающими сигналами

щей с запасом всю линию. Такой сигнал может быть сформирован дистанционной ступенью  $Z1B$  или органом направления мощности  $N$  (см. рис. 8.4).

Сигнал отключения на каждом из концов линии формируется только при приходе разрешающего сигнала с противоположной стороны, что соответствует направлению мощности на обоих концах от шин в линию, т.е. нахождению КЗ на линии. Рисунок 8.5 поясняет данное решение.

Отключение происходит при подведении к схеме И сигнала от направленного органа  $Z1B(N)$  и приходе разрешающего сигнала с противоположного конца. Блок продления передаваемого разрешающего сигнала на время  $T_z$  обеспечивает надежное срабатывание на противоположном конце ВЛ в случае, если передающий конец отключается быстрее, например, вследствие срабатывания первой ступени  $Z1$ . При этом продлевающий сигнал создается лишь при выработке команды на отключение защитой рассматриваемого конца ВЛ.

#### 8.2.4. Обеспечение правильного функционирования защит с разрешающим сигналом при «слабом» питании и коммутациях в ЭС

**Отключение при «слабом» питании.** Структура на основе разрешающих сигналов (см. рис. 8.5) функционирует при срабатывании направленных ступеней защит по обоим концам линии. В тоже время возможны случаи одностороннего питания и «слабого» питания, когда вследствие сравнительно большого сопротивления источника питания на одной из сторон ВЛ ток через защиту недостаточен для пуска отдельных ступеней. В этом

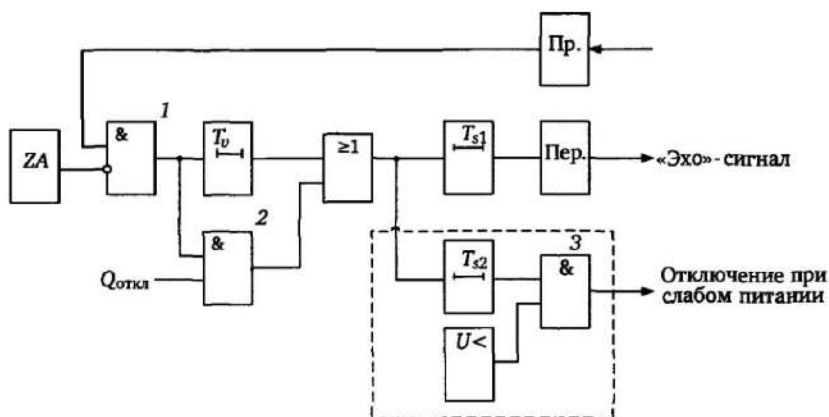


Рис. 8.6. Формирование разрешающего «эхо»-сигнала и сигнала отключения при «слабом» или одностороннем питании одного из каналов ВЛ

случае невозможно отключение защитой и на противоположном конце линии, где защита запущена, так как на стороне «слабого» питания не формируется разрешающий сигнал для передачи. Для обеспечения отключения в этом случае защитой на стороне «слабого» питания может быть сформирован разрешающий «эхо-сигнал», передаваемый на противоположный конец. Принцип формирования «эхо-сигнала» и цепи отключения на стороне слабого (отсутствующего) питания поясняет рис. 8.6 [9].

Наличие «слабого» питания фиксируется при этом приходом разрешающего сигнала от противоположной стороны с выхода блока *Пр.* и отсутствием пуска дистанционных ступеней защиты блок *ЗА*. В результате возникает сигнал на выходе схемы *И* (блок 1), который задерживается за время  $T_v$ , затем продлевается на время  $T_{s1}$  и через передатчик *Пер.* посылается на противоположную сторону (разрешающий сигнал), обеспечивая возможность отключения. Задержка по времени  $T_v$  необходима для того, чтобы исключить ложный «эхо»-сигнал в случае запаздывания блока *ЗА*, что особенно важно при внешних КЗ. Если же выключатель на стороне «слабого» питания отключен, то имеется сигнал  $Q_{откл}$ , фиксируемый в этом случае логической схемой *И* (блок 2), и задержка  $T_v$  в передаче «эхо»-сигнала на противоположную сторону устраняется. Затем сигнал продлевается на время  $T_{s1}$  и через передатчик передается на противоположную сторону.

Для отключения выключателя на стороне «слабого» питания также используется «эхо»-сигнал, продлеваемый на время  $T_{s2}$  при одновременном контроле напряжения (блок  $U<$ ). Контроль сниженного напряжения фиксирует факт «слабого» питания. Отдельный контроль напряжения каждой фазы позволяет в этом случае произвести отключения только поврежденной фазы.

Следует отметить, что рассмотренный принцип может быть использован только в случае, если при внешних КЗ на стороне «слабого» питания токи через защиту достаточны для ее пуска (блок  $Z_A$ ). В противном случае «эхо»-сигнал будет формироваться и при внешних КЗ, что не всегда допустимо.

**Динамическое блокирование защит с разрешающими сигналами.** Инерционность трактов передачи разрешающих сигналов может привести к неселективному отключению в случае коммутаций в ЭС, например, после отключения внешнего КЗ. В

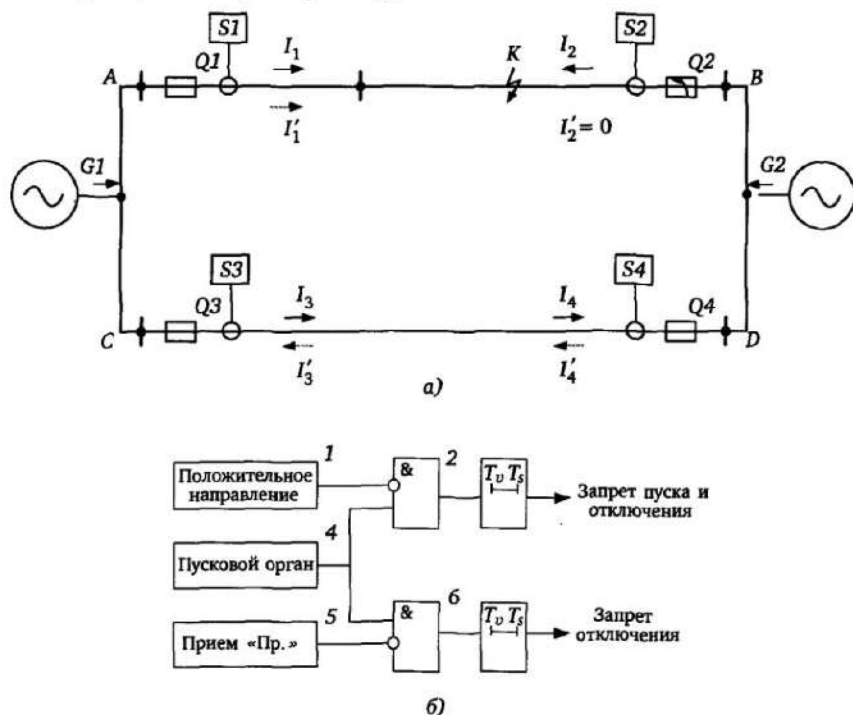


Рис. 8.7. Динамическое блокирование защиты на основе обмена разрешающими сигналами:  
 а — пример КЗ на одной из параллельных линий; б — формирование запрещающих сигналов

качестве примера на рис. 8.7,*а* показано распределение токов КЗ на параллельных линиях до отключения выключателей (сплошные линии) и после отключения выключателя  $Q_2$ , когда выключатель  $Q_1$  еще не отключился (пунктирные линии).

Указанное может происходить вследствие неодинаковости времени срабатывания защит или действия выключателей. Как видно из рис. 8.7,*а*, при отключении выключателя  $Q_2$  поврежденной линии  $AB$  происходит переориентация направления мощности на входах защит  $S_3$  и  $S_4$  неповрежденной линии  $CD$ . В результате этого вполне реален, например, случай, когда разрешающий сигнал от защиты  $S_3$  еще присутствует на приемном входе Пр. защиты  $S_4$  (см. рис. 8.5), в то время как орган  $Z1B$ , формирующий отключающий сигнал уже переориентировался в сторону срабатывания, что приводит к отключению выключателя  $Q_4$  неповрежденной линии.

Введение «динамической блокировки» (рис. 8.7,*б*) препятствует неправильному действию защит в подобных случаях коммутаций в ЭС. При этом логическими блоками И 2 и 6 фиксируется при запуске пускового органа соответственно отсутствие положительного направления при КЗ и отсутствие разрешающего сигнала с противоположной стороны. Затем, с выдержками времени  $T_{в}$ , необходимыми для отстройки от возможных замедлений в измерении при КЗ в положительном направлении, происходит запрет на время  $T_з$  пуска разрешающего сигнала и запрет отключения. Таким образом, при дальнейшей переориентировке защиты ее действие на время  $T_з$  блокируется.

### **8.2.5. Защиты на основе обмена блокирующими сигналами**

**Непосредственный обмен блокирующими сигналами.** Функционирование данного распространенного способа построения защиты абсолютной селективности основано на следующих моментах.

В каждой из защит по концам линии имеется чувствительный пусковой орган, запускающийся при внешних КЗ (блок 8 на рис. 8.8,*а*).

Вариант характеристик пускового органа (характеристики 2 и 2' соответственно для защит на сторонах  $C$  и  $D$  линии) приведен на рис. 8.8,*б*. При срабатывании пускового органа происходит запуск передатчика 7, посылающего блокирующий сиг-

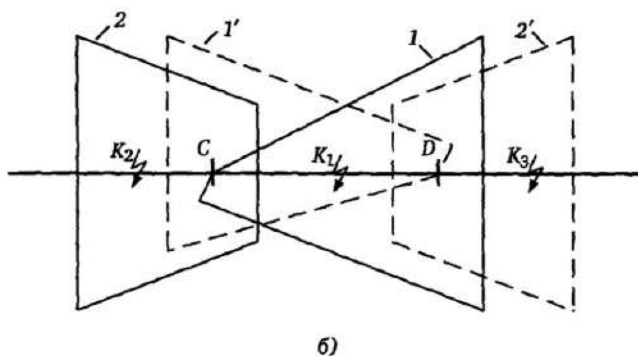
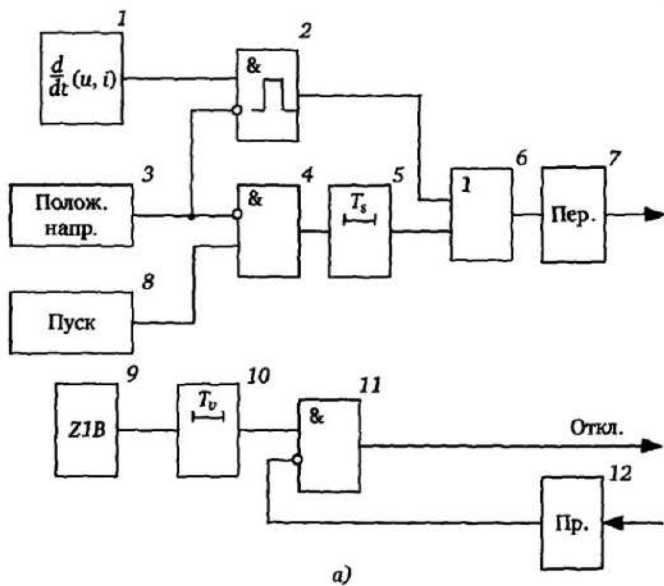


Рис. 8.8. Защита на основе обмена блокирующими сигналами (один из концов линии):

а — структурная схема; б — зоны действия отключающих (1, 1') и пусковых (2, 2') органов

нал, препятствующий отключению защитой с противоположной стороны линии (логическая схема И, блок 11).

При КЗ  $K_1$  в зоне действия (рис. 8.8, б), блок 3 выявления направления мощности блокирует запуск передатчика, т.е. блокирующий сигнал на противоположную сторону не приходит. Отключающий орган ZIB, имеющий направленную характеристи-

ку срабатывания, охватывающую линию (характеристики 1 и 1' на рис. 8.8,б), срабатывает и обеспечивает отключение КЗ. При внешнем КЗ на стороне, где направление мощности отрицательно (от линии к шинам), отсутствует блокировка от блока 3, запускается блок 8 и передатчиком 7 формируется блокирующий сигнал на противоположную сторону. Отключение на рассматриваемой стороне не происходит ввиду того, что блок 9 (Z1B) имеет направленную характеристику и не генерирует отключающего сигнала. При этом передатчики запускаются по факту отсутствия положительного направления при КЗ. Наличие положительного направления мощности на противоположной стороне фиксируется отсутствием сигнала от приемника 12.

Достоинством данного способа обеспечения абсолютной селективности является независимость действия защиты от качества передачи сигнала при КЗ на линии в случае, если прохождение сигналов на линии затрудняется повреждением линии в месте КЗ. Указанное обусловлено отсутствием необходимости передачи (приема) сигналов при КЗ на защищаемой линии для обеспечения отключения при использовании данного способа срабатывания. Однако отсутствие запуска передатчика при внешнем КЗ ведет к неселективному срабатыванию защиты. Поэтому для обеспечения необходимой селективности пусковой орган 8 должен быть таким образом согласован с отключающим блоком 9 на противоположном конце линии, чтобы обеспечить с запасом пуск передатчика при внешних КЗ, сопровождающихся запуском блока 9.

Дополнительно для повышения надёжности несрабатывания при внешних КЗ использованы:

- блок 1 запуска передатчика по факту изменения тока или напряжения, формирующий ограниченный по времени импульс запуска, блокируемый сигналом от блока 3 по факту фиксации положительного направления;
- блок 5 расширения блокирующего импульса;
- блок 10 замедления отключающего импульса на время  $T_{\text{в}}$ , обеспечивающий отсутствие срабатывания при внешних КЗ в случае запаздывания прихода блокирующего импульса с противоположной стороны вследствие запаздывания срабатывания пускового органа и замедления, вносимого каналом передачи.

**Обмен деблокируемыми сигналами.** Недостатком описанного выше принципа с обменом блокирующими сигналами явля-

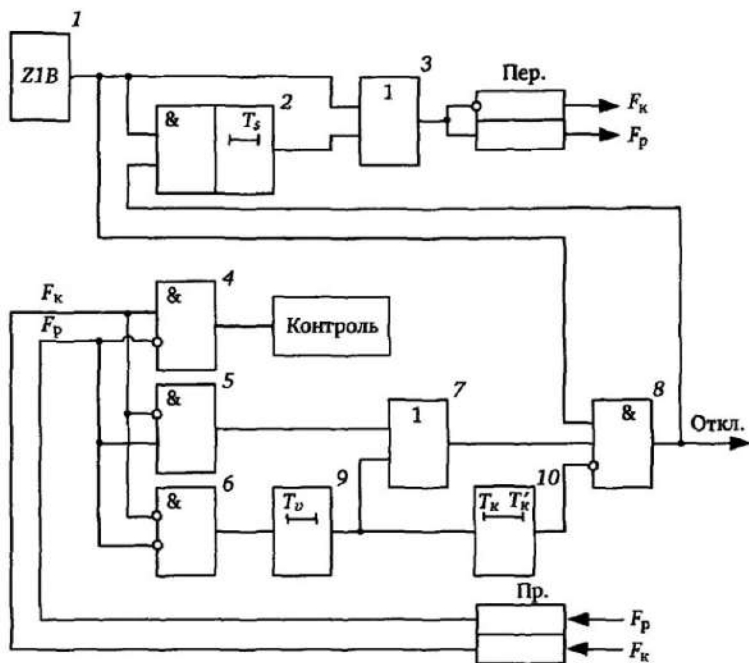


Рис. 8.9. Защита на основе обмена деблокирующими сигналами (один из концов ВЛ)

ется отсутствие какого-либо сигнала в линии в нормальном режиме, что не дает возможности контроля состояния канала обмена сигналами. Обмен деблокируемыми сигналами [8,9] предполагает наличие в канале связи в нормальном режиме сигнала частотой  $F_k$  для контроля состояния канала передачи, который при КЗ переключается на частоту  $F_p$  (рис. 8.9).

Сигналом  $F_p$  обеспечивается разрешение отключения. Кратковременное отсутствие обоих сигналов при одновременном запуске пускового органа свидетельствует о КЗ на линии, сопровождаемом подавлением в месте КЗ передаваемых сигналов. В этом случае формируется кратковременный отключающий импульс.

Структура рис. 8.9 поясняет основные элементы данного принципа. В нормальном режиме, при отсутствии запуска направленной ступени  $ZIB$ , охватывающей с запасом защищаемую линию, передатчик *Пер.* генерирует сигнал  $F_k$  контрольной частоты, который принимается приемником и через логический

элемент 4 обеспечивает сигнализацию исправности канала передачи *Контроль*. При возникновении КЗ (срабатывание *Z1B*) передатчик *Пер.* переключается на другую частоту и генерирует сигнал  $F_p$ , принимаемый приемником, что приводит к переключению логического элемента 5 и выработке сигнала отключения *Откл.* логическим элементом 8.

При возникновении КЗ на линии, сопровождающемся подавлением передаваемых сигналов в месте КЗ, сигнал  $F_p$  передается, но на входе приемника *Пр.* он отсутствует. Указанное приводит к переключению логического элемента 6. В результате с небольшой задержкой  $T_v$ , формируемой элементом 9, через элемент 10 формируется кратковременный сигнал отключения длительностью  $T_k$ , после чего происходит блокирование отключающей цепи до нового появления разрешающего сигнала  $F_p$ . В этом случае блокирование снимается с выдержкой времени на возврат  $T'_k$  элемента 10. При внешнем КЗ отключения не происходит ввиду отсутствия срабатывания ступени *Z1B* на одном из концов линии. Элемент 2 необходим для продления посылаемого сигнала на время  $T_s$ , обеспечивая надежное отключение на противоположном конце ВЛ. Данная структура обеспечивает как быстрое отключение при КЗ в зоне, так и контроль канала передачи сигналов.

### **8.2.6. Токовые направленные защиты абсолютной селективности**

Все рассмотренные выше принципы могут быть использованы в направленных токовых защитах, прежде всего в токовых защитах нулевой последовательности. В частности, использование измерительных органов тока и напряжения нулевой последовательности в совокупности с органом направления мощности нулевой последовательности позволяет выявить направление мощности при КЗ на землю на линии и вне её и отстроится от возможных небалансов в режимах нагрузки. При этом возможно использование рассмотренных выше принципов обмена разрешающими, блокирующими и деблокирующими сигналами.

### **8.3. Автоматическое повторное включение**

Большинство КЗ на ВЛ является переходными, связанными с атмосферными влияниями. Дуговые перекрытия, возникающие



при этом, не приносят существенных повреждений и ущерба, если линия будет сразу же отключена на время, достаточное для деионизации пути прохождения электрической дуги (воздушно-го промежутка), а затем снова включена. Мероприятия, необходимые для осуществления указанного (отключение ВЛ — пауза — повторное включение), могут осуществляться в виде одного или нескольких циклов и носят соответственно название однократного или многократного автоматического повторного включения (АПВ). На линиях с пофазным отключением выключателей применяют однофазное АПВ, когда выявляется и отключается поврежденная фаза, а затем через определенный промежуток времени включается снова.

Минимальное время бестоковой паузы, необходимое для деионизации пути электрической дуги, увеличивается с ростом номинального напряжения линии и составляет ориентировочно 0,3—0,5 с для трехфазного АПВ и 0,4—2,0 с для однофазного АПВ (ОАПВ). При этом, согласно статистике, примерно 85% всех КЗ, сопровождающихся электрической дугой, успешно устраняются самостоятельно после отключения релейной защитой, и после повторного включения энергоснабжения восстанавливается (успешное АПВ). Случаи, когда после повторного включения выявляется, что КЗ не устранилось и ВЛ снова отключается релейной защитой, соответствуют *неуспешному АПВ*. После одного или нескольких циклов неуспешного АПВ происходит окончательное отключение ВЛ.

**Критерии запуска АПВ.** Исходя из назначения функции АПВ, пуск АПВ происходит при фиксации возникновения КЗ на ВЛ. При этом критерием пуска может являться возникновение команды на отключение выключателя или же отключение выключателя, фиксируемое состоянием его вспомогательных контактов.

Дополнительное качество, повышающее эффективность АПВ, можно получить, фиксируя не только отключение выключателя, но и выдержку времени, с которой возникшее КЗ было устранено (выдержку времени между пуском защиты и командой отключения). Указанное определяется тем, что вероятность устранения КЗ (погасания электрической дуги во время бестоковой паузы АПВ) тем больше, чем быстрее отключается линия, т.е. меньше время для разгорания дуги и увеличения ионизации окружающего дугу пространства. С учетом изложенного, це-

лесообразен контроль времени  $t_k$  существования КЗ — промежутка времени между пуском защиты и командой отключения. При этом, если  $t_k \leq T_k$ , где  $T_k$  — уставка контроля времени существования КЗ, то АПВ может быть разрешено, а при  $t_k > T_k$  происходит запрет АПВ после отключения КЗ, так как успешное АПВ маловероятно.

**Длительность бестоковой паузы.** АПВ в общем случае может обеспечивать несколько циклов с различными длительностями бестоковых пауз  $T_n$ . С увеличением длительности  $T_n$  растет вероятность успешного включения линии в цикле АПВ. Учитывая, что чем больше время существования КЗ  $t_k$ , тем больше должна быть бестоковая пауза АПВ для обеспечения деионизации, возможно наличие одновременно нескольких уставок  $T_k$  по времени существования КЗ, соответствующих циклам АПВ с различными длительностями  $T_n$  бестоковых пауз. При этом в зависимости от значения  $t_k$  автоматически осуществляется переход к циклу АПВ с соответствующей бестоковой паузой  $T_n$ . Для устройств, имеющих функции однофазного и трехфазного АПВ, допустимые времена существования КЗ  $T_k$  для отдельных циклов и длительности бестоковых пауз, а также число циклов в общем случае могут быть различными в зависимости от вида КЗ, определяющего однофазное или трехфазное отключение.

**Времена возврата и блокирования АПВ.** Каждый цикл АПВ состоит из отключения, бестоковой паузы и включения выключателя. После генерации команды включения «Вкл.» возможны два состояния — успешное включение (самоустранение КЗ в предыдущем состоянии) или включение линии на КЗ, которое может отключиться защитой как мгновенно, так и с выдержкой времени  $t_k$ . Поэтому необходима фиксация предельного времени  $T_b$  контроля включения после генерации устройством команды включения «Вкл.», позволяющего определить, успешно данное включение или нет. Указанное означает, что если после генерации сигнала включения защита не фиксирует наличие КЗ в течение времени  $t_b \leq T_b$ , то произошло успешное АПВ и дальнейшие циклы АПВ прекращаются. В этом случае после истечения времени  $T_b$  контроля включения АПВ приходит в исходное состояние, и последующее срабатывание РЗ фиксируется как новое КЗ. Если же в течение времени  $t \leq T_b$  происходит действие РЗ, то включение воспринимается как неуспешное и осуществляется переход к новому (последующему) циклу АПВ. Срабаты-

вание же защиты в заключительном цикле АПВ при  $t \leq T_{\text{в}}$  воспринимается как неуспешная результирующая операция АПВ, в результате чего формируется команда «Окончательное отключение». После этой команды новые циклы АПВ блокируются на заданное время  $T_{\text{с}}$ , после истечения которого АПВ снова готово к действию.

В необходимых случаях возможно блокирование функции АПВ или отдельных ее циклов от внешних сигналов. В частности, появление команды отключения от РЗ при ручном включении свидетельствует о включении на устойчивое КЗ, при котором АПВ неэффективно. Поэтому в этом режиме АПВ может быть заблокировано на заданное время  $T_{\text{запр}}$  и при отключении от защиты, возникшем в течение времени  $t \leq T_{\text{запр}}$ , формируется команда «Окончательное отключение».

**Контроль готовности включения при АПВ.** В устройствах АПВ, особенно многократного, силовые выключатели подвергаются значительным нагрузкам и должны быть готовы к проведению последующих циклов отключения и включения. Поэтому как при однократном, так и особенно при многократном АПВ необходимо контролировать готовность выключателя (например, давление воздуха или сжатие пружины) к дальнейшему функционированию. С учетом этого целесообразно вводить в защиту информацию о готовности выключателя (через внешний дискретный вход). При отсутствии готовности выключателя последующие циклы АПВ должны запрещаться. При этом время бестоковой паузы  $T_{\text{п}}$  может быть увеличено автоматически, если к его истечению сигнал готовности не пришел. Это увеличение ограничивается предельным значением, после которого осуществляется запрет АПВ.

**Требования к РЗ в части функционирования АПВ.** На линии с двухсторонним питанием погасание электрической дуги и успешное повторное включение может произойти лишь при быстром отключении линии с двух сторон. Указанное может быть обеспечено селективно лишь защитами с абсолютной селективностью. При ступенчатых защитах ВЛ данное требование не выполняется, так как зона  $Z1$  с целью обеспечения селективности не полностью охватывает линию. Для обеспечения эффективности функционирования АПВ требующей быстрого отключения ВЛ с обоих концов, в дистанционных защитах идут во многих случаях на частичную потерю селективности в первом цик-

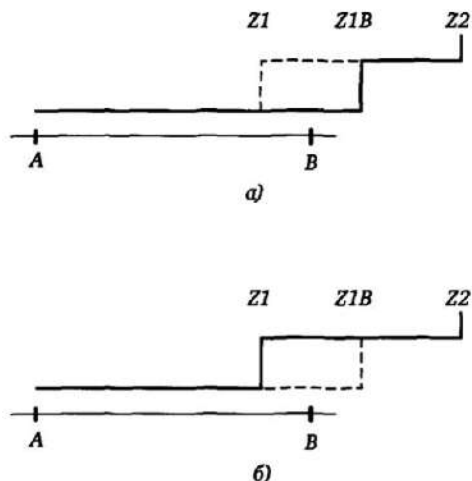


Рис. 8.10. Уставки РЗ перед первым (а) и последующими выключениями (б) по команде АПВ

ле, имея в виду, что при повторном включении ВЛ селективность снова обеспечивается. Указанное поясняет рис. 8.10.

При введенной функции АПВ направленные первые ступени защит на концах А и В имеют вместо зоны  $Z1$  зону  $Z1B$ , с запасом охватывающую линию АВ (рис. 8.10,а). Указанное обеспечивает при возникновении КЗ на линии АВ быстрое отключение ее с обоих концов. Во время бестоковой паузы уставки первых зон защит переключаются с  $ZB1$  на  $Z1$  (рис. 8.10,б), что обеспечивает необходимую селективность при неуспешном повторном включении на неустранённое КЗ.

Таким образом, если КЗ произошло в начале соседней линии (внешнее КЗ), в первом цикле АПВ линия АВ отключится неселективно но после повторного включения останется в работе. Указанное ухудшение селективности в первом цикле АПВ компенсируется эффективностью АПВ при КЗ на защищаемой линии. Селективность автоматически восстанавливается, если по каким-либо причинам функция АПВ выведена или заблокирована.

При выполнении защиты абсолютной селективности на основе обмена сигналами (см. §8.2), обеспечивающей быстрое отключение ВЛ с обоих концов, расширения зоны первой ступени до размера  $Z1B$  не требуется.

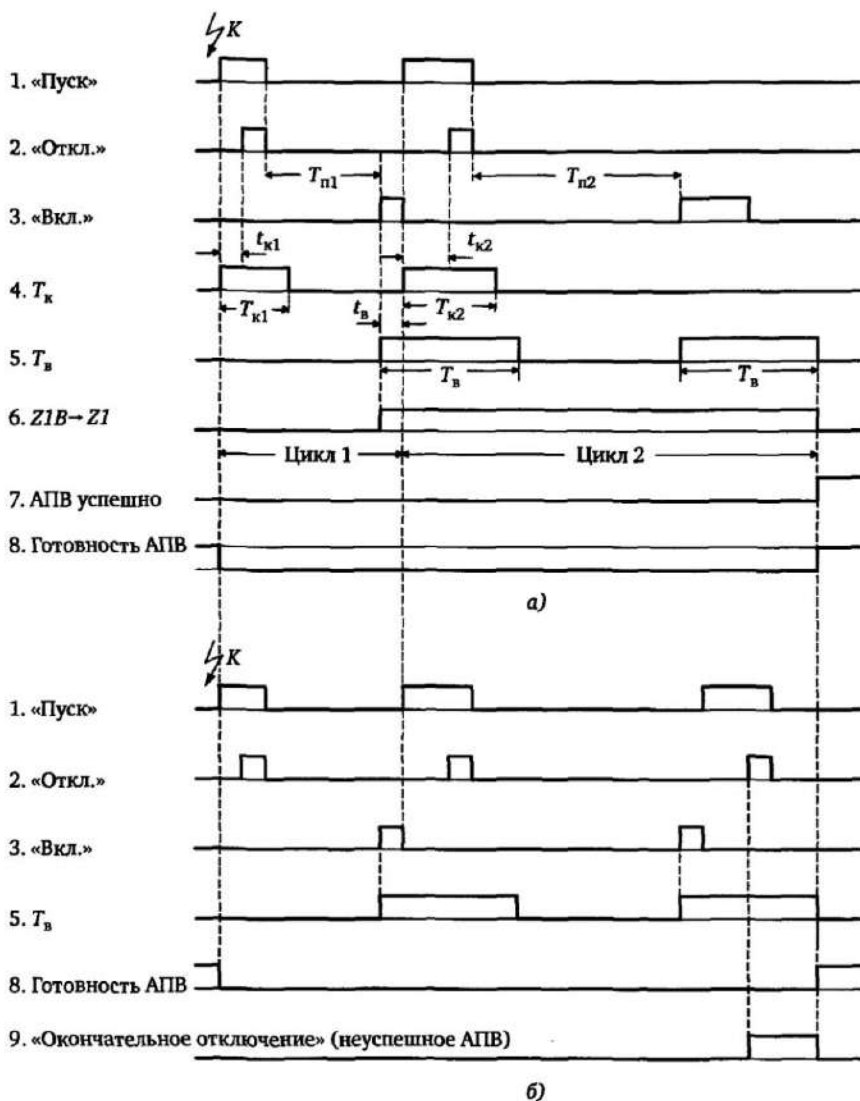


Рис. 8.11. Упрощенные диаграммы сигналов двукратного АПВ:  
 а — успешное АПВ; б — неуспешное АПВ

Рисунок 8.11 поясняет функционирование АПВ на примере двукратного АПВ [9].

Запуск АПВ происходит от сигнала «Пуск», генерируемого защитой при возникновении КЗ. Одновременно стартует выдержка времени  $T_{к1}$  контроля времени существования КЗ (сигнал 4).

Предпосылкой для пуска АПВ является отсутствие входных блокирующих сигналов и готовность выключателя. Если отключающий сигнал защиты 2 приходит до истечения времени  $T_{к1}$ , то при отключении выключателя (возврате сигнала «Пуск») стартуется выдержка времени  $T_{п1}$  первой бестоковой паузы. По истечении времени  $T_{п1}$  формируется сигнал 3 включения выключателя. Одновременно для обеспечения селективности происходит переключение уставки первой зоны дистанционной защиты с  $Z1B$  на  $Z1$ , поясняемое рис. 8.10 (сигнал 6), и старт элемента времени контроля включения  $T_{в}$  (сигнал 5), необходимого для фиксации успешности (неуспешности АПВ).

В данном случае в бестоковую паузу КЗ не устранилась, в результате чего при включении на КЗ (сигнал 3) возникают повторные сигналы 1, 2 пуска и отключения. При этом вследствие переключения зон сигнал отключения от защиты может произойти с выдержкой действия второй ступени  $Z2$ , если КЗ находится вне зоны действия  $Z1$ . Если при этом время отключения  $t_{к2}$  меньше времени  $T_{к2}$  (сигнал 4) контроля существования КЗ во втором цикле, то после повторного отключения стартуется бестоковая пауза  $T_{п2}$  второго цикла (сигнал 2).

После истечения времени  $T_{п2}$  происходит новое включение (сигнал 3). В данном случае рассматривается успешное АПВ во втором цикле, т.е. КЗ устранилось во время второй бестоковой паузы и отключающего сигнала защита не генерирует. В момент второго повторного включения снова стартуется выдержка времени  $T_{в}$  контроля успешности включения (сигнал 5). Так как отключения в течение набора выдержки  $T_{в}$  не происходит, то по истечении времени  $T_{в}$  генерируется сигнал 7 успешности АПВ и сигнал 8 готовности АПВ к новому пуску.

Рисунок 8.11,б поясняет функционирование АПВ в рассматриваемом случае, если при повторном включении во втором цикле КЗ не устранилось (неуспешное АПВ). Так как рассматривается двукратное АПВ, то второй цикл является последним. После повторного включения на неустранившееся КЗ во втором цикле возникает сигнал 2 отключения, после чего фиксируется неуспешное АПВ и новых циклов не проводится. По истечении выдержки времени контроля успешности включения  $T_{в}$ , запускаемой по команде включения, АПВ снова готово к пуску (сигнал 8).

## 8.4. Контроль синхронизма при включении ВЛ

Коммутации в ЭС с соединением (подключением) элементов (например, объединение частей ЭС при подключении ВЛ или подключении генератора) связаны с возможностью протекания значительных уравнительных токов, обусловленных неодинаковостью напряжений, фаз и частот объединяемых частей ЭС. Указанное может привести как к потере устойчивости, так и к повреждениям отдельных подключаемых объектов. Функция контроля напряжений коммутируемых элементов и условий синхронизма обеспечивает при включении отсутствие больших уравнительных токов и сохранение стабильности сети. Рисунок 8.12 поясняет структуру контроля напряжений и синхронизма при включении на примере подключения линии к шинам с помощью выключателя линии  $Q$ .

В основу контроля положена оценка параметров напряжения линии и шин, подводимых соответственно от трансформаторов напряжения  $TV1$  и  $TV2$ . Запуск данной функции происходит при возникновении запроса на включение (команда от АПВ, ручное включение или команда от внешних систем управления). В зависимости от свойств ЭС и требований к коммутируемым элементам могут быть выбраны различные виды контроля включения. К ним, в первую очередь, относятся следующие.

**Включение при выполнении условий синхронизма** происходит при одном или нескольких из следующих условий:

- напряжение линии  $U_L$  не должно выходить за заданные пределы  $U_{Lmin}$ ,  $U_{Lmax}$ ;



Рис. 8.12. Структура контроля напряжений и синхронизма при включении

- напряжение шин  $U_{\text{ш}}$  не должно выходить за заданные пределы  $U_{\text{ш min}}, U_{\text{ш max}}$ ;
- разность напряжений  $|\underline{U}_{\text{л}} - \underline{U}_{\text{ш}}|$  не должна превышать заданное значение  $\Delta U$ ;
- разность частот напряжений шин и линии не должна превышать по абсолютному значению заданного значения  $\Delta f$ ;
- разность фаз векторов напряжений шин и линии не должна по абсолютному значению превышать заданного значения  $\Delta \varphi$ .

**Включение при асинхронных условиях.** В данном случае проверяются те же условия, что и при проверке синхронизма за исключением контроля угла сдвига  $\Delta \varphi$ . При выполнении указанных условий с учетом измеренной разности частот и известного собственного времени включения выключателя устройство рассчитывает момент подачи команды включения, при которой контакты выключателя замыкаются в момент примерного равенства фаз напряжений линии и шин.

**Упрощенное включение при контроле значений напряжений шин или линии** может в зависимости от требований выполняться при одном из следующих условий:

- наличие напряжения на линии ( $U_{\text{л min}} \leq U_{\text{л}} \leq U_{\text{л max}}$ ) и отсутствие напряжения на шинах ( $U_{\text{ш}} < U_{\text{ш min}}$ );
- наличие напряжения на шинах ( $U_{\text{ш min}} \leq U_{\text{ш}} \leq U_{\text{ш max}}$ ) и отсутствие напряжения на линии ( $U_{\text{л}} < U_{\text{л min}}$ );
- отсутствие напряжения на линии ( $U_{\text{л}} \leq U_{\text{л min}}$ ) и на шинах ( $U_{\text{ш}} < U_{\text{ш min}}$ ).

Во всех приведенных выше условиях включения контролируется также нахождение частоты каждого из напряжений в заданном диапазоне.

Дополнительно может контролироваться время выполнения запроса на разрешение включения. Указанное означает, что при задержке выполнений условий включения (при превышении заданного предельного времени выполнений условий включения  $T_{\text{пред}}$ ) происходит возврат функции в исходное состояние. Её запуск возможен лишь при возобновлении запроса на разрешение включения от функций АПВ и управления.



## 8.5. Устройства резервирования отказа выключателя

**Принцип функционирования.** Одним из возможных видов аварий в ЭС является отказ силового выключателя — неспособность выключателя разомкнуть свои контакты при КЗ по сигналу отключения от защиты. Это может произойти вследствие неисправности электрической части управления выключателем или вследствие механических неисправностей. В этом случае ток КЗ будет протекать дальше после команды отключения. Изолировать место КЗ от источников питания в этом случае можно лишь с помощью других выключателей близлежащих объектов, которые должны быть отключены по возможности быстрее. Команда на отключение других выключателей формируется функцией резервирования отказа выключателей, традиционно называемой устройством резервирования отказа выключателя (УРОВ), входящей в комплект защиты поврежденного выключателя. Принцип функционирования УРОВ основан на следующем. Отказ выключателя фиксируется по факту наличия тока через некоторое время после подачи команды на отключение выключателя или по отсутствию изменения положения вспомогательного контакта выключателя после этой команды. Указанное поясняет рис. 8.13, на котором рассмотрено действие УРОВ при КЗ в точке  $K_1$  на линии, подключенной к сборным шинам А по

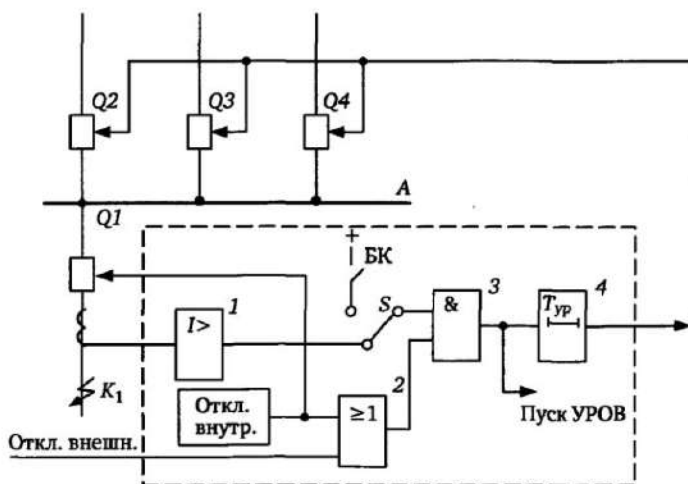


Рис. 8.13. Принцип функционирования УРОВ

средствам выключателя  $Q1$ , и последовавшем отказе этого выключателя.

Одним из необходимых элементов функции УРОВ является контроль состояния выключателя (включен или отключен). Этот контроль осуществляется по факту наличия тока (элемент  $I>$ ) или по положению вспомогательного контакта выключателя БК. Так как действие УРОВ происходит при КЗ, то контроль тока выключателя в большинстве случаев возможен (за исключением замыканий на землю в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью и повреждений, не связанных с протеканием тока). Переключатель  $S$  на рис. 8.13 обеспечивает возможность выбора между режимами контроля протекания тока и контроля вспомогательного контакта выключателя.

При КЗ  $K_1$  на защищаемом присоединении защита объекта формирует сигнал отключения *Откл. внутр.*, который подает команду на отключение выключателя  $Q1$ . Одновременно этот сигнал фиксируется схемой УРОВ и подводится через элемент 2 ИЛИ к логическому элементу 3 И. На второй вход элемента И подводится сигнал, фиксирующий состояние выключателя, и при еще не отключенном выключателе  $Q1$  элемент И формирует сигнал *Пуск УРОВ*, запускающий элемент задержки 4 с уставкой выдержки времени  $T_{ур}$ . Если по истечении времени  $T_{ур}$  выключатель не отключился, что свидетельствует о его повреждении, то элемент выдержки времени формирует команды отключения на все присоединения, через которые ток подтекает к месту КЗ. При отключении выключателя  $Q1$  ранее, чем истечет время  $T_{ур}$ , схема приходит в исходное состояние вследствие исчезновения сигнала на выходе элемента  $I>$  или изменения состояния вспомогательного контакта БК. Аналогично функционирует устройство, если команда отключения выключателя сформирована другим устройством защиты или автоматики (в этом случае пуск УРОВ обеспечивается внешним сигналом *Откл. внешн.*).

**Контроль достоверности сигналов.** Как видно из вышеуказанного, неправильное действие УРОВ может привести к тяжелым последствиям вследствие того, что УРОВ может действовать на отключение одновременно многих объектов ЭС. В то же время к действию УРОВ может привести, например, возникновение ложных сигналов команды на отключение или неправильного контроля состояния выключателя. В связи с этим необхо-

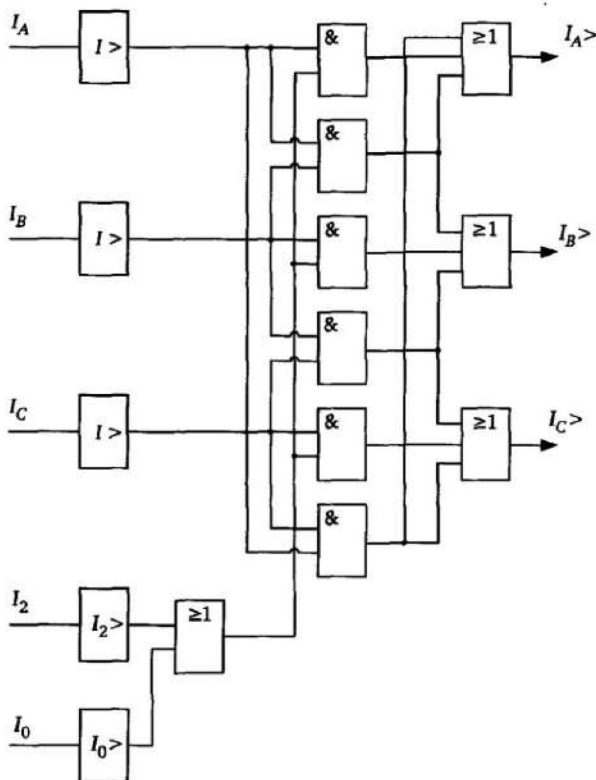


Рис. 8.14. Контроль достоверности протекания тока отдельных фаз

димо принятие специальных мер по контролю достоверности сигналов пуска УРОВ.

В частности, на рис. 8.14 показан вариант контроля состояния отдельных фаз выключателя при выполнении пофазного УРОВ для выключателей с пофазным управлением [9].

Сигналы  $I_A >$ ,  $I_B >$ ,  $I_C >$ , характеризующие соответственно состояния фаз А, В, С выключателя, возникают лишь при совпадении двух критериев, одним из которых является превышение током в соответствующей фазе значения уставки  $I >$ , а другим независимым критерием является при несимметричных повреждениях наличие составляющей  $I_2$  или  $I_0$ . При симметричных (трехфазных) повреждениях дополнительным критерием является превышения током другой фазы значения  $I >$ . Упрощенная схема УРОВ для выключателя с пофазным управлением приведена на рис. 8.15.

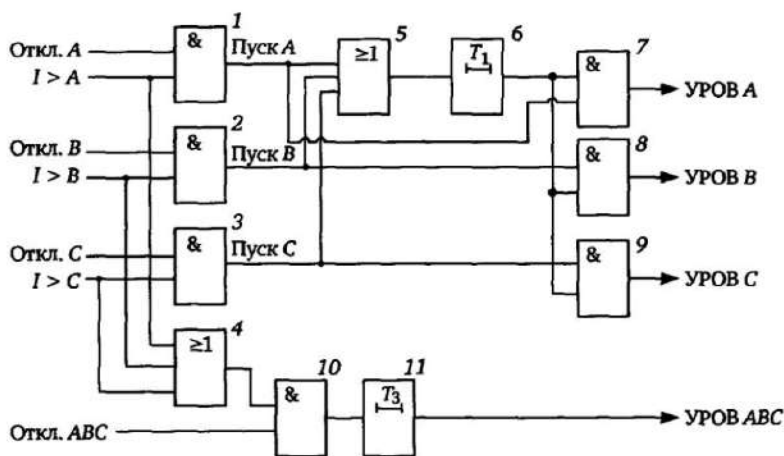


Рис. 8.15. Функционирование УРОВ при однофазном управлении выключателем

Элементы 1, 2, 3 обеспечивают пофазный пуск УРОВ в случае фиксации включенного состояния соответствующей фазы выключателя (например, на основе схемы рис. 8.14) и формирования защиты сигнала отключения соответствующей фазы (Откл. А, Откл. В, Откл. С). При запуске УРОВ любой из фаз, элемент 5 ИЛИ обеспечивает запуск элемента выдержки времени  $T_1$  УРОВ при однофазных отключениях. При формировании защиты команды отключения трех фаз Откл. ABC запуск элемента выдержки времени УРОВ при трехфазных отключениях  $T_3$  обеспечивается, если зафиксировано протекание тока хотя бы в одной из фаз выключателя (элементы 4 и 10).

**Минимальная задержка отключения при пуске УРОВ.** При фиксации неисправности выключателя желательно для снижения ущерба от повреждения по возможности быстрее сформировать команду УРОВ на отключение других выключателей. С другой стороны, необходимо с надежностью отстроится от неправильного действия УРОВ при исправном выключателе, что могло бы произойти вследствие установки слишком малой уставки выдержки времени УРОВ  $T_{yp}$  (рис. 8.16). Рассмотрим условия, определяющие минимально допустимое время задержки УРОВ  $T_{yp}$ .

На рис. 8.16 показаны:  $i$  — ток КЗ через выключатель Q при возникновении КЗ в момент  $t = 0$ ;  $PЗ$  — сигнал команды на от-

ключение выключателя  $Q$  от релейной защиты;  $Q$  — состояние контактов выключателя ( $1$  — замкнутое положение);  $I >$  — сигнал на выходе блока измерителя тока УРОВ, фиксирующего состояния выключателя;  $\text{Пуск УРОВ}$  — сигнал запуска элемента выдержки времени УРОВ.

После возникновения КЗ в момент  $t_1$  формируется сигнал отключения выключателя от релейной защиты, и одновременно формируется сигнал  $\text{Пуск УРОВ}$ . Отключение выключателя (размыкание контактов) происходит через время действия выключателя  $\Delta t_Q$  в момент  $t_2$ .

В момент  $t_2$  ток  $I$  исчезает, однако сигнал  $\text{Пуск УРОВ}$  продолжает существовать промежуток времени  $\Delta t_{\text{возвр}}$ , определяемый временем возврата элемента измерения тока  $I >$ , и заканчивается в момент  $t = t_3$ . С учетом изложенного, для надежной отстройки УРОВ от неправильного действия время задержки УРОВ  $T_{\text{уп}}$  должно соответствовать соотношению

$$T_{\text{уп}} \geq \Delta t_Q + \Delta t_{\text{возвр}} + \Delta t_{\text{зап}},$$

где  $t_{\text{зап}}$  — время запаса.

При этом предполагается, что время возврата релейной защиты больше, чем время возврата элемента  $I >$ . Если же это условие не выполняется, то определяющим является время воз-

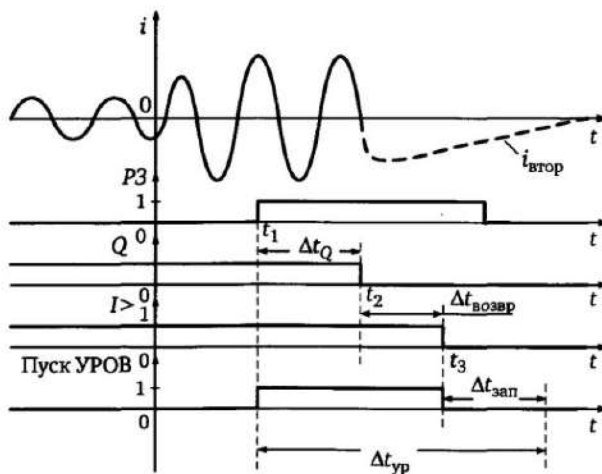


Рис. 8.16. К оценке необходимого минимального времени задержки УРОВ

врата защиты. С учетом изложенного, выдержка времени УРОВ зависит от времен возврата элемента контроля тока  $I >$  и устройства защиты. Необходимо учитывать, что при отключении тока во вторичной цепи трансформаторов тока могут возникнуть апериодические составляющие переходного процесса, вызванные индуктивностью трансформаторов тока (пунктир  $i_{\text{втор}}$  на рис. 8.16).

Указанное может привести к увеличению времени возврата измерителя тока УРОВ и необходимости соответствующего увеличения выдержки времени УРОВ. Для избежания этого алгоритмы измерения тока в элементе УРОВ должны обеспечить быстрый возврат также и в случае наличия апериодических составляющих в измеряемом вторичном токе.

## Глава 9

# Элементы цифровой защиты электрических машин

### 9.1. Защита статора от сверхтоков

Протекание больших токов, вызванных внутренними или внешними КЗ, может вызвать при несвоевременном отключении не только повреждение обмоток статора, но и конструктивные разрушения элементов вращающихся электрических машин, определяемые возникающими механическими усилиями. Поэтому защитой от сверхтоков КЗ должно обеспечиваться быстрое отключение объекта. Основными видами защит при этом являются токовые, дифференциальные и в ряде случаев дистанционные защиты. Конкретный выбор вида защиты зависит от мощности, типа и назначения электрической машины.

#### 9.1.1. Продольная дифференциальная защита при междуфазных КЗ

Данный вид защиты (см. гл. 6) обладает абсолютной селективностью и применяется, прежде всего, для электрических ма-

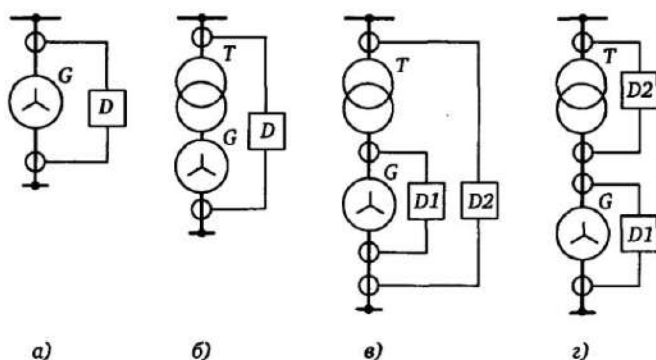


Рис. 9.1. Варианты подключения продольной дифференциальной защиты:  
а — одиночный генератор; б—з — блок генератор—трансформатор

шин средней и большой мощности. В зависимости от схем подключения генераторов (непосредственно к шинам или блочное включение генератор — трансформатор) возможны различные схемы подключения дифференциальных защит, некоторые варианты которых приведены на рис. 9.1.

Варианты, показанные на рис. 9.1,б—г, охватывают различные зоны, определяемые расположением используемых трансформаторов тока. Решения, принимаемые при реализации цифровых дифференциальных защит генераторов и двигателей от многофазных КЗ, в принципе не отличаются от решений, рассмотренных в гл. 6 (обобщенную структуру см. на рис. 6.7). При выполнении защиты одиночного генератора (рис. 9.1,а) не требуется блокировка при броске тока намагничивания, возникающего при включении силового трансформатора.

### 9.1.2. Дифференциальная защита от КЗ на землю

Возможны случаи, когда нейтраль генератора заземлена (глухо или через низкоомное сопротивление). При этом для защиты от однофазных КЗ может быть использована высокочувствительная

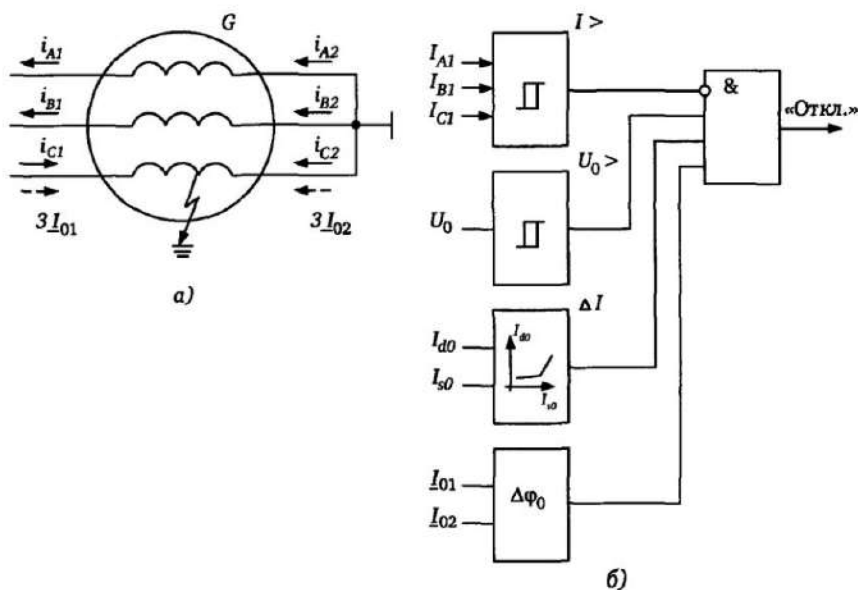


Рис. 9.2. Дифференциальная защита от КЗ на землю в генераторах с заземленной нейтралью



тельная дифференциальная защита [9] на основе сравнения токов нулевой последовательности, протекающих по обеим сторонам обмоток статора генератора (рис. 9.2,а).

Дифференциальная защита (рис. 9.2,б) имеет обычную тормозную характеристику (см. рис. 6.3) и должна обладать высокой чувствительностью при КЗ через переходное сопротивление. Поэтому во избежание неправильного действия при внешних КЗ с большими токами, сопровождающимися насыщением трансформаторов тока, защита блокируется при превышении максимальным из токов заданного значения (блок  $I>$ ). Срабатывание защиты происходит и при возникновении напряжения нулевой последовательности  $U_0$  (блок  $U_0>$ ), что обеспечивает несрабатывание при внешних междуфазных КЗ, сопровождающихся большими токами небаланса. Дополнительно контролируется угол между токами нулевой последовательности (блок  $\Delta\varphi_0$ ), что также обеспечивает повышение селективности при внешних однофазных КЗ.

### **9.1.3. Защита от витковых замыканий в обмотке статора**

Витковые КЗ характеризуются замыканием доли витков одной фазы обмотки статора (рис. 9.3,а).

У генераторов с параллельными обмотками каждой фазы возможны замыкания между витками параллельных ветвей (рис. 9.3,б). Такие замыкания достаточно опасны, поскольку могут сопровождаться большими токами КЗ, протекающими между закороченными витками. Некоторые варианты возможных решений защиты от витковых КЗ приведены на рис. 9.3.

Вариант, представленный рис. 9.3,а, основан на использовании разницы напряжений между нейтралью генератора и искусственно созданной нулевой точкой, возникающей при витковых КЗ вследствие неравенства напряжений отдельных фаз генератора. При этом возможно реагирование как на напряжение  $3U_0$  (блок  $U_0>$ ), так и на  $3I_0$  (блок  $I_0>$ ).

**Поперечная дифференциальная защита.** Наличие параллельных ветвей статорных обмоток дает возможность эффективного применения поперечной дифференциальной защиты, основанной на сравнении токов параллельных ветвей каждой фазы (рис. 9.3,б). Наиболее качественным решением является применение дифференциальной защитной функции для каждой из

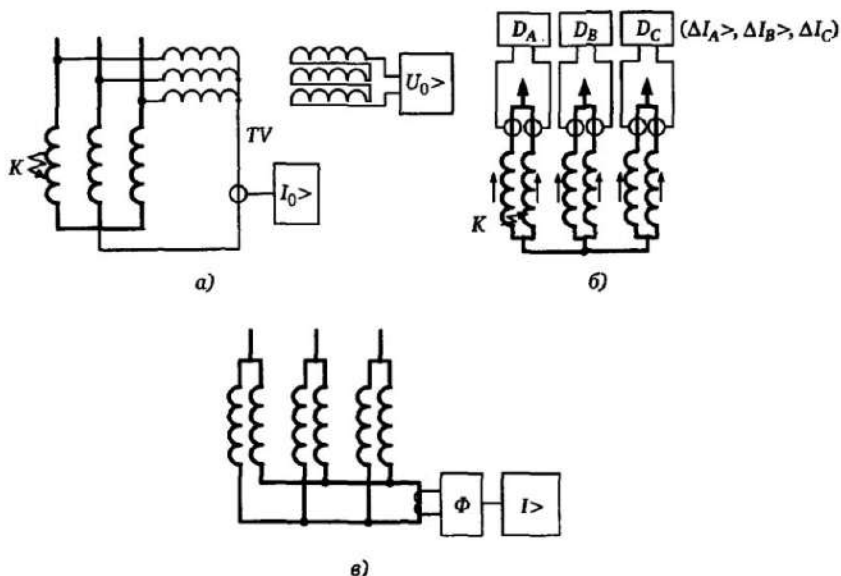


Рис. 9.3. Варианты выполнения защиты от витковых КЗ

фаз ( $D_A, D_B, D_C$ ), аналогичной рассмотренной в §6.2. В этом случае происходит формирование дифференциального  $I_d$  и тормозного  $I_s$  токов, например, для фазы  $A$   $I_d = |I_A - I'_A|$  и  $I_s = |I_A| + |I'_A|$ , и сравнение их в соответствии с тормозной характеристикой, представленной на рис. 6.3.

В отличие от продольных дифференциальных защит, где сравниваемые токи имеют разные направления при внешних КЗ, в поперечной дифференциальной защите сравниваемые токи имеют одинаковое направление. Поэтому дифференциальный ток  $I_d$  определяется как разность сравниваемых токов.

Во многих случаях для упрощения поперечная дифференциальная защита выполняется на основе реагирования на дифференциальный ток, например,  $\Delta I_A = |I_A - I'_A|$  с применением обычных токовых реле ( $\Delta I_A >, \Delta I_B >, \Delta I_C >$ ) вместо дифференциальных. Данная защита имеет меньшую чувствительность вследствие необходимости отстройки от небалансов, возникающих при близких внешних КЗ, сопровождающихся большими токами.

**Односистемная поперечная дифференциальная защита** реагирует на ток, возникающий в цепи между общими точками параллельных ветвей, соединенных в звезду (рис. 9.3,в). В данном случае необходим частотный фильтр  $\Phi$  для отстройки от

высших гармоник, протекающих в цепи нейтрали и кратных трем. Данная защита реагирует как на витковые замыкания в одной фазе, так и на междуфазные КЗ.

Защита имеет мертвые зоны при замыканиях, соответствующих равной удаленности места КЗ от нейтралей обеих звезд, т. е. чувствительность защиты не всегда обеспечивается.

#### 9.1.4. Токовые защиты статора

**Максимальные токовые защиты (МТЗ)** в основном используются как резервные защиты электрических машин при внутренних КЗ, а также при внешних КЗ в прилегающих частях ЭС, когда запаздывание в отключении может приводить к недопустимой по длительности перегрузке объекта токами КЗ. В объектах небольшой мощности токовые защиты (токовые отсечки и МТЗ) могут использоваться как основные защиты. Для быстрого селективного отключения внутренних КЗ возможно использование направленной токовой защиты (см. рис. 4.27,а) на входах генератора.

Структура токовых защит не отличается принципиально от структуры защит с независимой и зависимой выдержкой времени, рассмотренных в гл. 4. В то же время существуют особенности выполнения, связанные со свойствами защищаемого объекта [9].

**Максимальная токовая защита с фиксацией пуска при снижении напряжения.** В генераторах, имеющих систему возбуждения, питающуюся от напряжения сети, ток КЗ с определенной постоянной времени уменьшается при снижении напряжения на входе генератора, вызванном внешним КЗ. Это может приводить к возврату МТЗ, действующей с выдержкой времени (отказу в срабатывании). В целях обеспечения функционирования в этом режиме МТЗ может содержать дополнительный блок, фиксирующий пуск защиты и удерживающий пусковой сигнал при последующем снижении напряжения, что поясняется на рис. 9.4.

В данном случае цепь отключения МТЗ, состоящая из пусковых органов каждой фазы (упрощено на рис. 9.4 блок 1) и элемента выдержки времени  $T$  (блок 2), имеет ввод подхватывающего сигнала, подводимого к блоку 1 от триггера (блок 4). Пуск триггера возникает при одновременном наличии токового пуска  $I >$ , контроля снижения напряжения  $U <$  и отсутствии блоки-

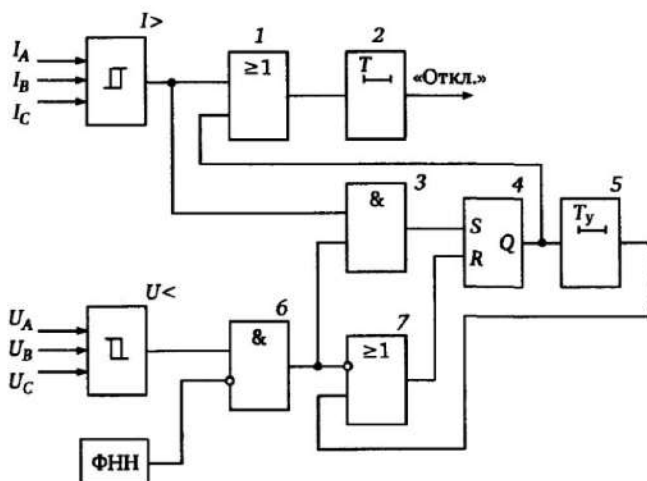


Рис. 9.4. Структура МТЗ с фиксацией пуска при снижении напряжения

рующего сигнала от блока фиксации неисправности цепей напряжения  $\Phi НН$ . Таким образом, при последующем снижении тока, сопровождающемся снижением напряжения, набор выдержки времени для формирования сигнала отключения продолжается. Подхватывающий сигнал, подводимый к блоку 1, снимается через заданное элементом выдержки времени 5 время  $T_y$  или после восстановления напряжения (возврат блока  $U <$ ).

**Максимальная токовая защита с характеристикой, зависящей от текущего напряжения электрической машины.** Более общий случай учета снижения напряжения на выводах электрической машины вследствие влияния системы возбуждения на характеристики МТЗ с независимой и зависимой выдержкой времени иллюстрирует рис. 9.5 [9].

Отключенное положение переключателя  $Q$  соответствует отсутствию влияния напряжения на функции МТЗ с независимой (блок 1) и зависимой (блок 2) выдержкой времени. При включении переключателя  $Q$  блок коррекции уставок по напряжению  $F(U)$  изменяет в зависимости от уровня напряжения в сети уставки МТЗ с независимой и зависимой выдержкой времени. При этом в МТЗ с независимой выдержкой времени при снижении напряжения до определенного уровня изменяется порог  $I >$  пускового органа. В МТЗ с зависимой выдержкой времени

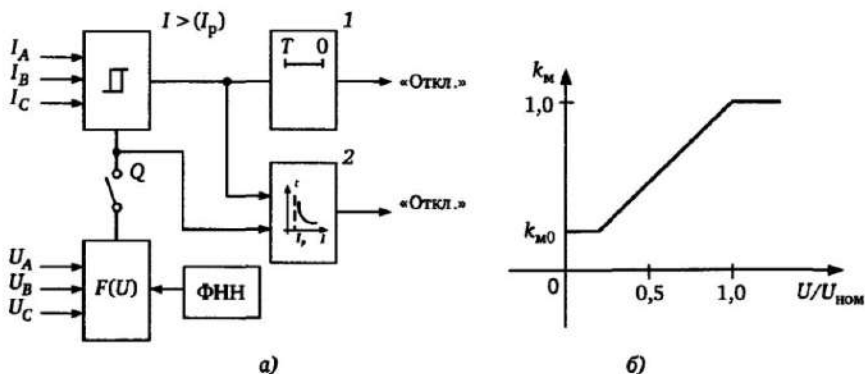


Рис. 9.5. Структура МТЗ (а) с характеристикой, зависящей от текущего напряжения электрической машины (б)

(см. § 4.2) изменяется уставка по току  $I_p$ . В общем случае данные изменения могут производиться ступенчато или плавно в зависимости от значения входного напряжения. В последнем случае для текущей уставки по току имеем  $I_{уст} = k_m(U)I_p$ , где коэффициент  $k_m$  является функцией напряжения на выводах электрической машины (рис. 9.5,б). Параметр  $I_p$  определяет, например, в соответствии с выражениями (4.4) и (4.5) не только стартовый ток, но и характеристику выдержки времени; поэтому характеристики выдержки (см. рис. 4.14) смещаются вдоль оси токов в зависимости от напряжения на выводах электрической машины. Блок ФНН фиксации неисправности в цепях напряжения блокирует в необходимых случаях функцию коррекции уставки  $F(U)$ , оставляя в действии МТЗ.

**Защита от тепловой перегрузки** предотвращает температурный перегрев электрической машины. Возможный вариант выполнения использует моделирование в первом приближении теплового процесса в соответствии с дифференциальным уравнением (5.6) на основе измерения текущего тока статора. Вариант реализации защиты от тепловой перегрузки, который может использоваться для защиты статора электрической машины, рассмотрен в гл. 5 (см. рис. 5.3).

**Защита от воздействия несимметричных токов.** Составляющие токов обратной последовательности  $I_2$  в обмотке статора создают магнитное поле, вращающееся с удвоенной скоростью относительно ротора и индуцирующее дополнительно разогре-

вающие его токи. Указанное определяет существенно большее влияние симметричных составляющих обратной последовательности в токе статора по сравнению с составляющими прямой последовательности. Поэтому для контроля значения и времени протекания токов  $I_2$  применяются отдельные защитные функции с обратно-квадратичной зависимой временной характеристикой срабатывания, описываемой в общем случае выражением  $t = k_1 / (I_2^2 / I_{\text{ном}}^2 - k_2)$ . При этом  $k_1$  и  $k_2$  — постоянные для данного типа электрической машины величины, характеризующие относительное количество энергии, выделяемой током  $I_2$ . Вариант выполнения защиты по току обратной последовательности рассмотрен в гл. 4 (рис. 4.17).

### 9.1.5. Дистанционная защита генераторов

Дистанционная защита используется в генераторах средней и большой мощности как защита обмотки статора и частично трансформатора, а также как резервная защита по отношению к другим защитам генератора, трансформатора и прилегающих элементов сети (рис. 9.6,а).

Питание цепей тока защиты всегда осуществляется со стороны нейтрали, что обеспечивает протекание токов через трансформаторы тока при внутреннем КЗ и отключенном от сети генераторе или отсутствии в сети других питающих элементов. Характеристики срабатывания дистанционных органов выполняются ненаправленными (рис. 9.6,б), что обеспечивает запасы по чувствительности при внутренних КЗ и не влияет на селективность, так как любые КЗ в защищаемой зоне соответствуют измерениям в положительном направлении. При использовании двуступенчатой дистанционной защиты область охвата первой быстродействующей ступени  $Z_1$  отстраивается от КЗ за силовым трансформатором  $T$  (рис. 9.6,а), а вторая ступень с запасом охватывает трансформатор и по выдержке времени согласуется с защитами смежных элементов сети.

Защита должна содержать основные необходимые функциональные элементы, в том числе блокировку при качаниях и блокировку при неисправности в цепях напряжения. Принципы построения и примеры выполнения дистанционных защит рассмотрены в гл. 7. При наличии токового пуска для выбора поврежденных фаз в дистанционной защите целесообразно иметь возможность фиксации пуска защиты аналогично рис. 9.4 при сни-

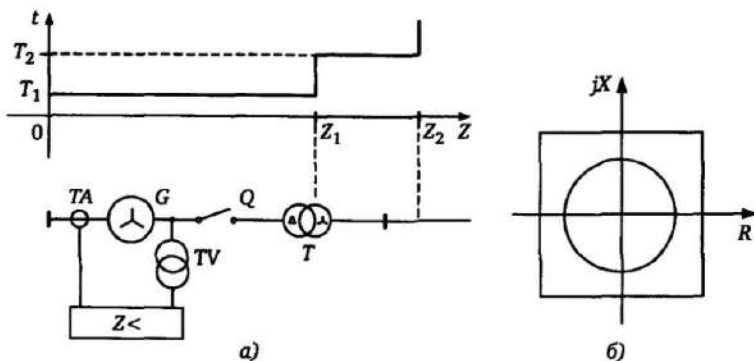


Рис. 9.6. Дистанционная защита генераторов:  
 а — зоны действия; б — возможные характеристики

жении напряжения, вызванном действием системы возбуждения генератора после возникновения КЗ.

## 9.2. Защита статора при замыканиях на землю

### 9.2.1. Защиты, использующие напряжения и токи нулевой последовательности

Замыкания на землю обмотки статора генератора, работающего в режиме изолированной нейтрали, могут быть достаточно опасными вследствие того, что, несмотря на сравнительно небольшие емкостные токи КЗ, возникающая электрическая дуга повреждает изоляцию и оплавляет активную сталь статора.

Защиты генераторов в блоках генератор—трансформатор выполняются наиболее простым образом на основе контроля значения напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  при изолированной нейтрали (рис. 9.7,а) или тока  $3I_0$ , протекающего через заземляющий трансформатор (рис. 9.7,б).

Возможность селективного отключения КЗ на землю  $K_1$  в генераторе и сети генераторного напряжения основана на том, что при внешнем КЗ на землю  $K_3$  напряжения нулевой последовательности в сети генераторного напряжения теоретически не возникает ввиду запираания токов нулевой последовательности трансформатором  $T$  при соединении обмоток звезда—треугольник. На практике при замыкании на землю возникает напряжение  $3U_0$ , обусловленное емкостью  $C_{0м}$  между обмотками трансформатора  $T$ . Однако, учитывая, что емкость  $C_{0м}$  значительно

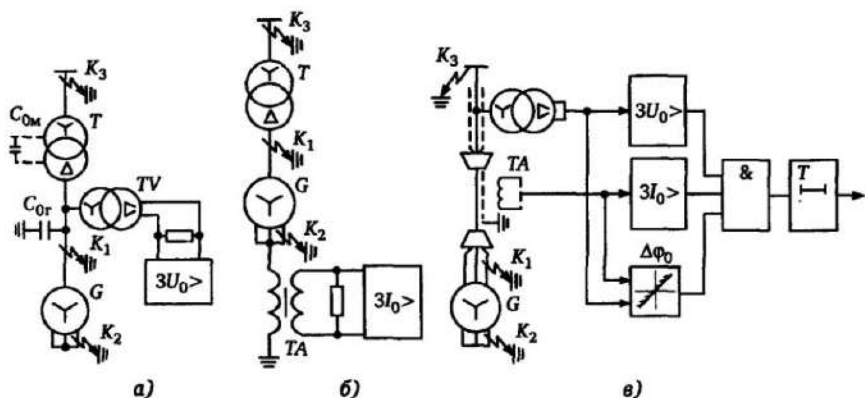


Рис. 9.7. Защита статора генератора от замыканий на землю:  
 а, б — блок генератор—трансформатор; в — генератор, подсоединяемый к шинам

меньше результирующей емкости  $C_{0r}$  в сети генераторного напряжения, значение напряжения  $3U_0$  при внешнем КЗ  $K_3$  достаточно мало. Указанное дает возможность выполнить защиту от замыканий на землю путем контроля напряжения  $3U_0$  (рис. 9.7,а) или контроля тока  $3I_0$  через заземляющий трансформатор ТА, соединяющий нейтраль генератора с землей (рис. 9.7,б).

Следует отметить, что данная защита не может охватить 100% обмотки статора генератора, так как контролируемые величины  $3U_0$  и  $3I_0$  пропорциональны числу витков фазы между нейтралью и местом замыкания на землю. В частности при замыкании на землю нейтрали генератора ( $K_2$ ) число витков, определяющее составляющие нулевой последовательности, равно нулю, и величины  $3U_0$  ( $3I_0$ ) отсутствуют.

Поэтому данная защита в микропроцессорном исполнении охватывает 90—95% обмотки статора, т.е. имеет «мертвую зону» при КЗ вблизи нейтрали генератора.

**Направленная защита нулевой последовательности генераторов, присоединяемых к сборным шинам.** В данном случае напряжение нулевой последовательности практически одинаково при замыкании на землю  $K_1$  на выводах генератора и  $K_3$  в близлежащей сети (рис. 9.7,в). Для обеспечения селективной защиты в этом случае возможно принятие таких же решений, как и для защиты объектов сетей с малым током замыкания на землю.



В случае, если суммарная емкость внешней по отношению к рассматриваемому генератору сети значительно больше емкости генератора, то возможно использование только контроля значения тока нулевой последовательности (см. § 4.4). В более сложном случае, когда генератор достаточно мощный и его емкость по отношению к земле соизмерима с емкостью внешней сети, необходимо применение направленной защиты нулевой последовательности (см. п. 4.6.3). Упрощенно данное решение поясняет рис. 9.7, в, где для обеспечения селективной защиты используется контроль напряжения и тока нулевой последовательности, а также угла  $\Delta\varphi_0$  между ними.

Указанная защита по рассмотренным выше причинам также имеет «мертвую зону» (5—10%) при КЗ вблизи нейтрали генератора  $K_2$ , где напряжение нулевой последовательности  $3U_0$  при замыкании на землю с учетом необходимости отстройки от небалансов в нормальном режиме недостаточно для срабатывания защиты.

### **9.2.2. Защита на основе контроля третьей гармонической составляющей напряжения обмотки статора**

Несинусоидальность индукции в воздушном зазоре электрической машины определяет постоянное присутствие в фазных напряжениях третьей гармонической составляющей  $U_3$ . Сдвиг на  $120^\circ$  первых гармонических составляющих фазного напряжения приводит к сдвигу на  $360^\circ$  имеющихся в фазных напряжениях составляющих третьей гармоники. Это означает, что составляющие  $U_3$  во всех фазных напряжениях статора совпадают по фазе в нормальном режиме и суммируются в результирующем напряжении открытого треугольника. Поэтому для их схем контроля можно использовать любую из схем контроля, показанных на рис. 9.7, а и б.

При относительно симметричном распределении емкости на землю обмотки статора напряжение  $U_3$  распределяется равномерно вдоль обмотки, что приводит к равным и сдвинутым между собой по фазе на  $180^\circ$  напряжениям третьей гармоники  $0,5U_3$  в нейтрали генератора (точка  $H$ ) и на его выводах (точка  $B$  на рис. 9.8, а).

При замыкании на землю  $K_1$  в нейтрали генератора  $H$  потенциал этой точки становится равным нулю. Указанное приводит

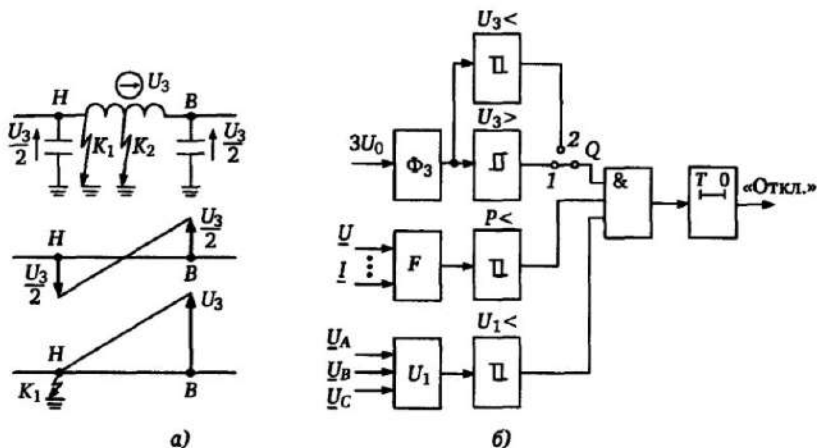


Рис. 9.8. Защита статора генератора от замыканий на землю на основе контроля напряжений третьей гармоники:

а — поясняющие диаграммы; б — структура защиты

к смещению на  $0,5U_3$  всех потенциалов составляющих третьей гармоники вдоль обмотки статора и к увеличению (удвоению) напряжения третьей гармоники на выводах (точка В) до  $U_3$  (рис. 9.8,а). Таким образом, контроль напряжений третьей гармоники на выводах генератора позволяет с высоким коэффициентом чувствительности выявить замыкания на землю близки нейтрали генератора. Следует отметить, что чувствительность к замыканиям на землю вблизи середины обмотки ( $K_2$ ) достаточно мала. Это обусловлено тем, что потенциал третьей гармоники в середине обмотки в нормальном режиме близок к нулю (рис. 9.8,а) и при замыкании на землю в этой точке перераспределения потенциала не происходит. Однако совместное использование защит, реагирующих на составляющие основной частоты (см. рис. 9.7), имеющих «мертвую зону» вблизи нейтрали генератора, и защиты на основе рассматриваемого принципа обеспечивает 100%-ный охват обмотки статора при замыканиях на землю.

Существенным недостатком защит на основе контроля  $U_3$  является неодинаковость значений  $U_3$  для различных типов генераторов, а также нестабильность  $U_3$  во времени, что определяется режимом работы генератора. В частности, составляющая  $U_3$  непропорционально возрастает с ростом генерируемого на-

пряжения и мощности, что определяется изменением кривой индукции в зазоре электрической машины. Поэтому упрощенная структура защиты статора на основе контроля  $U_3$  (см. рис. 9.8) [9] содержит блоки контроля передаваемой мощности генератора  $P <$  и напряжения прямой последовательности генератора  $U_1 <$ . Напряжение третьей гармоники выделяется цифровым фильтром  $\Phi_3$  из общего напряжения  $3U_0$  и при питании от выводов генератора (рис. 9.7,а) его значение контролируется блоком  $U_3 >$ , действующим с выдержкой времени на отключение генератора. Дополнительно осуществляется контроль передаваемой мощности и напряжения генератора блоками  $P <$ ,  $U_1 <$ , разрешающими отключение только при отсутствии превышения  $P$  и  $U_1$  заданных значений. Указанное обеспечивает отстройку от режимов с повышенной индукцией, приводящих к увеличению  $U_3$ .

С учетом того, что уставка защиты  $U_3 >$  должна уточняться в зависимости от типа генератора и условий его работы, а также ограничений по  $P <$  и  $U_1 <$ , данная защитная функция обеспечивает лишь дополнительную защиту и является вспомогательной.

При питании защиты на основе контроля  $U_3$  от нейтрали генератора напряжение третьей гармоники снижается (см. рис. 9.8,а), что контролируется блоком  $U_3 <$  (см. рис. 9.8,б). Переключатель  $Q$  ставится в этом случае в положение 2.

### **9.2.3. Защиты на основе использования наложенного напряжения**

Полный охват обмотки статора при замыканиях на землю при использовании напряжений и токов основной частоты, источником которых является сам генератор, практически затруднен прежде всего потому, что возможны повреждения статора (вблизи нейтрали), при которых сигналы основной частоты не изменяются. Наличие «мертвых зон» возможно и при реагировании на третью гармонику напряжения, создаваемую защищаемым генератором. Принципиально картина меняется, если создать искусственную цепь с внешним заземленным источником [41, 42], в которую входит статор генератора и которая замыкается при соединении статора с землей в общем случае через переходное сопротивление. В этом случае, учитывая относительно малое сопротивление обмотки статора, результирующий ток,

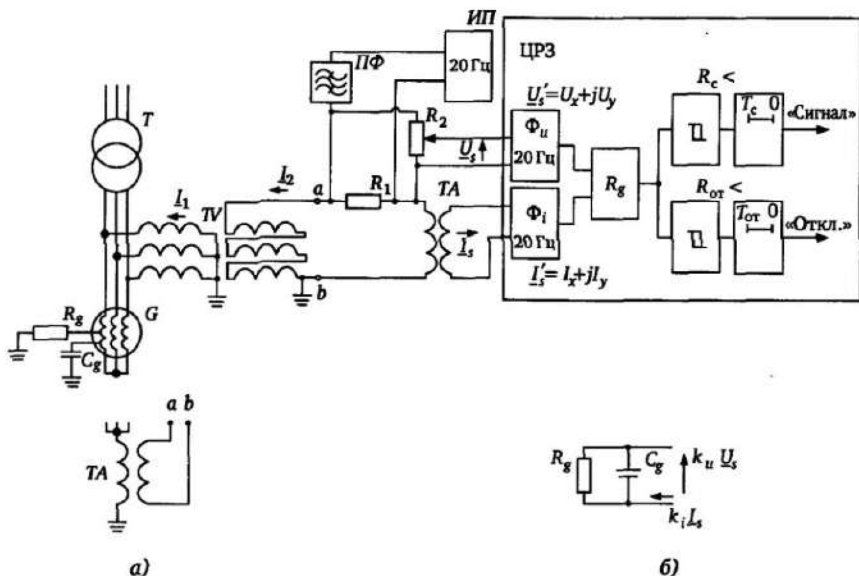


Рис. 9.9. Защита статора генератора с использованием наложенного напряжения низкой частоты со 100%-ным охватом защищаемой зоны

создаваемый внешним источником, мало зависит от места замыкания обмотки статора на землю, и определяется, прежде всего, параметрами цепи источника сигнала и значением результирующего переходного сопротивления замыкания на землю. Принципиально важным при этом является использование сигнала наложенной частоты, существенно отличающейся от основной частоты, для исключения влияния режима работы генератора на токи и напряжения в искусственной цепи наложенного сигнала.

На рис. 9.9 в качестве примера приведена структура сигнализации и защиты статора при замыканиях на землю [9].

Источник питания ИП генерирует напряжение частотой 20 Гц, которое через полосовой фильтр ПФ и резистор  $R_1$  вводится в схему с наложением напряжения на статор генератора через обмотку трансформатора TV. К устройству защиты ЦРЗ подводится напряжение  $\underline{U}_s$  с резистора  $R_2$ , пропорциональное налагаемому напряжению. Через трансформатор тока ТА подводится ток  $\underline{I}_s$ , пропорциональный току  $\underline{I}_2$  в цепи с источником налагаемого напряжения.

При отсутствии замыкания обмотки статора на землю ( $R_g = \infty$ ) входное сопротивление трансформатора  $TV$  со стороны разомкнутого треугольника достаточно велико, и вторичный ток  $I_2$  мал. Это обусловлено тем, что соединенные в звезду через сопротивление статора первичные обмотки трансформатора  $TV$  представляют собой большое сопротивление для одинаковых по фазе токов  $I_1$  с частотой источника налагаемого с сопротивлением  $R_1$  напряжения. В этом случае результирующее сопротивление определяется в основном емкостью  $C_g$  статора генератора.

При уменьшении сопротивления изоляции одной из фаз статора или замыкания фазы на землю возникает дополнительный путь для токов  $I_1$  через эквивалентное сопротивление  $R_g$  (рис. 9.9,а), что ведет к увеличению токов  $I_1$  и  $I_2$  и определенному снижению напряжения на резисторе  $R_1$ . Учитывая, что  $R_g$  и емкостное сопротивление  $1/(\omega C_g)$  значительно больше остальных сопротивлений в схеме наложенного напряжения, именно они определяют измеряемое защитой комплексное сопротивление  $\underline{Z} = \underline{U}_s / \underline{I}_s$ , где  $\underline{U}_s$  и  $\underline{I}_s$  пропорциональны напряжению и току в схеме наложенного напряжения. С учетом этого в первом приближении для схемы, представленной на рис. 9.9, справедливы следующие соотношения, определяющие контролируемую защитой величину  $R_g$ :

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{k_i \underline{I}'_s}{k_u \underline{U}'_s} = \frac{1}{R_g} + j\omega C_g;$$

$$\frac{1}{R_g} = \operatorname{Re} \left[ \frac{k_i \underline{I}'_s}{k_u \underline{U}'_s} \right],$$

откуда имеем:

$$R_g = 1 / \operatorname{Re} \left[ \frac{k_i \underline{I}'_s}{k_u \underline{U}'_s} \right] = \frac{k_u}{k_i} \frac{U_x^2 + U_y^2}{U_x I_x + U_y I_y}. \quad (9.1)$$

При этом  $k_u$  и  $k_i$  — результирующие коэффициенты передачи в цепях напряжения и тока, связывающие первичные значения напряжения и тока в цепи наложенного напряжения с выходными комплексными величинами  $\underline{U}'_s$  и  $\underline{I}'_s$  цифровых фильтров  $\Phi_u$  и  $\Phi_i$  (рис. 9.9,а) вида (см. §2.2)

$$\underline{U}'_s = U_x + jU_y; \quad \underline{I}'_s = I_x + jI_y.$$

В структуре ЦРЗ на рис. 9.9,а блок  $R_g$  вычисляет на основе соотношения (9.1) сопротивление статора относительно земли, а блоки  $R_c <$  и  $R_{от} <$  при возникновении замыкания на землю в любой точке обмотки статора обеспечивают действие с выдержками  $T_c$  и  $T_{от}$  соответственно на сигнализацию и отключение.

Наложение низкочастотного напряжения на обмотку статора может обеспечиваться также через трансформатор ТА в цепи нейтрали генератора.

### 9.3. Защита ротора от замыкания на землю

Замыкание на землю в цепи обмотки возбуждения (ротора) не приводит непосредственно к тяжелым повреждениям ввиду изолированности цепи ротора от земли. Однако вследствие опасности при возникновении второго замыкания на землю, приводящего не только к повреждению обмотки ротора, но и к недопустимым механическим усилиям, оно должно быть своевременно выявлено и устранено. Защита ротора должна быть чувствительна к ухудшению изоляции ротора, т.е. реагировать на снижение активного сопротивления ротора относительно земли. При этом, учитывая наличие в нормальном режиме соизмеримого емкостного сопротивления ротора относительно земли, контроль тока замыкания на землю не обеспечивает необходимую чувствительность.

Наиболее распространенным решением является наложение переменного напряжения на цепь ротора с контролем активной составляющей тока (активного сопротивления) этой цепи относительно земли.

**Защита на основе наложения напряжения основной частоты (рис. 9.10).** В данном случае вспомогательная цепь для контроля сопротивления цепи возбуждения относительно земли образуется источником напряжения  $U_p$ , формируемым внешним трансформатором TV1, подключенным к цепям напряжения.

Напряжение  $U_p$  прикладывается к цепи возбуждения через разделительные RC-цепи  $R'_1, C'_1$  [9]. Последовательно в цепь наложенного напряжения включается первичная обмотка проме-

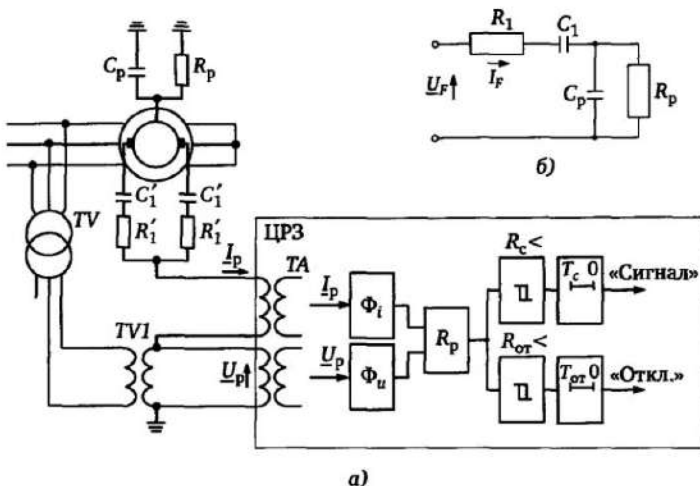


Рис. 9.10. Защита ротора с использованием наложения напряжения основной частоты

жугочного трансформатора  $TA$  для контроля тока в созданной цепи. Таким образом, к ЦРЗ подводится напряжение  $\underline{U}_p$  и ток  $I_p$ , причем значение и фаза тока  $I_p$  зависят от параметров цепи, в том числе от контролируемого сопротивления  $R_p$  цепи ротора относительно земли. В упрощенной эквивалентной схеме замещения цепи наложенного напряжения (рис. 9.10,б) значения эквивалентных предвключенных элементов  $R_1 = R'_1/2$ ,  $C_1 = 2C'_1$  известны и известно значение эквивалентного сопротивления  $Z_\Sigma = \underline{U}_p/I_p$ , измеряемого цифровым устройством защиты. Указанных данных достаточно для контроля сопротивления  $R_p$  цепи ротора относительно земли. При входном сопротивлении и его компонентах  $Z_\Sigma = R_\Sigma - jX_\Sigma$  имеем для схемы рис. 9.10,б

$$\left. \begin{aligned} R_\Sigma &= R_1 + \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}; \\ X_\Sigma &= - \left( X_1 + \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

где неизвестными являются только активное  $R_p$  и реактивное  $X_p$

сопротивления цепи ротора относительно земли. Решая системе (9.2), находим искомое значение

$$R_p = \frac{(X_\Sigma - X_1)^2}{R_\Sigma - R_1} + R_\Sigma - R_1. \quad (9.3)$$

Для отстройки от составляющих высших гармоник в цепи ротора входные величины ЦРЗ предварительно фильтруются (цифровыми фильтрами  $\Phi_i$ ,  $\Phi_u$  на рис. 9.10,а). Блок  $R_p$  обеспечивает вычисление комплексного сопротивления  $Z_\Sigma$  и активной составляющей  $R_p$  сопротивления цепи ротора относительно земли на основе выражения (9.3). На рис. 9.10,а показаны также цепи сигнализации и отключения.

**Чувствительная защита цепи ротора на основе наложения прямоугольных импульсов низкой частоты.** Возможность построения защиты ротора от замыканий на землю с повышенной чувствительностью с отстройкой от влияния собственной емкости обмотки статора и гармонических составляющих, обусловленных тиристорной системой возбуждения, появляется при наложении низкочастотного прямоугольного напряжения 0,5—4,0 Гц (рис. 9.11).

В данном случае внешний генератор прямоугольных импульсов напряжения  $U_p(t)$  (рис. 9.11,а) подключается через разделительные резисторы  $R_1$  к цепи обмотки ротора [9]. К устройству защиты ЦРЗ через разделительные блоки 1, 2, обеспечивающие гальваническую развязку, подаются величины, пропорциональные как генерируемому напряжению  $U_p(t)$  (блок 1) так и возникающему в цепи тока  $I_p(t)$  (блок 2). Частота следования прямоугольных импульсов (рис. 9.11,б) выбирается такой, чтобы длительность одного импульса была достаточной для зарядки эквивалентной емкости обмотки ротора  $C_p$ . Указанное означает, что при сопротивлении обмотки ротора относительно земли  $R_p \rightarrow \infty$  к моменту прекращения любого однополярного импульса ток не протекает, т.е.  $I_p = 0$  (рис. 9.11,в).

При наличии переходного сопротивления  $R_p$  между обмоткой ротора и землей в цепи генератора возникает постоянная составляющая тока  $I_p$ , протекающая через  $R_p$ .

На эту составляющую в общем случае накладывается дополнительная постоянная составляющая  $I_{см}$ , обусловленная не генератором импульсов, а постоянным напряжением, питающим обмотку возбуждения и зависящая от места замыкания на зем-



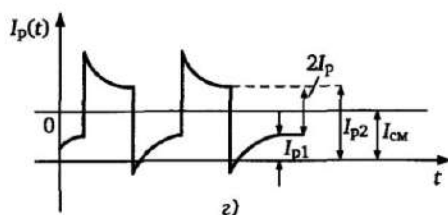
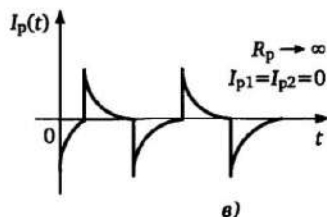
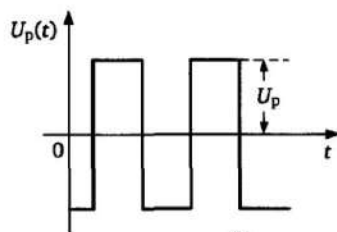
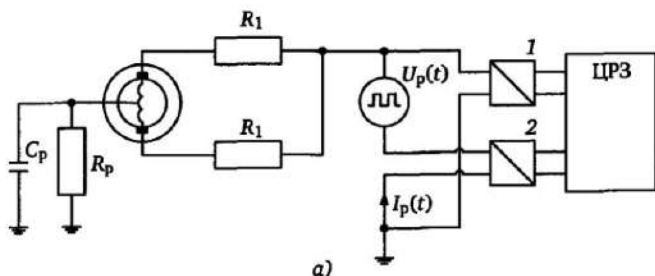


Рис. 9.11. Защита ротора с использованием наложения низкочастотных прямоугольных импульсов

лю. Указанное приводит к тому, что кривая тока  $I_p(t)$  смещается на  $I_{см}$  (рис. 9.11,г).

Постоянную составляющую  $I_p$ , обусловленную генерирующими разнополярными прямоугольными импульсами, с учетом рис. 9.11,г можно найти из соотношения  $I_p = 0,5(I_{p2} - I_{p1})$ , а искомое сопротивление между обмоткой ротора и землей определится соотношением

$$R_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{2U_p}{I_{p2} - I_{p1}}$$

Таким образом, наложение знакопеременного низкочастотного прямоугольного напряжения позволяет отстроиться как от гармонических составляющих помех в цепи возбуждения, так и от постоянной составляющей в цепи измерения, что обеспечивает высокую чувствительность к замыканиям на землю.

#### 9.4. Защита генератора от аномальных режимов

**Защита обратного направления мощности.** Данная защитная функция предотвращает повреждение блока турбина—генератор при прекращении подачи энергоносителя к турбине. В этом случае генератор переходит в двигательный режим с подачей к турбине вращающего момента, что может привести к повреждению лопаток турбины. Поэтому необходимо своевременное отключение генератора от сети при выявлении данного режима. О наступлении двигательного режима генератора свидетельствует потребление им активной мощности из сети. Знак активной мощности при этом отрицательный. Значение и знак активной мощности являются, таким образом, основными критериями при определении данного режима. При этом эффективно измерение активной мощности прямой последовательности с использованием величин  $\underline{U}_1$  и  $I_1$ .

Для отстройки от неправильных действий в режимах синхронизации или качаний защита функционирует с выдержкой времени на отключение. Выдержка времени может быть существенно сокращена при возникновении сигнала о прекращении подачи энергоносителя к турбине. Обратная мощность, на которую должна реагировать защита, зависит прежде всего от типа турбины и находится обычно в пределах 1—5% номинальной мощности.

**Защита генераторов от асинхронных режимов.** В данном случае, как и при выявлении асинхронных режимов в сети (см. § 7.12), эффективно использование дистанционного принципа. Асинхронный ход турбогенераторов и гидрогенераторов является аномальным режимом, определяющим повышенные потери мощности и нагрев машин, а также возникновение больших

механических усилий в их узлах. Следует различать два вида асинхронных режимов генераторов в энергосистемах: с полным или частичным возбуждением; без возбуждения.

Первый режим наиболее опасен и требует принятия быстрых мер для отключения генераторов. Указанное определяется тем, что при наличии возбуждения у асинхронно вращающихся машин амплитуды и фазы токов и напряжений в них периодически изменяются. Это создает значительные моменты на валу и приводит при определенных скольжениях к резонансным явлениям в валопроводах генератора. Так, по данным [21], при асинхронном ходе возбужденного генератора с частотой скольжения 3—5 Гц длительностью 1,5 с значение скручивающего момента в сечении валопровода генератора превышало в 4 раза расчетный момент при внезапном трехфазном КЗ в режиме номинальной нагрузки, что обусловлено приближением к резонансу основной частоты электромагнитного момента и собственной частоты колебаний валопровода генератора. С учетом указанных явлений скольжение при наличии возбуждения не должно превышать 2—3 Гц (при наличии внешнего реактивного сопротивления сети не менее 0,3 отн. ед.), а длительность асинхронного хода должна быть не более трех-четырех периодов скольжения. При больших скольжениях генератор должен отключаться еще быстрее.

При потере возбуждения турбогенераторы могут работать некоторое время с ограниченной активной нагрузкой, что позволяет либо восстановить возбуждение, либо принять меры для перераспределения мощности на другие генераторы. Внезапное отключение генератора при полной нагрузке нежелательно по возможным последствиям как для самого оборудования блока, так и для энергосистемы в целом. Однако при потере возбуждения необходим быстрый сброс части нагрузки, так как в противном случае растет ток статора и нагреваются его торцевые зоны. Таким образом, потеря возбуждения должна сопровождаться быстрой автоматической разгрузкой генераторов по мощности.

Одним из эффективных методов выявления асинхронных режимов при потере возбуждения генератора является контроль комплексного сопротивления на его выходе. Указанное основано на том, что при отсутствии возбуждения входное сопротивление генератора располагается, в первом приближении, в за-

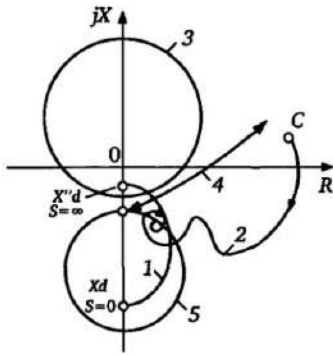


Рис. 9.12. Траектории сопротивления на зажимах генераторов при асинхронном ходе с потерей и без потери возбуждения

в зависимости от скольжения  $s$  в разных точках полуокружности 1 (рис. 9.12) в IV квадранте комплексной плоскости  $Z$ .

Эта полуокружность опирается на точки  $x_d''$  ( $s = \infty$ ) и  $x_d$  ( $s = 0$ ). В действительности с учетом различия сопротивлений генератора  $z_d$  и  $z_q$  по продольной и поперечной осям, а также достаточно медленного спада намагничивающего потока входное сопротивление при потере возбуждения находится в определенной области вблизи характеристики 1 и изменяется во времени в процессе развития асинхронного хода.

Уточненный анализ траекторий входного сопротивления синхронного генератора в асинхронном режиме рассмотрен в [23]. Траектория 2 на рис. 9.12 соответствует одному из возможных годографов движения входного сопротивления при потере возбуждения из предшествующего синхронного режима (точка C на рис. 9.12). С учетом изложенного, характеристика срабатывания ДО, действующего при потере возбуждения, должна с запасом охватить область вблизи характеристики 1 в IV квадранте, соответствующую потере возбуждения генератора.

Однако и без потери возбуждения возможны режимы, прежде всего *асинхронный ход возбужденного генератора* (например, кривая 3 на рис. 9.12) или *глубокие синхронные качания* в ЭС (кривая 4), при которых входное сопротивление на зажимах генератора в определенные моменты времени также находится вблизи характеристики 1, соответствующей потере возбуждения. Анализ траекторий входного сопротивления при асинхронном ходе и качаниях в ЭС рассмотрен в гл. 7.

Возможность попадания входного сопротивления генератора в III и IV квадранты комплексной плоскости тем больше, чем меньше сопротивление системы, к которой подключен генератор, и чем меньше соотношение между ЭДС генератора и эквивалентной ЭДС электрической системы.

Таким образом, имеется определенное противоречие при выборе характеристик ДО защиты генератора от потери возбужде-

ния, заключающееся в том, что, с одной стороны, необходим охват области вблизи характеристики 1 в IV квадранте, а с другой — необходима отстройка от режимов асинхронного хода без потери возбуждения. Это противоречие обычно устраняется введением замедления защиты от потери возбуждения.

В распространенном на практике случае применения ДО с круговой характеристикой срабатывания для выявления потери возбуждения генератора необходимая отстройка от указанных режимов достигается использованием круговой ХС (характеристика 5), смещенной по реактивной оси в III и IV квадранты. Однако это не исключает полностью возможности действия защиты в режимах асинхронного хода генератора без потери возбуждения и при синхронных качаниях ввиду периодического попадания в указанные режимы входного сопротивления в область, охватываемую характеристикой 5. Поэтому устройства дополняются элементами выдержки времени для исключения излишних срабатываний.

Для повышения быстродействия и селективности устройств выявления потери возбуждения на дистанционном принципе целесообразно уменьшать области срабатывания в плоскости  $Z$  с тем, чтобы охватить только область вблизи характеристики 1 генератора и действовать лишь при потере возбуждения. Выдержка времени для отстройки от других возможных режимов в этом случае минимальна, так как время пребывания входного сопротивления в сравнительно узкой области срабатывания ДО при синхронных качаниях и асинхронном ходе возбужденного генератора достаточно мало.

Имеются различные предложения по повышению чувствительности при выявлении потери возбуждения. Применение ДО с комбинированными характеристиками дает новые возможности в построении достаточно чувствительных и селективных органов, выявляющих режимы асинхронного хода генераторов с потерей и без потери возбуждения [9, 17, 24]. При этом выявляется асинхронный режим с центром качаний в самом генераторе, и осуществляется контроль прохождения траектории  $Z$  при качаниях через близлежащий к генератору участок сети. В общем случае, используя методы выявления качаний, рассмотренные в гл. 7, можно фиксировать различные виды асинхронных режимов с помощью защиты  $S$  на выводах генератора (рис. 9.13,а), имеющей многозонную характеристику (рис. 9.13,б).

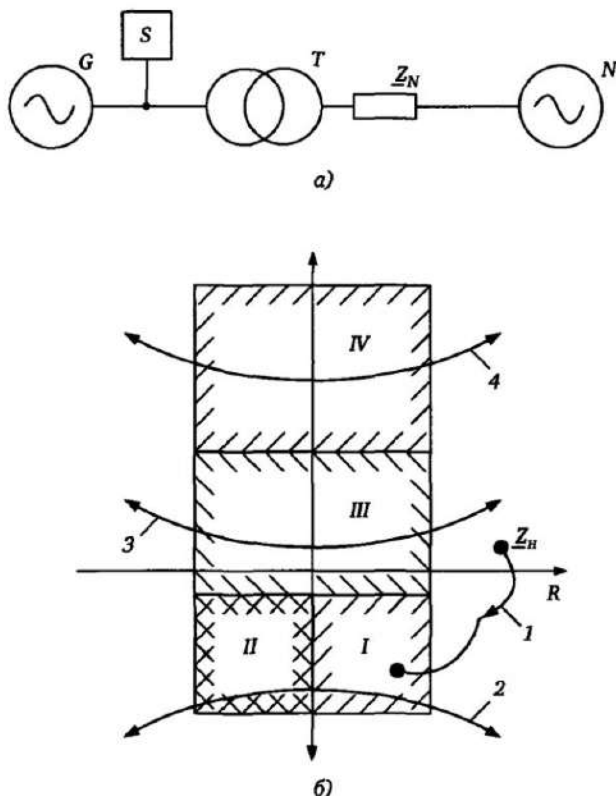


Рис. 9.13 Защита генераторов от асинхронных режимов:  
 а — эквивалентная система; б — многозонная характеристика

При этом имеется в виду, что фиксируется не только попадание вектора  $\underline{Z}$  в каждую из четырех зон I—IV, но и одновременно на основе измерения скорости изменения  $\underline{Z}$  (см. §7.12) выявляется режим качаний (асинхронного хода). Критерием синхронных качаний является вход в какую-либо из зон I—IV и выход из нее без пересечения оси  $jX$ , т.е. без смены знака активной составляющей вектора  $\underline{Z}$ . При асинхронном ходе (траектории 2—4) каждому циклу соответствует вход в одну из зон и последующий выход из нее при смене знака активной составляющей  $\underline{Z}$ , что соответствует сквозному проходу характеристики. С учетом изложенного, выявляются следующие аномальные режимы:

- потеря возбуждения — попадание  $\underline{Z}$  в область I, соответст-

вующую положительной активной и отрицательной реактивной составляющим  $Z$ ;

- асинхронный режим при частичной потере возбуждения — сквозное прохождение областей  $I$  и  $II$  в любом направлении;
- асинхронный режим с центром качаний, не выходящим за сопротивление трансформатора  $T$  (рис. 9.13,а) — сквозное прохождение области  $III$  в любом направлении;
- асинхронный режим в прилегающем участке сети — сквозное прохождение области  $IV$  в любом направлении.

Для обеспечения резервирования счетчики циклов асинхронного режима в каждой из областей, соответствующих траекториям 2, 3, 4, имеют различные уставки.

**Защиты от повышения и понижения напряжения** являются обычно двухступенчатыми и обеспечивают отключение генератора при недопустимом повышении (понижении) напряжения. Повышение напряжения приводит, в первую очередь, к повышению индукции и возможности повреждения изоляции, а понижение — к возможности потери устойчивости работы генератора в ЭС.

**Защита от перевозбуждения** обеспечивает контроль недопустимо высокой индукции в генераторе и в трансформаторе блока. Недопустимый рост индукции может произойти при отключении нагрузки блока генератор—трансформатор, когда вследствие инерционности регулирующей системы напряжение некоторое время остается высоким. Учитывая, что индукция  $B$  пропорциональна напряжению  $U$  и обратно пропорциональна частоте  $f$ , недопустимое повышение индукции, приводящее к насыщению сердечника, искажению формы напряжения и увеличению потерь (разогреву), возникает как при повышении напряжения, так и при снижении частоты. Характеристика отключения данной защитной функции [9] строится в координатах  $t = f(U/f)$  (рис. 9.14) и имеет три участка: 1 — пуск функции  $U/f >$ ; 2 — обратно-зависимая временная характеристика, соответствующая допустимому тепловому перегреву; 3 — участок быстрого отключения  $U/f \gg$  при больших индукциях.

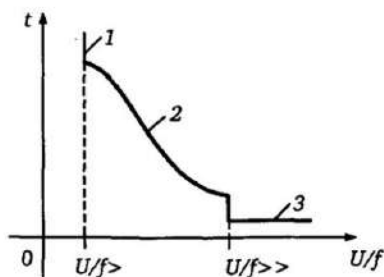


Рис. 9.14 Характеристика защиты генератора от перевозбуждения

**Защиты от понижения (повышения) частоты.** Многоступенчатые защиты от повышения (понижения) частоты обеспечивают функционирование генератора в допустимом рабочем диапазоне частот. Понижение частоты возникает при дефиците активной мощности в сети или неправильной работе регулирующих частоту (число оборотов генератора) систем. Повышение частоты является, в основном, следствием неселективных отключений, приводящих к превышению генерируемой мощностью мощности, потребляемой в сети. Одновременно обеспечивается контроль напряжения сети, при недопустимом снижении которого измерение частоты блокируется. Ступенчатые характеристики с несколькими уставками по частоте и времени обеспечивают согласование времени отключения со значением повышения (понижения) частоты.

**Защита по скорости повышения (понижения) частоты ( $df/dt >$ ,  $df/dt <$ )** позволяет быстрее следить за изменениями частоты генератора и предупреждать развитие аварий. Данные защиты также выполняются многоступенчатыми с различными уставками по скорости изменения частоты и соответствующими выдержками времени.

## 9.5. Особенности защиты электродвигателей

Асинхронные и синхронные электродвигатели являются одними из основных потребителей электрической энергии. Релейная защита электродвигателей должна учитывать специфические свойства, связанные с наличием вращающихся частей (ротора) и прежде всего с режимами пуска и торможения. При реализации защитных функций электродвигателей необходимо учитывать, как и в защитах генераторов, внутренние повреждения обмотки статора и сверхтоки, возникающие при внешних КЗ и перегрузках.

**Защиты от многофазных КЗ в обмотке статора** должны обеспечивать отключение электродвигателя по возможности с минимальным временем срабатывания. Для этой цели используется максимальная токовая защита с зависимой и независимой выдержкой времени (см. §4.2). При этом для быстрого отключения при сверхтоках КЗ используется токовая отсечка, отстраиваемая по току срабатывания от максимального значения пускового тока в момент включения двигателя. Остальной диа-



пазон возможных токов КЗ перекрывается ступенями МТЗ с независимой выдержкой времени и МТЗ с зависимой выдержкой времени, отстраиваемыми своими уставками по току и времени от пусковых токов электродвигателя.

Дифференциальная защита применяется на двигателях сравнительно большой мощности, а также в случаях, когда МТЗ и токовая отсечка не обеспечивают необходимую чувствительность к внутренним междуфазным КЗ, ввиду необходимости отстройки от пусковых токов.

**Функция динамического переключения параметров** [9] обеспечивает загрузку защиты на определенное время при включении электродвигателя после предшествующей паузы и тем самым позволяет повысить чувствительность к КЗ. При этом генерируется сигнал *Параметры D*, который по признаку наличия предшествующей паузы в подаче напряжения питания переключает уставки МТЗ, обеспечивая недействие защиты во время последующего пуска. Рисунок 9.15 поясняет данный принцип.

Уставкой  $I_{к1} >$  контролируется отсутствие тока (отключенное состояние двигателя). При снижении всех токов ниже значения  $I_{к1} >$  запускается элемент выдержки времени с уставкой  $T_1$  который переключает триггер, генерирующий сигнал *Параметры D* для загрузки параметров защиты. При включении двигателя, контролируемом превышением током уставки  $I_{к1} >$ , запускается элемент выдержки времени с уставкой  $T_2$ , который через время  $T_2$  обеспечивает возврат триггера и возврат МТЗ к «нормальным» чувствительным уставкам при условии, что контролируемый ток двигателя в данный момент меньше значения  $I_{к2} >$ , соответствующего пусковому току двигателя. Таким обра-

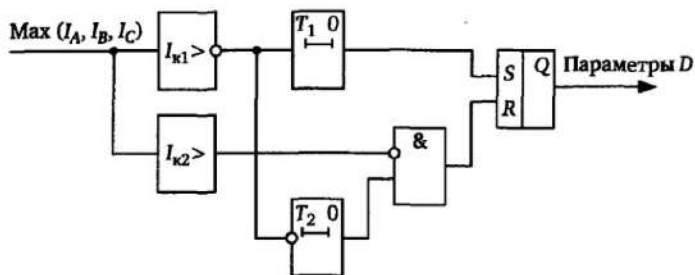


Рис. 9.15 Управление включением динамических параметров защиты электродвигателя

зом, уставкой  $I_{к2}$  контролируется окончание переходного режима пуска двигателя и возврат к чувствительным уставкам.

**Защиты от замыканий на землю в обмотке статора** зависят от вида заземления нейтрали сети и принципиально не отличаются от описанных в гл. 4. В сетях с большим током КЗ на землю применяется токовая защита, реагирующая на ток  $3I_0$  (см. например рис. 4.19,б). Так как емкость обмотки статора обычно намного меньше результирующей емкости сети, возможно использование ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности (см. §4.4) и в сетях с малым током замыкания на землю. В особых случаях соизмеримости емкостей двигателя и сети необходимо использование направленной токовой защиты нулевой последовательности, либо защиты, реагирующей на активную составляющую тока нулевой последовательности (см. §4.6).

**Защиты по току обратной последовательности.** Ток обратной последовательности возникает как при несимметричном питании, так и при обрыве фазы или несимметричном КЗ. Как электрическая машина с вращающимся ротором двигатель имеет значительно меньшее сопротивление для составляющих обратной последовательности, зависящее от скольжения. Поэтому составляющая тока обратной последовательности, возникающая в обмотке ротора и имеющая более высокую частоту ввиду обратного направления вращения относительно поля статора, приводит к увеличению тепловых потерь двигателя и его разогреву. К такому же результату приводит и обрыв фазы двигателя во время пуска или работы под нагрузкой, а также неправильное чередование фаз. Общие принципы выполнения защиты на основе измерения симметричных составляющих тока  $I_2$ , в том числе выполнение защиты от обрыва фазы, рассмотрены в §4.3.

**Защита от снижения напряжения.** Устойчивость работы двигателя зависит от значения и длительности снижения напряжения. Чем кратковременнее и меньше снижение напряжения, тем более благоприятны условия для самозапуска двигателя при восстановлении напряжения. В зависимости от типа двигателя и характера нагрузки определяются условия по снижению напряжения, при которых повторный запуск двигателя невозможен и двигатель необходимо отключить, обеспечив при этом функционировании других объектов сети.

Для этой цели используются защиты с контролем глубины сни-

жения напряжения, которые могут иметь ступени как с независимой выдержкой времени, так и с выдержкой времени, зависящей от глубины снижения напряжения, в частности [25]

$$t = \frac{T_{уст}}{1 - \frac{U}{U_{уст}}}, \quad (9.4)$$

где  $T_{уст}$  — параметр, определяющий масштаб времени отключения;  $U$  — измеряемое фазное напряжение;  $U_{уст}$  — уставка защиты по напряжению.

Данная защита должна автоматически выводиться из действия при отключении двигателя или при неисправности цепей напряжения.

**Защита от тепловой перегрузки** может быть выполнена на основе использования МТЗ с зависящей от тока выдержкой времени (см. § 4.2) или на основе дифференциального уравнения (5.6) нагрева двигателя со структурой, приведенной на рис. 5.3. При этом возможно использование токового контроля перегрева двигателя при пуске (см. рис. 5.5) с характеристикой на основе выражения (5.22).

При повторяющихся с короткими паузами пусках двигателя возможен перегрев обмотки ротора. Вопросы автоматического контроля числа пусков двигателя на основе решения дифференциального уравнения нагрева и структура защиты рассмотрены в § 5.4 (см. рис. 5.8).

**Защита от потери синхронизма.** Традиционный способ выполнения защиты двигателя от потери синхронизма — фиксация периодических колебаний тока статора [3]. Другим критерием может являться потребление синхронным двигателем в асинхронном режиме сравнительно большого тока с низким коэффициентом мощности  $\cos \phi$  [25].

## Глава 10

# Вспомогательные функции цифровой релейной защиты

### 10.1. Фиксация места повреждения

Фиксация места повреждения на линии входит в объем функций многих цифровых устройств релейной защиты, содержащих блоки измерения напряжения и тока. Наличие данной функции существенно облегчает и ускоряет нахождение места повреждения и устранение аварии. В настоящее время имеется тенденция к интегрированию фиксаторов места повреждения (ФМП) в устройства РЗ, прежде всего в дистанционные защиты. Технической основой для этого является высокая производительность современных средств микропроцессорной техники, обеспечивающая быстрое выполнение необходимого объема измерений. По виду используемой информации можно выделить односторонние и двусторонние ФМП.

**Односторонние ФМП.** К данному виду ФМП относятся устройства на основе использования информации о токах и напряжениях, имеющихя в месте их установки. Для определения места повреждения используется преимущественно дистанционный принцип измерения составляющих комплексного сопротивления  $Z = U/I = R + jX$  на входе устройства. В простейшем случае металлического КЗ или КЗ через сопротивление  $R_{\text{д}}$  на линии с односторонним питанием реактивная составляющая  $X$  пропорциональна удаленности места КЗ. Таким образом, при известном удельном сопротивлении линии  $R_{\text{уд}}$ , Ом/км, искомое расстояние  $l$  до места КЗ  $l = X/X_{\text{уд}}$ , где  $X$  — измеренная устройством реактивная составляющая входного сопротивления.

Для получения достаточно точных результатов ФМП не всегда используют данные, полученные при расчете составляющей  $X$  для дистанционной защиты, даже в том случае, когда эти данные имеются. Указанное связано с тем, что требования быстродействия, предъявляемые к дистанционной защите обуслов-

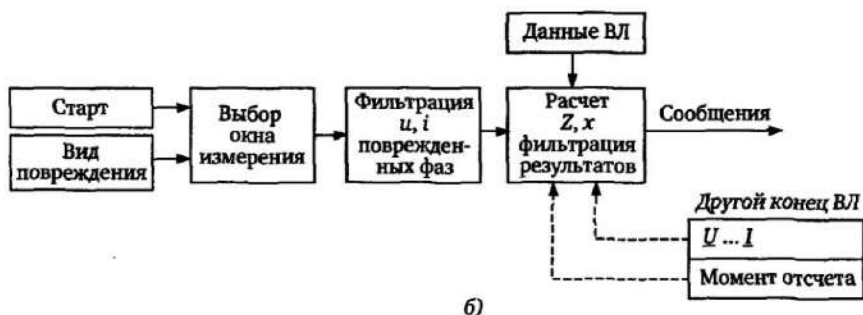
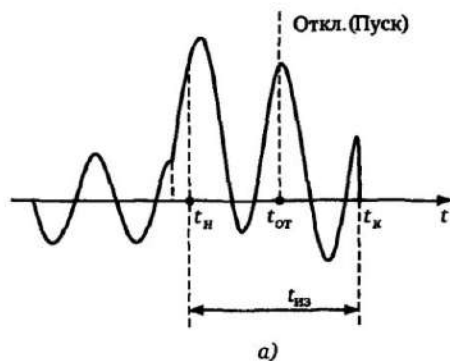


Рис. 10.1. Фиксация места повреждения:  
 а — выбор окна измерения; б — структура вычислений

ливают достаточно специфичную фильтрацию токов и напряжений ввиду дефицита времени, необходимого для измерения и формирования команды отключения. К ФМП таких жестких требований по времени измерения не предъявляется, так как их выходные данные могут использоваться и после отключения повреждения. Указанное позволяет произвести более качественную фильтрацию токов и напряжений для отстройки от аperiodических и гармонических составляющих в целях получения результатов более высокой точности.

Важное значение для достижения необходимой точности имеет длительность наблюдаемого ФМП процесса КЗ, от которой зависит количество поступающей информации (окно измерения  $t_{из}$ , рис. 10.1,а).

При очень быстром отключении КЗ какой-либо из быстродействующих защит (например, за время полупериода промышленной частоты) быстродействующим силовым выключателем ко-

личество накопленных ФМП выборок тока  $i$  и напряжения  $u$  может быть недостаточным для качественной фильтрации и результат не будет являться точным. Существует минимальная длительность окна измерения  $t_{из\ min}$ , при которой измерения ФМП допустимы.

Принцип функционирования одностороннего ФМП поясняет рис. 10.1. Запуск ФМП (старт) обеспечивается от одной из защитных функций при встроеном ФМП или от специального пускового органа при независимом ФМП. При этом для проведения операций с токами и напряжениями, соответствующими поврежденным фазам, необходима информация о виде повреждения, т.е. селекция поврежденных фаз (см. §7.11).

В общем случае ФМП может запускаться как по команде отключения выключателя, так и при пуске защиты, соответствующем возникновению КЗ. Текущие выборки тока и напряжения непрерывно накапливаются и обновляются в отдельном блоке памяти. На основе анализа текущих значений тока и напряжения определяется момент размыкания контактов выключателя  $t_k$  (исчезновение тока на рис. 10.1,а) и фиксируется окно измерения с временем  $t_{из}$  между началом измерения  $t_n$  и концом  $t_k$ , определяющее выборки  $u$ ,  $i$ , используемые при расчете расстояния до места повреждения.

При большой длительности существования неотключенного КЗ целесообразно сдвинуть окно измерения к концу, так как это соответствует большему затуханию свободных составляющих переходных процессов в токе и напряжении. Длительность окна измерения обычно находится в пределах 3—4 периодов промышленной частоты. При быстром отключении КЗ окно измерения сокращается до 0,8—1 периода, а при еще более быстром отключении КЗ и соответствующем уменьшении  $t_{из}$  точность не всегда может быть достигнута и ФМП формирует в этом случае сообщения о невозможности фиксации места повреждения. При выбранном окне измерения производится фильтрация значений  $u$ ,  $i$  на основе имеющихся выборок, расчет составляющих комплексного сопротивления  $z$ , с учетом введенных данных удельного сопротивления линии, расчет расстояния до места КЗ. При неоднородной линии, состоящей из отрезков с различным удельным сопротивлением, в ФМП должны вводиться данные по длине отрезков и удельному реактивному сопротивлению каждого из них. Указанное является достаточным для определения рас-

стояния до места повреждения при вычисленном общем значении  $X$ .

На протяжении длительности окна измерения ФМП производит несколько текущих измерений сопротивления, которые в общем случае неодинаковы. Поэтому должна проводиться фильтрация измерений (например, отбрасывание крайних значений, усреднение и т.д.) для получения наиболее достоверных результатов. Как показано в §7.3, при КЗ с электрической дугой на линии с двухсторонним питанием возможны существенные искажения замера, возрастающие с длиной линии и при увеличении нагрузки. При этом существенно изменяются как активная  $R$ , так и реактивная  $X$  составляющие замера комплексного сопротивления. С учетом этого для одностороннего ФМП целесообразна корректировка  $Z$ -измерений, описанная в п. 7.3.4.

Эффективной для одностороннего ФМП на параллельных линиях является также корректировка замера при однофазных КЗ (см. §7.5), когда вследствие влияния составляющей тока нулевой последовательности, протекающего по параллельной линии, существенно искажается соответствие между измеренным сопротивлением и расстоянием до места КЗ. Возможны случаи, когда выбор поврежденных фаз при КЗ затруднителен, и вычисляются параллельно несколько петель повреждения. В этом случае выбирается замер, соответствующий минимальному значению реактивного сопротивления.

**Двусторонние ФМП.** Основной недостаток односторонних ФМП — принципиальная невозможность в общем случае точно определить расстояние до места повреждения при дуговых повреждениях и транзите мощности ввиду отсутствия данных о параметрах сети на противоположном конце линии. Учитывая, что эквивалентные параметры сети могут изменяться как в процессе эксплуатации, так и непосредственно во время аварии в ЭС, применение в ФМП алгоритмов, требующих введения данных о параметрах сети, может вызвать серьезные затруднения при оценке результатов. Поэтому наиболее эффективными являются алгоритмы ФМП, использующие информацию о токах и напряжениях, возникающих при КЗ на обоих концах защищаемой линии.

В частности, в защите ВЛ 7SD5 [9] реализован автоматический обмен информацией о токах и напряжениях по концам защищаемой линии непосредственно при возникновении КЗ на основе каналов передачи сигналов продольной дифференциаль-

ной защиты (см. рис. 6.18). При этом функции двустороннего ФМП выполняются одновременно с функциями дистанционной и дифференциальной защиты ВЛ. Функционирование ФМП основано на средствах быстрого обмена цифровыми сигналами, соответствующими векторам, характеризующим входные величины переменного тока по концам ВЛ, причем указанными величинами могут быть как токи, так и напряжения по концам ВЛ. Как и для односторонних ФМП, формируется интервал измерения  $t_{из}$  (см. рис. 10.1,а) и путем цифровой фильтрации с использованием выборок мгновенных значений  $u, i$  рассчитываются вектора, соответствующие токам и напряжениям на входе защиты. Защиты по концам ВЛ обмениваются данными о рассчитанных векторах, причем важным является коррекция искажений и запаздывания, вносимого каналом связи. Необходимо также коррекция при расчете по обоим концам ВЛ соответствующих векторов, учитывающая несинхронность вычислений в обоих устройствах. С учетом этого, при передаче значений векторов на противоположный конец производится синхронизация векторов, их коррекция по частоте и дополнительно передаются данные о моменте времени и длительности окна измерения.

При наличии информации о токах и напряжениях на противоположном конце ВЛ не обязательно применение дистанционного принципа. Определение расстояния до места КЗ, в частности, может быть основано на том, что при КЗ на защищаемой линии напряжение в точке КЗ минимально и имеет одинаковое значение при его наблюдении (измерении) с любого из обоих концов ВЛ. Одним из вариантов является использование симметричных составляющих токов и напряжений прямой последовательности по концам  $A$  и  $B$  линии [9], что позволяет наиболее простым способом определить расстояние до места повреждения при любом виде КЗ.

Если  $\underline{U}_{1A}, \underline{I}_{1A}$  — соответственно вектора напряжения и тока прямой последовательности на стороне  $A$  линии (рис. 10.2);  $\underline{U}_{1B}, \underline{I}_{1B}$  — такие же вектора на стороне  $B$  линии, то напряжение в месте КЗ  $\underline{U}_{1x}$ , вычисляемое по данным стороны  $A$  для протяженной ВЛ с учетом соотношений (7.21)—(7.23) равно:

$$\underline{U}_{1x}^A(l_x) = \underline{U}_{1A} \operatorname{ch} \gamma l_x - \underline{Z}_c \underline{I}_{1A} \operatorname{sh} \gamma l_x. \quad (10.1)$$



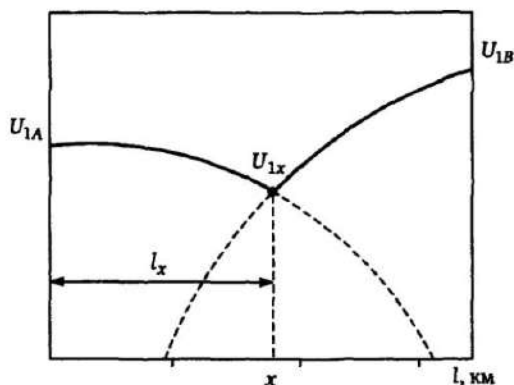


Рис. 10.2. К расчету места повреждения при двустороннем ФМП

При вычислении  $\underline{U}_{1x}$  на основе данных на противоположной стороне линии В имеем аналогичное соотношение:

$$\underline{U}_{1x}^B(l_x) = \underline{U}_{1B} \operatorname{ch} \gamma(l - l_x) - \underline{Z}_c I_{1B} \operatorname{sh} \gamma(l - l_x). \quad (10.2)$$

В приведенных соотношениях:  $l$  — длина ВЛ;  $l_x$  — расстояние до места КЗ от конца А линии;  $\underline{Z}_c$ ,  $\gamma$  — определяются соотношениями (7.22), (7.23).

Так как устройства ФМП по концам линии обмениваются значениями  $\underline{U}_{1A}$ ,  $I_{1A}$ ,  $\underline{U}_{1B}$ ,  $I_{1B}$ , то, производя расчеты на основе (10.1), (10.2) на каждом из концов линии, получим, что искомому значению  $l_x$  соответствует равенство нулю или минимум функции, равной разности вычисленных напряжений, т.е.

$$E(l_x) = \underline{U}_{1x}^A(l_x) - \underline{U}_{1x}^B(l_x) = \min. \quad (10.3)$$

Указанное упрощенно пояснено на рис. 10.2. Таким образом, решая нелинейное уравнение (10.3) с использованием данных о напряжениях и токах противоположной стороны, можно определить место КЗ независимо от значений переходного сопротивления и передаваемой мощности. Дополнительным преимуществом такого решения является отсутствие использования нулевой последовательности даже при расчете удаленности КЗ на землю. Это существенно облегчает и уточняет расчеты ввиду того, что точное определение этих параметров нулевой последовательности затруднительно.

Наличие параллельных линий и транспозиции также вносит несущественные погрешности вследствие отсутствия необходимости использования составляющих нулевой последовательности. Применение составляющих прямой последовательности не является единственно возможным вариантом при выявлении места КЗ, — возможно использование других преобразований токов и напряжений на обоих концах ВЛ. Обычно выходными данными ФМП являются как измеренное расстояние, так и вид повреждения и измеренное значение результирующего комплексного сопротивления.

## **10.2. Контроль исправности цифровых защит**

Сравнительно высокая надежность цифровых защит не исключает целесообразности использования в них средств самоконтроля исправности, снижающих вероятность отказа в функционировании и излишнего срабатывания. При этом расширение возможности анализа цифровой информации, используемой при функционировании ЦРЗ, существенно расширяет функции самоконтроля исправности как аппаратных, так и программных средств. Ниже рассматриваются некоторые решения в части самоконтроля исправности ЦРЗ [9].

### ***10.2.1. Элементы контроля исправности аппаратных и программных средств***

**Контроль напряжения питания и АЦП** осуществляется внутренними аппаратными средствами. Контролируется напряжение питания процессора, при снижении которого ниже допустимого уровня ЦРЗ блокируется и генерируется соответствующий сигнал. Сам процессор контролирует опорные напряжения и АЦП, необходимые для обеспечения измерений.

Контролируется также исправность батареи автономного питания, обеспечивающей сохранение необходимой информации (параметры, уставки, сообщения) после отключения напряжения питания, что позволяет ЦРЗ нормально функционировать после восстановления питания.

**Контроль элементов памяти** микропроцессорной системы обеспечивается как при подаче напряжения питания (запуск системы), так и в процессе функционирования. Различные блоки памяти процессорной системы контролируются путем формиро-

вания промежуточных сумм, сравниваемых с контрольными суммами. Сигнализация сообщает об обнаруженных неисправностях, и в необходимых случаях производится блокирование защитных функций.

**Контроль исправности внутренних токовых цепей.** Для защит с подсоединением к цепям трансформатора тока по схеме «звезды» (рис. 10.3,а) сумма всех измеряемых токов теоретически равна нулю.

Указанное означает, что нулю должна быть равна и сумма вычисленных ЦРЗ векторов, соответствующих всем подводимым токам. Неисправность в цепях тока внутри защиты возникает, с учетом неидеальности измерений и возможных небалансов, в случае, если сумма всех измеряемых токов существенно отличается от нуля. Указанному соответствует условие

$$I_F = |I_A + I_B + I_C + kI_0| \geq a_1 I_{\text{ном}} + a_2 I_{\text{max}}, \quad (10.4)$$

где  $a_2 = \text{tg} \alpha$  (рис. 10.3,б).

При этом коэффициент  $k$  учитывает возможную неодинаковость коэффициентов передачи промежуточных трансформаторов  $T1$ — $T3$  в цепях фаз и  $T4$  в цепи нулевого провода. Коэффициент  $a_1$  определяет постоянный небаланс измерений, независящий от значения входных токов, а коэффициент  $a_2$  — рост возможного небаланса, определяемого неидеальностью трансформаторов  $T1$ — $T4$  и измерительной частью, одновременно с ростом уровня токов (максимального из токов  $I_{\text{max}}$ ).

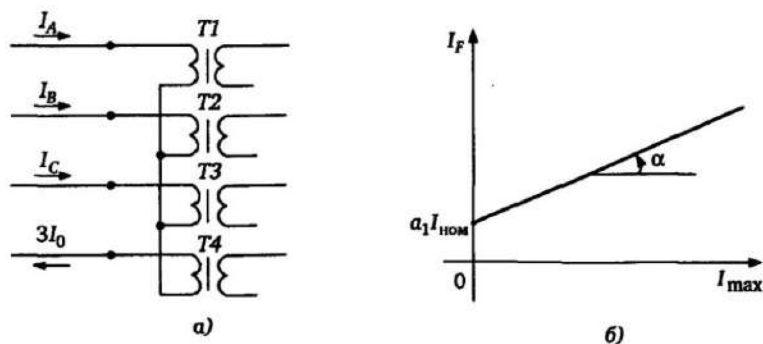


Рис. 10.3. Контроль исправности токовых цепей ЦРЗ

**Контроль цепей отключения.** Возможность фиксации с помощью дискретных логических входов (см. рис. 1.16) наличия (отсутствия) постоянного напряжения позволяет контролировать исправность катушки отключения  $L$  силового выключателя  $Q$  и его реакцию на отключающий сигнал с использованием вспомогательного контакта  $BK$  (рис. 10.4).

При этом цепь отключения управляется контактом выходного реле защиты  $K$ , параллельно которому подсоединен дискретный вход  $BE1$ . Другой дискретный вход  $BE2$  подсоединен параллельно вспомогательному контакту  $BK$ . Напряжение, подводимое к катушке отключения  $L$ , должно быть, по крайней мере, в 2 раза больше, чем напряжение переключения дискретных входов  $BE1$ ,  $BE2$ , чтобы обеспечить их правильное функционирование при последовательном подключении к цепи питания. В табл. 10.1 показаны состояния дискретных входов  $BE1$  и  $BE2$  (0 — отсутствие напряжения; 1 — наличие напряжения) для четырех возможных режимов, характеризующих состояние выключателя  $Q$  и контакта выходного реле защиты  $K$  (0, 1 — разомкнутое и замкнутое состояния соответственно).

Рабочими являются режимы 1 и 2 при разомкнутом контакте  $K$  выходного реле. В исправной цепи при включенном выключателе ( $Q = 1$ ) вход 1 находится под напряжением ( $BE1 = 1$ ), а вход 2 — без напряжения ( $BE2 = 0$ ). При разомкнутом выключателе  $Q$  оба дискретных входа находятся под напряжением ( $BE1 = 1$ ,  $BE2 = 1$ ). При разрыве цепи обмотки  $L$  напряжение исчезает с обоих дискретных входов ( $BE1 = 0$ ,  $BE2 = 0$ ). Такое же состояние имеет место в режиме 3 при замкнутом выключателе и сработавшем выходном реле ( $Q = 1$ ,  $K = 1$ ). Однако режим 3 может существовать лишь кратковременно вследствие того, что контакт выходного реле не может быть длительно замкнут. При обрыве цепи отключения этот режим существует длительно. Поэтому наличие элемента задержки по времени в тракте сигнализации режима 3 позволяет селективно выявить неисправность в цепи отключения выключателя. Включенное и отключенное состояния выключателя контролируется режимами 1 и 2 ( $BE1 = 1$ ,  $BE2 = 0$  и  $BE1 = 1$ ,  $BE2 = 1$ ). Контроль во всех случаях осуществляется фиксацией состояний входов и выдачей соответствующих сообщений.

**Непрерывный контроль текущих программ.** При прекращении правильного выполнения внутренних программ контроли-

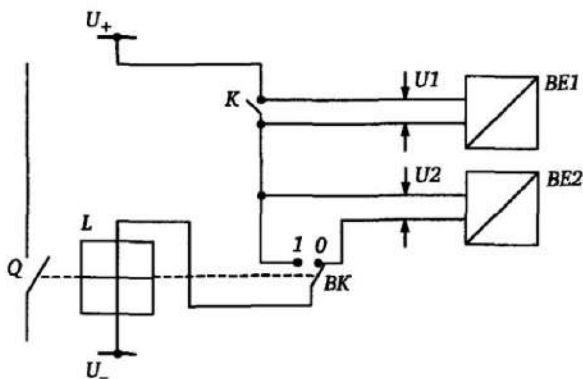


Рис. 10.4. Вариант контроля цепи отключения

Таблица 10.1. Диаграмма состояний цепи отключения

Режим	K	Q	BK	BE1	BE2
1	0	1	1	1	0
2	0	0	0	1	1
3	1	1	1	0	0
4	1	0	0	0	1

руется длительность возникшей паузы, а затем производится возврат процессора в исходное состояние и повторный запуск. В случае неустранимой неисправности производится аналогичная операция. После заданного числа перезапусков ЦРЗ блокируется с выдачей соответствующего сообщения.

### 10.2.2. Контроль исправности внешних цепей переменного тока и напряжения

**Контроль симметрии токов и напряжений.** В трехфазных сетях одним из факторов, характеризующих исправность входных цепей тока и напряжения (отсутствие обрывов или КЗ) является симметричность входных трехфазных сигналов. При КЗ на защищаемом объекте эта симметричность нарушается, но восстанавливается снова после ликвидации КЗ. Поэтому наличие симметрии входных токов и напряжений при их определенном уровне характеризует исправность входных измерительных

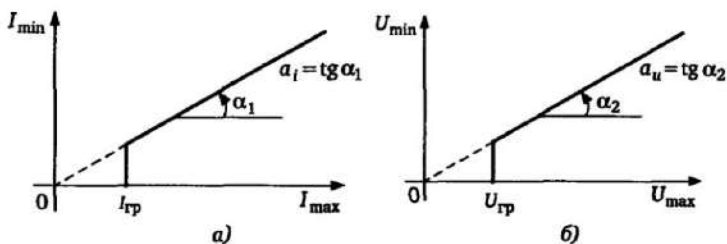


Рис. 10.5. Характеристика устройств контроля симметрии токов (а) и напряжений (б)

цепей. При нарушении симметрии соответствующий сигнал о неисправности измерительных цепей должен генерироваться с выдержкой времени, отстроенной от максимально возможной длительности ликвидации повреждений в ЭС. Условия фиксации повреждений в цепях тока и напряжения по критерию симметрии имеют соответственно вид (рис. 10.5):

$$I_{\min} \leq a_i I_{\max} \text{ при } I_{\max} > I_{\text{гр}}; \quad (10.5)$$

$$U_{\min} \leq a_u U_{\max} \text{ при } U_{\max} > U_{\text{гр}}. \quad (10.6)$$

где  $I_{\text{гр}}$ ,  $U_{\text{гр}}$  — граничные значения тока и напряжения, фиксирующие минимальные уровни сигналов, при которых критерий симметрии может быть применен;  $a_i = \text{tg} \alpha_1$ ,  $a_u = \text{tg} \alpha_2$  (рис. 10.5). Использование критерия симметрии как отношения минимального и максимального значений эффективно, ввиду необходимой отстройки от небалансов и помех, лишь при достаточном уровне сигналов, определяемом значениями  $I_{\text{гр}}$ ,  $U_{\text{гр}}$ .

**Фиксация неисправности в цепях напряжения.** Неисправности в измерительных цепях напряжения, подводимых к устройствам РЗ (обрывы, КЗ) могут приводить как к отказу, так и к излишнему срабатыванию определенных функций защиты, связанных с измерением напряжения. В частности, обрыв цепей напряжения во многих случаях, особенно при протекании токов нагрузки ВЛ, приводит к срабатыванию отдельных ступеней дистанционной защиты, воспринимающей исчезновение напряжения как КЗ на ВЛ вблизи места установки защиты. Использование цифровой техники расширяет возможности быстрой фиксации неисправностей в цепях напряжения. Вариант цифровой структуры с фиксацией неисправности в цепях напряжения, в

том числе и при одновременном обрыве трех фаз [45] представлен на рис. 10.6.

В основу функционирования положено принципиальное отличие режима повреждения цепей напряжения от режима КЗ, заключающееся в том, что возникновение КЗ сопровождается скачкообразным изменением измеряемого защитой тока. При этом производится контроль следующих условий:

- превышение измеряемым приращением тока значения  $\Delta I$  (элементы 1—3);
- нахождение максимального из токов ниже порога  $I_p < (\sim 1,2I_{\text{НОМ}})$ , соответствующего максимальному рабочему току (элемент 8);

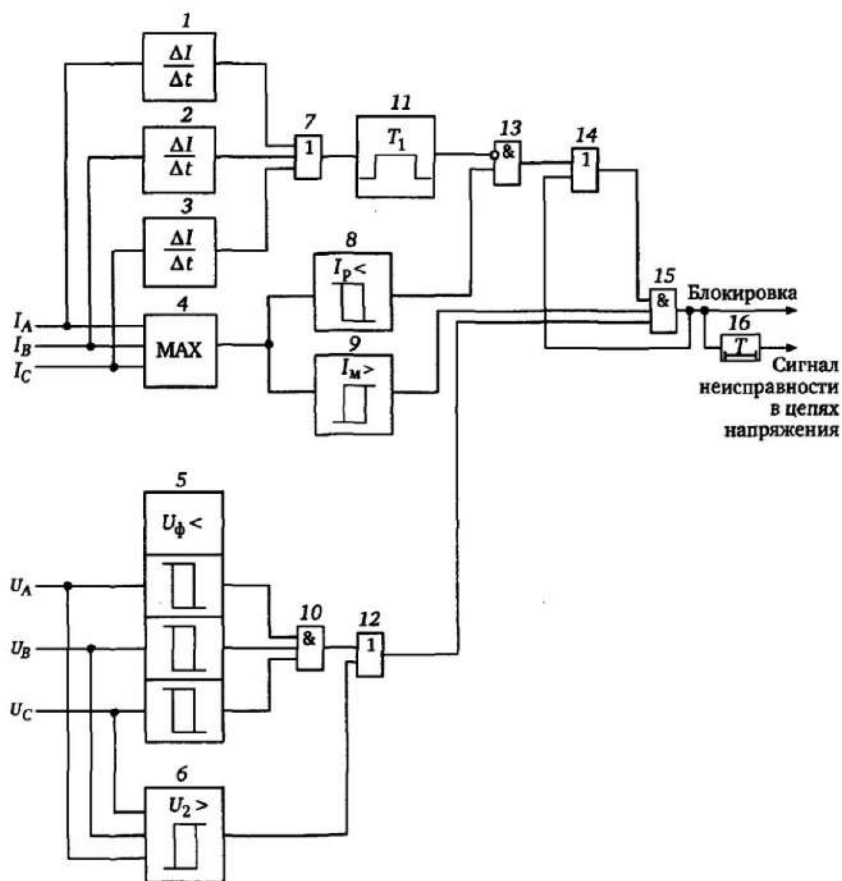


Рис. 10.6. Фиксация неисправности в цепях напряжения ЦРЗ

- нахождение минимального из токов выше порога  $I_m > (\sim 0,05I_{ном})$ , соответствующего минимальному току функционирования защиты (элемента 9);
- одновременное снижение напряжений трех фаз ниже порога  $U_\phi < (-0,5 \text{ В})$ , соответствующего обрыву трех фаз (элементы 5, 10);
- превышение напряжением обратной последовательности порога  $U_2 >$ , соответствующее несимметричному повреждению цепей напряжения, например, обрыву одной или двух фаз (элемент 6).

Элементы 1—3, достаточно чувствительны и выявляют скачкообразное изменение тока во всем диапазоне возможных токов КЗ. При запуске хотя бы одного из элементов  $\Delta I/\Delta t$  запускается расширитель импульсов 11 на время  $T_1$  (примерно 10 с), с запасом большее возможной длительности существования КЗ. При этом через элементы 14 и 15 при возникновении КЗ запрещается блокировка защиты и сигнализация о неисправности в цепях напряжения. Аналогичное влияние оказывает превышение одним из токов значения  $I_p <$  (элемент 8), превышающего с определенным запасом ток в максимальном режиме нагрузки. Указанные меры обеспечивают отсутствие блокирующего сигнала при возникновении КЗ.

При несимметричном обрыве цепей напряжения возникает напряжение обратной последовательности  $U_2$ , приводящее к активированию элемента 12 (ИЛИ) и к возникновению сигнала 1 на входе элемента 15 (И). Если рабочий ток объекта превышает минимальный порог  $I_m > (\sim 0,05I_{ном})$ , то на входе элемента 15 также возникает разрешающий сигнал. Так как повреждение в цепях напряжения и одновременный скачок тока практически не возникают одновременно, то расширитель импульсов  $T_1$  (элемент 11) не запускается, а фазные токи имеют значение меньшее уставки элемента 8  $I_p <$ . С учетом этого от рассматриваемого канала через элемент 14 (ИЛИ) поступает также разрешающий сигнал на вход элемента 15 (И). Таким образом, при несимметричной неисправности в цепях напряжения без замедления формируется блокирующий сигнал и сигнал сигнализации на входе элемента 15 (И).

При трехфазном обрыве цепей напряжения несимметрия напряжений отсутствует. Однако одновременное снижение трех фазных напряжений ниже порога  $U_\phi <$  приводит также к пере-



ключению элемента 12 (ИЛИ) и возникновению блокирующего сигнала на выходе элемента 15 (И). Блокирующий сигнал самоудерживается (связь между выходом элемента 15 и входом элемента 14) до восстановления симметрии напряжений (элементы 5, 6) или же до отключения линии (и исчезновения тока, контролируемого элементом 9). Самоудерживание необходимо во избежание снятия блокирующего импульса с защиты при скачкообразном изменении тока, вызванном, например, коммутацией нагрузки в сети.

Элемент 9, контролирующий минимальный уровень протекания тока, необходим для предотвращения возникновения блокирующих сигналов при отключенном выключателе линии, когда отсутствие напряжения на входе защиты будет восприниматься как неисправность.

Описанная структура правильно функционирует как в сетях с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью также происходит без возрастания тока через защиту. Однако блокирующий сигнал в этом случае не будет сформирован, так как уменьшиться до нуля только одно из фазных напряжений и не возрастет напряжение обратной последовательности.

### **10.3. Группы параметров и программируемая выходная логика**

**Группы параметров и уставок.** Параметры и уставки УРЗ соответствуют в общем случае определенной области режимов и конфигураций ЭС. В процессе эксплуатации возможны существенные изменения конфигурации ЭС, вызванные как плановыми отключениями (переключениями) элементов, например, выводом их в ремонт, так и аварийными ситуациями. При этом имеющиеся уставки и параметры УРЗ во многих случаях перестают соответствовать новым условиям и не могут обеспечить необходимой чувствительности и селективности.

В целях возможности реагирования на изменяющиеся требования и условия ЦРЗ могут переключаться на одну из нескольких групп параметров и уставок. Эти группы устанавливаются пользователем заранее. Каждая группа может быть быстро выбрана путем подачи на устройство защиты соответствующей команды. Рисунок 10.7 поясняет выбор любой из возможных

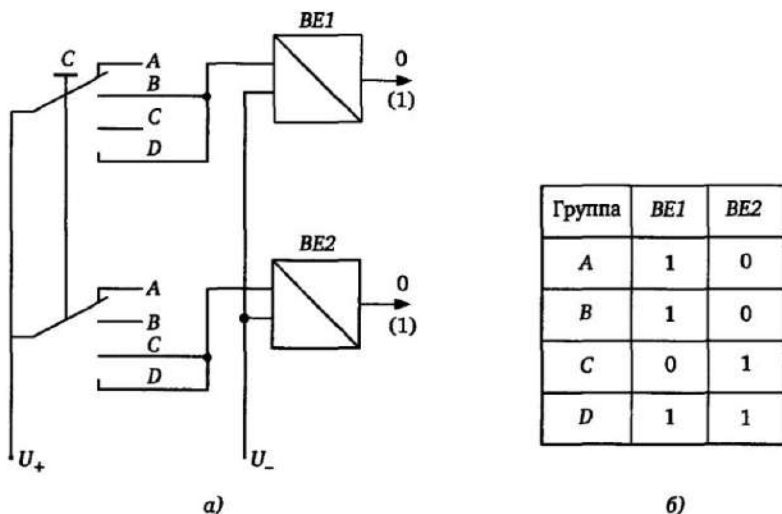


Рис. 10.7. Управление группами параметров и уставок с помощью дискретных входов: а — вариант схемы; б — таблица соответствия групп параметров и выходных сигналов

четырёх групп параметров уставок (A, B, C, D) с использованием двух дискретных входов BE1 и BE2 [9]. При этом каждой группе соответствует определенная комбинация сигналов входов.

Управление группами параметров и уставок возможно и другими путями — через клавиатуру или через порты управления устройством защиты извне. При этом возможно автоматическое переключение групп параметров и уставок в зависимости от выбранной фиксации событий, например, от сигналов, характеризующих изменение конфигурации сети или при команде ручного включения объекта. Последний вариант может использоваться, например, при включении двигателя в целях отстройки от пусковых токов или при ручном включении линии (имеется в виду, что в этом случае после заданного промежутка времени осуществляется возврат к прежней группе уставок).

В целях исключения неоднозначных ситуаций управление группами уставок целесообразно осуществлять в условиях отсутствия КЗ, т. е. блокировать переключение групп параметров и уставок при пуске ЦРЗ, фиксирующем возникновение КЗ.

**Гибкие логические конфигурации (свободно программируемая логика).** Логическая часть ЦРЗ является достаточно слож-

ной структурой, объединяющей различные измерительные функции и входные сообщения и формирующей различного вида выходные сигналы. Во многих случаях практически невозможно выполнить «типовую» логическую структуру ЦРЗ, учитывающую особенности применения на отдельных объектах и требования различных пользователей. С учетом этого, многие современные ЦРЗ выполнены таким образом, что дают возможность пользователю самому построить в определенном объеме дополнительные функциональные и логические структуры. С помощью специальных программных средств, входящих в общую обслуживающую программу, пользователь имеет возможность, используя графический интерфейс, построить дополнительные функции ЦРЗ. В качестве информационной базы свободно программируемой логики могут быть использованы: сигналы, непосредственно подводимые к дискретным входам ЦРЗ; сообщения, генерируемые отдельными функциями ЦРЗ; выходные сообщения; измеряемые ЦРЗ входные сигналы переменного тока. Библиотека свободно программируемой логики может содержать значительное количество различного типа элементов, позволяющих получить логические и измерительные функции. К этим элементам относятся: триггеры; различные логические функции (И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ—НЕ и т.п.); другие команды булевой логики; фиксаторы верхнего и нижнего пределов измеряемой входной величины; фиксаторы нулевого значения величины; компараторы; формирователи абсолютного значения величины; элементы выдержки времени с различными свойствами, например, расширители импульсов и т.п.; счетчики импульсов; элементы обратной связи; элементы арифметических действий; вспомогательные элементы для объединения отдельных блоков и графического построения схемы.

Для построения дополнительной функционально-логической схемы используется обычно только графический редактор и не требуется специального программирования. В рамках программы построения функционально-логической схемы пользователем выбираются необходимые элементы и формируются связи между ними, выбираются необходимые входные сигналы, принимаются обозначения элементов и определяются выходные сообщения. Одновременно может быть создано несколько законченных функционально-логических схем, которые запоминаются в ЦРЗ и вызываются при необходимости. Выходные сигналы созданных схем могут использоваться как сообщения и для

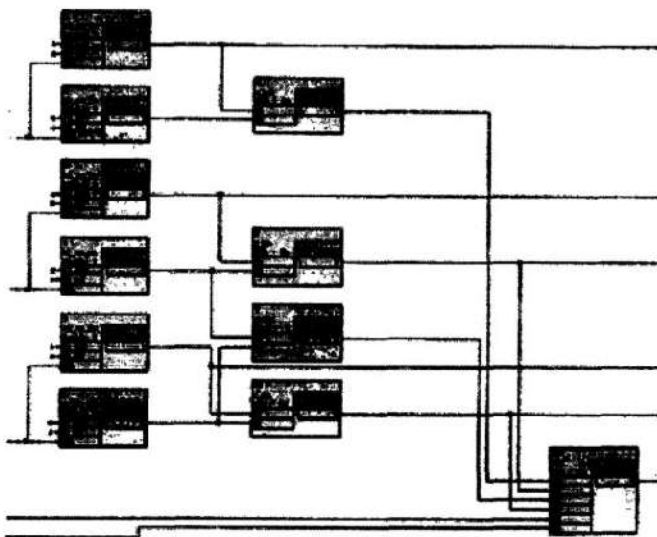


Рис. 10.8. Пример выполнения функционально-логической схемы на основе программируемой логики

программирования выходных реле ЦРЗ. В качестве примера на рис. 10.8 приведен вариант выполнения функционально-логической схемы [9].

## 10.4. Управление и обработка информации

### 10.4.1. Структура системы обмена информацией

Одним из основных преимуществ ЦРЗ является возможность коммуникации с удаленными объектами, что позволяет осуществлять дистанционное управление (изменение параметров, уставок, отключение) и оперативно получить необходимую информацию о входных величинах и состоянии ЦРЗ, а также о произошедших КЗ и других аварийных состояниях. Рисунок 10.9 поясняет организацию управления ЦРЗ и обмена информацией.

Имеющиеся в ЦРЗ коммуникационные интерфейсы позволяют организовывать каналы управления и обмен информацией между отдельными ЦРЗ и между ЦРЗ и пользователем. Функционирование коммуникационных интерфейсов обеспечивается специальными управляющими устройствами, подключаемыми к шинам обмена, и интерфейсными блоками самого ЦРЗ.

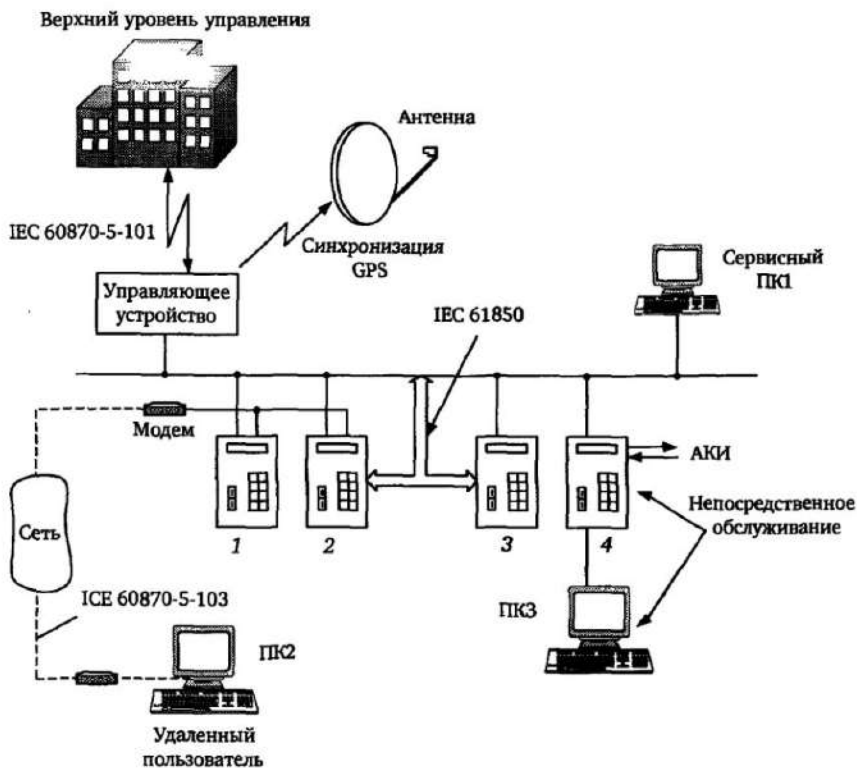


Рис. 10.9. Управление и обслуживание ЦРЗ

**Протокол интерфейса.** Вид и объем информации, её содержание, последовательность передачи (синхронизация данных), способ передачи и способ обмена информацией определяется протоколом коммуникационного интерфейса. От вида этого протокола зависит реализация устройства управления и блоков интерфейса в ЦРЗ. Обмен информацией с устройствами релейной защиты обеспечивается международными стандартными протоколами IEC 60870-5-103 и IEC 61850 (протокол Ethernet), учитывающими, помимо общих требований, специфические требования к релейной защите. Для передачи и обмена данными применяется ряд других протоколов, например, PROFIBUS, MODBUS, DNP 3.0, имеющих шинную топологию, используемую в различных системах управления и обеспечивающих быстрый обмен данными. Интерфейсные блоки ЦРЗ в зависимости от требова-

ний пользователя могут обеспечивать использование различных протоколов обмена. Объединение интерфейсных входов отдельных ЦРЗ может иметь различную топологию (например, шины, кольцо, звезда) и осуществляться с помощью электрической (например, адаптер RS485) или волоконно-оптической связи.

Для обмена информацией между управляющим интерфейсным устройством подстанции и верхним уровнем управления, которые могут находиться на значительном удалении друг от друга, используется специальный международный протокол IEC 60870-5-101. При организации управления и обслуживания ЦРЗ так, как показано на рис. 10.9 используются различные виды обмена информацией.

*Модемная связь* между верхним уровнем управления и удаленным устройством управления подстанции, осуществляемая с помощью протокола IEC 60870-5-101, обеспечивает передачу команд и запросов на информацию, получаемую управляющим устройством от ЦРЗ (сообщения, измерения). Управляющее устройство обеспечивает необходимый обмен информацией между подсоединенными к общей шине устройствами в соответствии с используемым протоколом обмена (в рассматриваемом случае IEC 61850), т.е. собирает (чаще всего автоматически) и передает информацию от ЦРЗ о возникающих авариях, а также другие сообщения. Оно обеспечивает также выполнение требуемых команд (например, отключение выключателя; изменение параметра), как формируемых оператором подстанции с использованием сервисного персонального компьютера (ПК) — ПК1, так и команд, приходящих с верхнего уровня.

Имеется возможность обслуживания удаленного пользователя ПК2 через модемную связь, подключаемую к отдельному порту ЦРЗ, например по протоколу IEC 60870-5-103 (считывание уставок, сообщений, выполнение команд). Такие же функции выполняются при непосредственном обслуживании на месте с помощью ПК3, подсоединяемому к сервисному порту ЦРЗ, или посредством клавиатуры на фронтальной стороне устройства.

Используемый в данном случае протокол обмена IEC 61850 позволяет осуществлять быстрый обмен информацией непосредственно между ЦРЗ 1—4, подключенными к общей шине. Указанное дает возможность путем непосредственного обмена сигналами от отдельных защитных функций различных устройств реализовать качественно новые свойства ЦРЗ. Данное решение

позволяет сократить число дискретных входов и выходов ЦРЗ и проводных соединений между ними.

Ряд современных ЦРЗ обладает специальным «активным» коммуникационным интерфейсом АКИ, обеспечивающим быстрый обмен данными об измеряемых входных токах, напряжениях и логических сообщениях. Подобный обмен используется при реализации быстродействующей продольной дифференциальной защиты ВЛ (см. гл. 6), защит абсолютной селективности на основе обмена сигналами (см. гл. 8), двухстороннего ФМП (см. гл. 9), телеотключения, передачи данных измерения с противоположной стороны. Сообщения по этому каналу также охватываются общей системой управления и обмена информацией.

#### **10.4.2. Виды и каналы передачи информации в ЦРЗ**

**Обслуживающие программы.** Сам принцип построения ЦРЗ и большой объем выполняемых ими функций определяет необходимость и эффективность в большинстве случаев использования ПК для обмена информацией с ЦРЗ — ввода и вывода данных. Это обеспечивается специальными обслуживающими программами, учитывающими специфику конкретных ЦРЗ. В основные функции обслуживающей программы входят следующие операции с ЦРЗ:

- установка (изменение) параметров, уставок, функций входов и выходов;
- чтение протоколов и протоколирование информации, определяющей состояние ЦРЗ (параметры, уставки) и различного вида сообщений и измерений;
- ввод различного вида команд для проверки и управления защищаемым объектом;
- связь с другими ЦРЗ через имеющийся интерфейс.

В функции обслуживающей программы входит также обработка вводимой и выводимой информации, расширяющая возможности пользователя, в том числе:

- ввод и управление группами параметров и уставок;
- изменение и введение новых функционально-логических схем с помощью свободно-программируемой логики;
- графическое представление (визуализация) характеристик срабатывания и отдельных функций ЦРЗ, облегчающее анализ;
- расширенный анализ информации, характеризующей возникающие КЗ и реакцию ЦРЗ (запись и обработка входных ве-

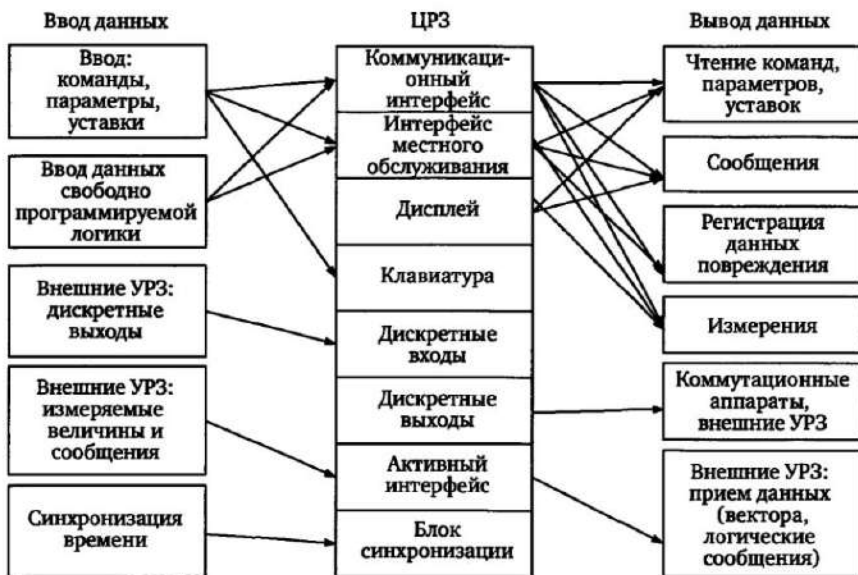


Рис. 10.10. Основные потоки информации в ЦРЗ

личин и сообщений, анализ осциллограмм, в том числе спектральный анализ, диаграммы изменения измеряемых параметров, реакция отдельных функций защиты). Использование обслуживающей программы возможно на основе коммуникационных протоколов для пользователей, находящихся на различных уровнях (см. рис. 10.9) — на централизованном управляющем уровне (*ПК1*), при удаленном пользователе (*ПК2*) и при непосредственном обслуживании ЦРЗ (*ПК3*).

Рисунок 10.10 поясняет основные потоки передаваемой в ЦРЗ и принимаемой из ЦРЗ информации, возникающие при функционировании и обслуживании ЦРЗ.

**Ввод параметров уставок, команд в ЦРЗ**, может быть произведен как непосредственно через клавиатуру ЦРЗ, так и через интерфейс местного обслуживания и коммуникационный интерфейс (см. рис. 10.9). При этом вводимыми командами можно производить управление состоянием силовых выключателей и других коммутационных элементов сети, программируя соответствующим образом функции выходных контактов ЦРЗ. Специальные команды опробования выключателей могут обеспечивать, например, цикл «отключить—включить» с контролем ре-



зультатов по состоянию вспомогательных контактов выключателей. При коммутации силового оборудования используются стандартные процедуры контроля допустимости ввода команды (защита от ошибочного включения) и последовательности выполнения операций переключения, контроля времени и результатов выполнения команды. В необходимых случаях производится проверка синхронизма перед включением, готовности ЦРЗ и изменение уставок ЦРЗ с учетом положения выключателя (ускорение при включении).

Через коммуникационный интерфейс с помощью обслуживающей программы строятся схемы свободно программируемой логики.

**Ввод дискретной информации от внешних устройств**, прежде всего от других ЦРЗ производится активизацией соответствующих дискретных входов защиты, запрограммированных на прием данной информации. Имеющиеся у некоторых ЦРЗ активные интерфейсы связи принимают текущую информацию об измеряемых величинах и действии отдельных функций (логические сигналы) от других защит объекта, в частности дифференциальных защит ВЛ (см. гл. 6).

**Синхронизация ЦРЗ** по текущему времени необходима для правильного действия защит с обменом сигналами, а также для согласования протоколов сообщений отдельных ЦРЗ. Для этого используется активный коммуникационный интерфейс и специальный интерфейс синхронизации времени (см. рис. 10.10)

**Вывод данных об уставках и параметрах ЦРЗ** также осуществляется через интерфейс местного обслуживания и коммуникационный интерфейс. Визуальный контроль этих данных может быть осуществлен на дисплее самого устройства при подаче соответствующих команд с клавиатуры.

**Сообщения ЦРЗ.** Сообщения ЦРЗ содержат текущую информацию о состоянии ЦРЗ и входных величинах, о возникших авариях и реакции на них. Можно выделить рабочие и аварийные сообщения.

**Рабочие сообщения** содержат информацию о текущем состоянии и готовности ЦРЗ и фиксируют во времени операции, связанные с изменением отдельных функций, выводом (вводом) устройства, возникновением неисправности, например, обрывом цепей напряжения или тока (см. §10.2).

**Аварийные сообщения** возникают при изменении контроли-

руемых ЦРЗ параметров ЭС, приводящих к запуску каких-либо защитных функций, прежде всего при КЗ. При этом фиксируются с достаточно высокой точностью по времени (погрешность обычно не превышает 1 мс) реакция (пуск, возврат) отдельных защитных функций, а также возникающие при этом сообщения и команды. Окончание фиксации возникающего повреждения происходит при возврате в исходное состояние всех запустившихся функций — при отключении либо защищаемого объекта, либо других элементов ЭС, приводящем к ликвидации аварийного состояния. Дополнительно возможна фиксация тока КЗ и удаленности места повреждения (при наличии в ЦРЗ фиксатора места повреждения).

Возможно формирование в ЦРЗ статистических сообщений, фиксирующих на основе обработки рабочих и аварийных показателей, таких как число включений и отключений выключателя, значения отключаемых токов, суммарную энергию при отключении ( $\int i^2 dt$ ) и т.п., т.е. показателей, необходимых для косвенного контроля состояния выключателя.

Объем запоминаемых рабочих и аварийных сообщений и их количество определяются объемом соответствующей буферной памяти ЦРЗ. Современные ЦРЗ запоминают сотни рабочих и аварийных сообщений, в том числе группы аварийных сообщений, каждое из которых соответствует возникновению одной аварийной ситуации.

Все рабочие и аварийные сообщения в виде специальных протоколов, отражающих их возникновение во времени, могут отображаться на экране дисплея ЦРЗ и через местный и коммуникационный интерфейсы могут быть переданы пользователям различного уровня.

**Регистрация и анализ повреждений.** Для полноценного анализа повреждений необходимо запоминание и воспроизведение измеряемых ЦРЗ величин, а также приходящих и формируемых логических сигналов в интервале времени, с запасом охватывающем период существования повреждения. С этой целью ЦРЗ содержит текущий буфер памяти, запоминающий на определенное время мгновенные значения измеряемых величин и при пуске ЦРЗ фиксирующий величины, начиная с начала заданного промежутка времени перед моментом пуска до окончания заданного промежутка времени после возврата ЦРЗ в исходное состояние. С помощью служебной программы обеспечивается графическое пред-

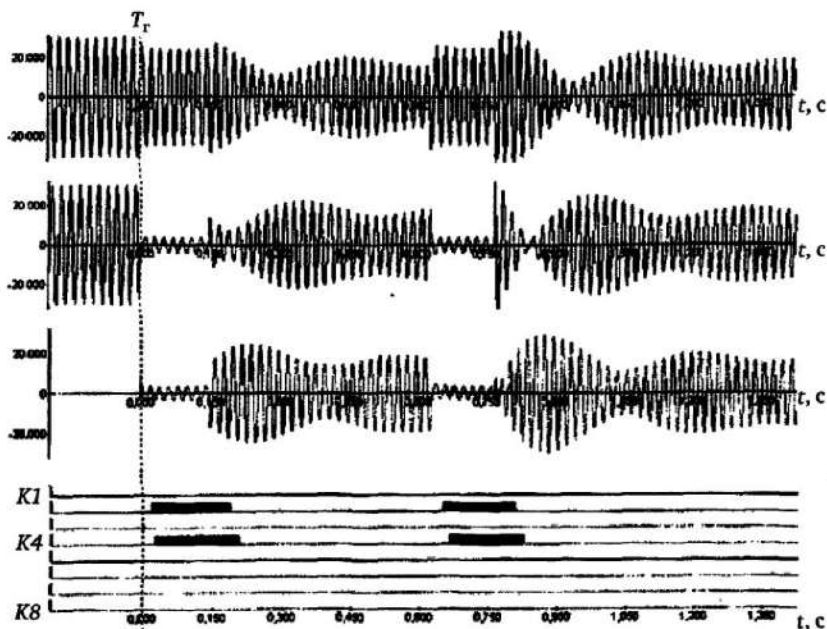


Рис. 10.11. Пример записи аварийных сигналов и сообщений

ставление результатов с фиксацией времени пуска защитных функций и возникновения основных команд и сообщений (рис. 10.11).

Отдельные служебные программы обладают дополнительными функциями спектральной обработки сигналов, построения векторных диаграмм на основе запомненных мгновенных значений векторов, построения траекторий измеряемых комплексных сопротивлений на входе ЦРЗ. Использование коммуникационных интерфейсов (см. рис. 10.9) позволяет производить в автоматическом режиме передачу регистрируемых данных КЗ от отдельных ЦРЗ в общее управляющее устройство с дальнейшим архивированием и передачей по запросу на верхний уровень управления.

**Измерения.** Дополнительной функцией ЦРЗ может являться измерение параметров текущего режима (фазных и линейных токов  $I$ , напряжений  $U$ , частоты  $f$ ) и, в общем случае, значительного числа производных параметров, рассчитываемых на их основе. К ним могут относиться: симметричные составляющие токов и напряжений, входные комплексные сопротивления по кон-

турам фаза—фаза и фаза—земля; полная, активная и реактивная мощности;  $\cos\phi$ ; рассчитанные текущие температуры проводов отдельных фаз; разности напряжений, фаз и частот шин и линии при наличии в ЦРЗ устройств контроля синхронизма (см. гл. 8). При использовании активного интерфейса фиксируются значения входных токов и напряжений на противоположном конце ВЛ и фазовые углы между величинами по концам линии, что позволяет контролировать полярность и правильность соединения измерительных цепей дифференциальных защит обоих концов.

Измеряемые величины могут быть просмотрены на дисплее ЦРЗ и с помощью интерфейса местного обслуживания и коммуникационного интерфейса быть доступны пользователям на различных уровнях управления.

**Команды и сообщения с дискретных выходов ЦРЗ** (промежуточные и выходные реле) передаются соответствующим аппаратам, средствам сигнализации и управления, обеспечивая выполнение необходимых операций. Они используются также для обеспечения передачи информации на удаленные концы объекта при выполнении защит абсолютной селективности, а также для обеспечения взаимодействия защитных функций отдельных ЦРЗ одного объекта, например, для пуска функции АПВ внешнего устройства защиты. При этом функции дискретных выходов ЦРЗ и дискретных входов внешнего устройства соответственно программируются пользователем.

**Цифровая информация с выхода активного коммуникационного интерфейса**, содержащая данные о значениях измеряемых векторов тока и напряжения, а также логические сообщения и команды (см. рис. 10.10) используется, прежде всего, в быстродействующих продольных защитах ВЛ и двусторонних ФМП (см. гл. 6 и гл. 10).

## Глава 11

# Эксплуатационная эффективность устройств релейной защиты

### 11.1. Составляющие эксплуатационной эффективности УРЗ

*Эксплуатационной эффективностью УРЗ* назовем совокупность качеств, определяющих способность УРЗ полноценно выполнять свои функции в условиях эксплуатации.

Каким бы совершенным ни было устройство релейной защиты, его эффективность в реальных условиях использования (эксплуатационная эффективность) определяется в первую очередь двумя группами факторов.

Группа I — объем защитных функций, характеристики, уставки, определяющие чувствительность УРЗ к внутренним повреждениям защищаемого объекта ЭС, повреждениям в зонах резервирования и селективность (отстройку от внешних повреждений).

Само по себе повышение технического уровня УРЗ не обязательно ведет к эквивалентному повышению эффективности в части реагирования на возникающие повреждения. Так, например, устаревшие к настоящему времени электромеханические и отчасти электронные статические УРЗ при правильном выборе защитных функций и уставок безусловно обеспечат более эффективную защиту сети, чем микропроцессорные УРЗ без достаточно обоснованного выбора указанных параметров.

Существуют многочисленные нормы и стандарты (отдельных стран и международные), позволяющие оценить *качество устройств релейной защиты* в части их технической реализации — вида функций и точности характеристик, потребления, устойчивости к различного рода влияющим факторам (см. гл.1). Однако указанные стандарты и нормы не относятся к оценке *качества релейной защиты* в части обеспечения чувствитель-

ности и селективности при устранении аварий ЭС с учетом многообразия возможных условий возникновения аварий. В то же время именно эти показатели релейной защиты во многом определяют ее реальную эффективность при возникновении аварий в ЭС.

Вопросы оценки и контроля чувствительности и селективности УРЗ с учетом многообразия влияющих факторов будут рассмотрены в §11.2—11.5.

Группа II включает в себя факторы, влияющие на готовность УРЗ выполнять свои функции при возникновении аварий в ЭС, которую будем называть *эксплуатационной готовностью УРЗ*. К ним, в первую очередь, относятся:

- правильная реализация функций УРЗ;
- соответствие установленных параметров и уставок УРЗ требованиям задания на их установку;
- техническая исправность УРЗ.

Вопросы обеспечения готовности УРЗ, прежде всего цифровых УРЗ, к правильным действиям будут рассмотрены в §11.6—11.9.

## **11.2. Факторы, определяющие выбор защитных функций и уставок УРЗ**

Выбор вида и числа защитных функций, необходимых характеристик, параметров и уставок сложных УРЗ, прежде всего защит элементов высоковольтных электрических сетей с многосторонним питанием, а также координация характеристик защит отдельных элементов ЭС представляют собой неформальную задачу, не имеющую к настоящему времени однозначного решения. Указанное обусловлено значительным количеством влияющих на конечное решение факторов, к которым, прежде всего, относятся:

- вид повреждения;
- место повреждения;
- наличие электрической дуги или переходного сопротивления в месте повреждения;
- возможность перехода одного вида повреждения в другой;
- конфигурация ЭС и ее эквивалентные параметры относительно места повреждения и места установки УРЗ, которые (прежде всего конфигурация и параметры) могут изменяться во

времени как в зависимости от режимов работы ЭС, так и непосредственно во время аварии вследствие отключения (включения) отдельных выключателей;

- изменяющиеся параметры нагрузочных режимов ЭС, определяемые перетоками мощности, влияющие на распределение токов КЗ в ЭС;
- требования надежности электроснабжения, связанные с особенностями объекта (участка ЭС).

Многие из перечисленных факторов неоднозначны и имеют достаточно широкие диапазоны изменения. Поэтому число возможных сочетаний (комбинаций) указанных факторов, каждый из которых в определенной степени влияет на поведение УРЗ, чрезвычайно велико. В частности, при выборе характеристик дистанционных органов (см. рис. 7.31) необходимо учитывать в том числе такие факторы, как соотношения токов в месте КЗ и в месте установки защиты, зависящие от места КЗ, конфигурации и режима ЭС; возможные искажения замера под влиянием электрической дуги и сопротивления опор ВЛ (см. §7.3 и 7.4), под влиянием параллельных линий (см. §7.5); искажение замера в зонах резервирования (см. §7.6) и при двухфазных КЗ на землю через переходное сопротивление (см. §7.9) и т.п. Изложенное затрудняет обоснованный выбор как концепции релейной защиты отдельных участков ЭС (выбор принципов защиты элементов сети и резервирования), так и характеристик и уставок отдельных УРЗ. Это обусловлено, прежде всего, трудностью выявления из многочисленных комбинаций влияющих факторов предельных случаев, определяющих принятие решений.

В практике при выборе функций и уставок РЗ в основном применяют расчетные методы и различные методики, учитывающие особенности выполнения отдельных УРЗ. При этом во многих случаях оценивают чувствительность и селективность (см. гл. 1) при определенных значениях (комбинациях) влияющих факторов, характеризующих КЗ и ЭС (см. выше), которые принимаются определяющими. При неудовлетворении показателей селективности или чувствительности уставки РЗ изменяют, и производят повторные оценки показателей чувствительности и селективности до получения приемлемых, в ряде случаев компромиссных результатов.

Однако проблема состоит в том, что многообразие сочетаний

перечисленных выше влияющих факторов делает практически невозможным в случаях ЭС достаточно сложной конфигурации выявить их критические сочетания (определяющие режимы) с точки зрения чувствительности и селективности. Число возможных комбинаций этих факторов еще более увеличивается при выборе резервных ступеней защит, когда необходимо учитывать и каскадное действие РЗ и перераспределение токов КЗ в ЭС после отключения каждого из выключателей.

Учитывая изложенное и, в ряде случаев, неформальность задачи, связанной также с специфическими требованиями пользователя и выбором типа (производителя) защит, затруднительно создание всеобъемлющей методики, позволяющей по данным ЭС однозначно выбрать необходимые защитные функции и уставки. В то же время возможности вычислительной техники в части быстрого действия при расчетах КЗ и симуляционного моделирования УРЗ позволяют получить объективные обобщенные оценки с учетом диапазонов значений влияющих факторов для выбора защитных функций и уставок РЗ. Ниже рассматриваются основные элементы данного подхода [46].

### **11.3. Оценка показателей чувствительности и селективности устройств релейной защиты**

#### **11.3.1. Параметры безусловного срабатывания и безусловного несрабатывания УРЗ**

В §1.4 рассмотрены такие основные свойства РЗ как чувствительность и селективность, обеспечение которых и определяет возможность выполнения РЗ своих функций. При этом ключевыми моментами в реализации этих свойств являются параметры срабатывания РЗ (характеристики срабатывания, уставки), определяющие области действия и недействия УРЗ. Область действия УРЗ непосредственно характеризует чувствительность РЗ, а область недействия — ее селективность.

Теоретически области действия и недействия определяются одними и теми же параметрами УРЗ, фиксирующими грань срабатывания. Например, для реле тока с уставкой  $I_y$  область действия определится теоретически диапазоном токов при  $I \geq I_y$ , а область недействия — диапазоном токов  $I \leq I_y$ . Однако, в силу ряда влияющих факторов, выполнение условия  $I \geq I_y$  не обязательно соответствует гарантированному срабатыванию УРЗ, а



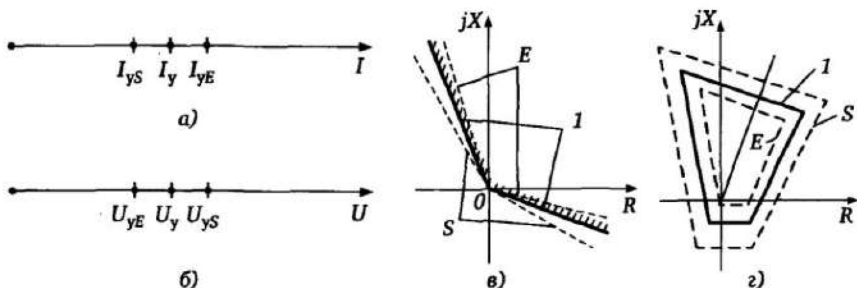


Рис. 11.1. Характеристики безусловного срабатывания и несрабатывания УРЗ

условие  $I \leq I_y$  — гарантированному несрабатыванию. К этим факторам относятся прежде всего:

- неточность расчетов токов КЗ;
- невозможность точного учета характеристик трансформаторов тока и напряжения;
- составляющие переходных процессов в токах и напряжениях (для быстродействующих УРЗ);
- неидеальность самого УРЗ (разброс уставок в пределах гарантированной точности, конечная чувствительность и коэффициент возврата).

С учетом возможных отклонений реальных уставок и характеристик вследствие перечисленных факторов, целесообразно определить области (характеристики) безусловного срабатывания и безусловного несрабатывания, использование которых позволяет оценить чувствительность и селективность УРЗ. Так, например, для реле максимального тока с уставкой  $I_y$  (рис 11.1,а) имеем условие безусловного срабатывания  $I \geq I_{yE}$  для проверки чувствительности и условие безусловного несрабатывания  $I \leq I_{yS}$  для проверки селективности (отстройки от тока  $I_y$ ).

При этом значения  $I_{yE}$  и  $I_{yS}$  определяются алгоритмом и другими свойствами самого УРЗ и возможными погрешностями расчета токов КЗ, а также характеристиками измерительных трансформаторов тока. Для реле минимального напряжения с уставкой  $U_y$  (рис. 11.1,б) при расчете чувствительности и селективности следует соответственно принять  $U \leq U_{yE}$  и  $U \geq U_{yS}$ .

Аналогично для реле с более сложными характеристиками, например реле направления мощности, реле сопротивления (рис. 11.1,в и з), также можно выделить характеристики  $E$  безусловного срабатывания и характеристики  $S$  безусловного несраба-

тывания соответственно для оценки чувствительности и селективности УРЗ. Так для реле сопротивления при выборе уставок безусловное срабатывание гарантируется в области  $Z$ , ограниченной характеристикой  $E$ , безусловное несрабатывание — в области вне характеристики  $S$ .

### 11.3.2. Единичные показатели чувствительности и селективности

Чувствительность и селективность РЗ (см. §1.4) (как обобщенные показатели) определяются реакцией УРЗ на поток многочисленных событий (поток КЗ различного вида), которые могут возникнуть в различных точках рассматриваемого участка ЭС.

Для того чтобы оценить данные показатели, введем понятие единичных показателей селективности  $q_S^*$  и чувствительности  $q_E^*$ , относящихся к единичному событию — одному КЗ, возникающему на рассматриваемом защищаемом элементе ЭС при полностью фиксированных условиях (конфигурации сети, месте и виде КЗ, режиме сети, переходном сопротивлении в месте КЗ и т.д.).

Единичные показатели чувствительности и селективности могут либо выполняться ( $q_E^* = 1, q_S^* = 1$ ), либо не выполняться ( $q_E^* = 0, q_S^* = 0$ ).

**Единичный показатель чувствительности РЗ** защищаемого объекта выполняется ( $q_E^* = 1$ ), если при рассматриваемом КЗ на защищаемом объекте оно ликвидируется за время, не превышающее значение  $T_E$ , при котором обеспечивается как сохранность элементов сети (например, вследствие возможной термической перегрузки), так и дальнейшее функционирование ЭС (например, не нарушается динамическая устойчивость). В противном случае  $q_E^* = 0$ . Максимально допустимое время устранения КЗ  $T_E^*$ , при котором обеспечивается показатель чувствительности  $q_E^* = 1$ , назовем *предельным временем чувствительности (ПВ)*.

**Единичный показатель селективности РЗ** защищаемого объекта выполняется ( $q_S^* = 1$ ), если при рассматриваемом КЗ на защищаемом объекте оно отключается УРЗ, действующими только на определенные выключатели («собственные» выключатели — СВ), которые обеспечивают отделение места КЗ от источников питания, и никакие другие отключения в ЭС не происходят. В противном случае  $q_S^* = 0$ .

Поясним указанное на примере участка ЭС (рис. 11.2).

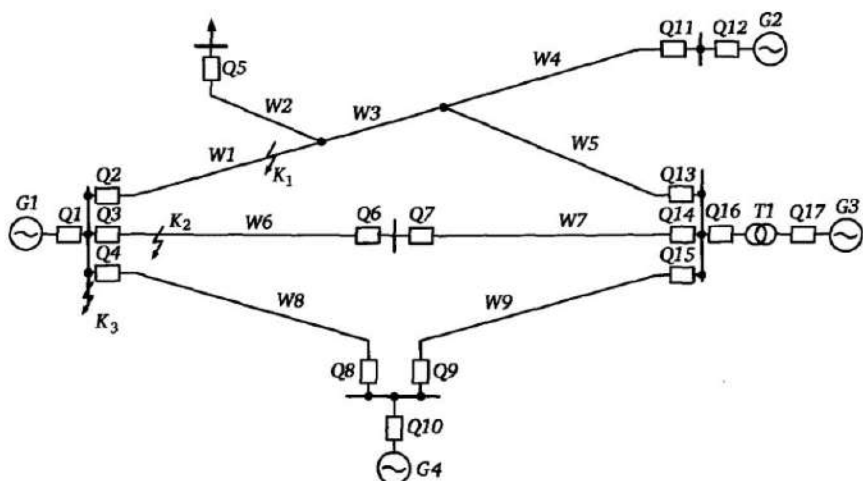


Рис. 11.2. Пример участка ЭС (далее номера УРЗ  $S1-S17$  в тексте совпадают с номерами выключателей  $Q1-Q17$ ).

Таблица 11.1. Таблица чувствительности и селективности ЭС (к рис. 11.2)

Объект	Собственный выключатель	Предельное время чувствительности (ПВ)
$G1$	$Q1$	$T_{E1}$ или $T_{E1} = f(I)$
$W1$	$Q2, Q11, Q13$	$T_{E2}$ или $T_{E2} = f(I)$
$W2$	$Q2, Q11, Q13$	$T_{E3}$ или $T_{E3} = f(I)$
...	...	...
$T1$	$Q16, Q17$	$T_{Em}$ или $T_{Em} = f(I)$
$W9$	$Q9, Q15$	$T_{En}$ или $T_{En} = f(I)$

На каждом выключателе  $Q1-Q17$  установлены соответственно УРЗ  $S1-S17$  (на рисунке не показаны). При КЗ  $K_1$  на линии  $W1$  единичный показатель чувствительности  $q_E^*$  выполняется, если в период до устранения повреждения ток в любом из элементов ЭС и время его протекания соответствуют нормам допустимых перегрузок на каждый из элементов или другим заданным требованиям. Эти нормы и требования задаются для каждого из элементов ЭС предельным временем чувствительности  $T_E$ , которое в общем случае является функцией тока КЗ, т.е.  $T_E = f(I)$ .

Каждому элементу ЭС (рис. 11.2) соответствуют определенные («собственные») выключатели, отключение которых необ-

ходимо для селективной ликвидации КЗ на этом элементе. Так, например, для ликвидации КЗ на линии  $W1$ , а также на линиях  $W2, W3, W4, W5$  необходимо отключение защитами  $S2, S11, S13$  выключателей  $Q2, Q11, Q13$ , связывающих место КЗ с источниками питания. Указанные выключатели являются «собственными» для этих ВЛ. Для линии  $W6$  ( $K_2$ ) «собственными» являются выключатели  $Q3$  и  $Q6$  и т.д. С учетом изложенного, для любой ЭС можно составить таблицу чувствительности и селективности (например, табл. 11.1), где каждому элементу ЭС соответствуют определенные комбинации «собственных» выключателей и предельные времена чувствительности  $T_E$ .

Так, для линии  $W2$  единичный показатель чувствительности выполняется, если КЗ на этой линии отключится за время  $t \leq T_{E3}$ . Единичный показатель селективности при этом будет обеспечен, если КЗ на линии  $W2$  отключается защитами  $S2, S11, S13$  выключателей  $Q2, Q11, Q13$  и защиты, установленные на других выключателях в ЭС (см. рис. 11.2) на отключение не подействуют.

### 11.3.3. Оценка чувствительности и селективности РЗ

С учетом рассмотренных единичных показателей  $q_E^*$  и  $q_S^*$  и определений чувствительности и селективности (см. §1.4), оценить

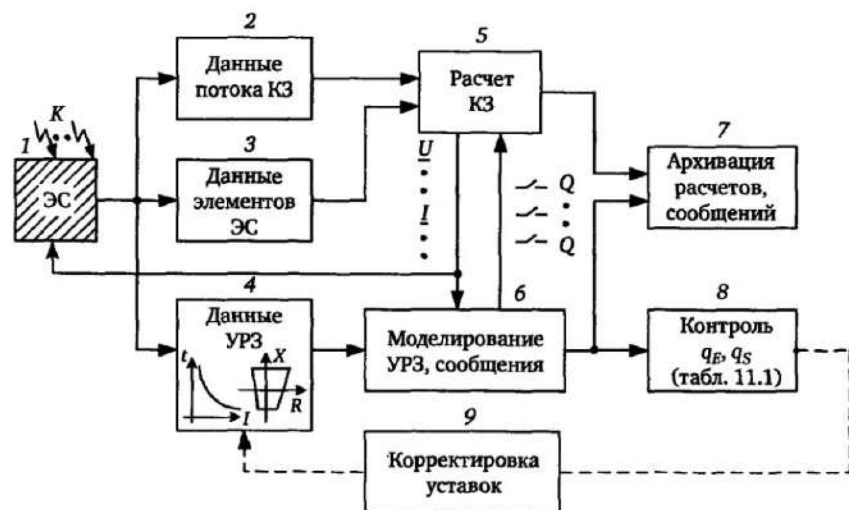


Рис. 11.3. Структура алгоритма оценки и контроля чувствительности и селективности РЗ

чувствительность  $q_E$  и селективность  $q_S$  можно, наложив на ЭС поток возможных КЗ и рассматривая действие УРЗ (единичные показатели  $q_{En}^*$ ,  $q_{Sn}^*$ ) при каждом событии (КЗ), где  $n$  — номер текущего события. При этом чувствительность  $q_E$  и селективность  $q_S$  РЗ объекта будут обеспечены, если для любого из рассмотренных КЗ на объекте обеспечиваются единичные показатели ( $q_{En}^* = 1$ ,  $q_{Sn}^* = 1$ ), т.е. для всего потока событий выполняются условия:

$$q_E = \prod_{n=1}^n q_{En}^* = 1; \quad q_S = \prod_{n=1}^n q_{Sn}^* = 1. \quad (11.1)$$

Выполнение условий (11.1) означает, что, во-первых, не имеется «дыр», где КЗ на объекте не отключается устройствами защиты или отключается с недопустимым замедлением (условие чувствительности) и, во-вторых, не имеется случаев отключения КЗ «чужими» выключателями быстрее, чем «собственными». Указанное не означает, что при выполнении условий (11.1) все функции и уставки УРЗ выбраны оптимально, однако выполнение этих условий является необходимым условием обеспечения чувствительности и селективности РЗ.

На рис. 11.3 приведена структура, поясняющая основные элементы полноценного контроля чувствительности и селективности РЗ на основе программных средств расчета КЗ и моделирования УРЗ. При пояснениях в дальнейшем в качестве примера используются фрагменты программы СИМП, предназначенной для анализа и контроля уставок РЗ [46].

**Структура алгоритма контроля чувствительности и селективности РЗ** (рис. 11.3) содержит следующие основные функциональные элементы.

**Описание конфигурации ЭС** (блок 1), включая места установки УРЗ и места приложения потока КЗ. Наиболее эффективным является при этом использование графического редактора с библиотекой элементов, используемых в ЭС (ВЛ, генераторов, трансформаторов, выключателей, разъединителей и т.д.), что обеспечивает наглядность и упрощает работу со схемой. Пример графического редактора программы СИМП приведен на рис. 11.4.

Принципиальным является наличие в библиотеке элементов устройств УРЗ, устанавливаемых непосредственно у выключателей Q.

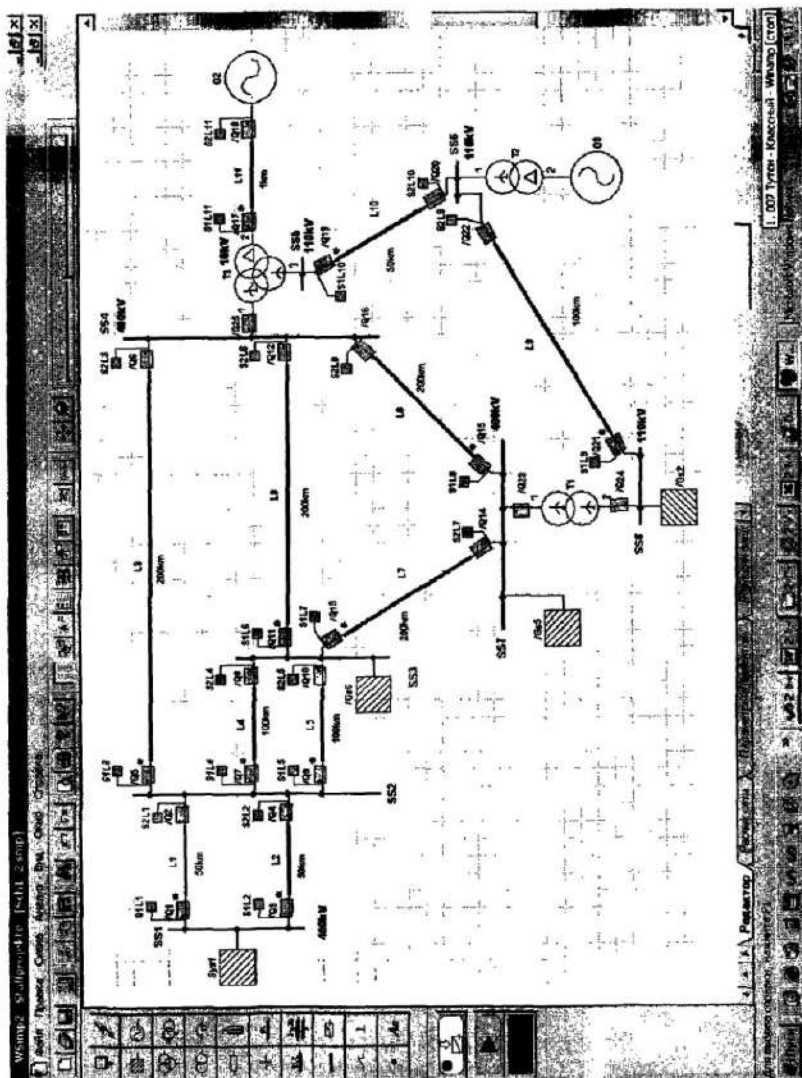


Рис. 11.4. Пример графического редактора программы СИМП

**Данные потока КЗ** (блок 2), накладываемого на ЭС. Вводятся рассматриваемые виды КЗ, переходные сопротивления в месте КЗ в зависимости от вида КЗ (междуфазные и связанные с землей). Задаются места приложения КЗ, например, шаг в процентах длины ВЛ, внутренние и внешние КЗ по концам объекта (выключателя, трансформатора и т.д.).

**Данные элементов ЭС** (блок 3) — вводятся все необходимые для расчета величин при КЗ параметры элементов ЭС, в том числе и данные измерительных трансформаторов тока и напряжения. На рис. 11.5,а в качестве примера показан ввод данных трехобмоточного трансформатора. Эффективно при этом использование базы данных элементов ЭС.

**Данные релейной защиты устройств** (блок 4). Вводятся все необходимые данные, описывающие характеристики УРЗ, прежде всего:

- используемые защитные функции (токовые, токовые направленные, дистанционные);
- характеристики, уставки и выдержки времени отдельных ступеней каждой защитной функции.

Пример, поясняющий ввод параметров дистанционной защиты, приведен на рис. 11.5,б.

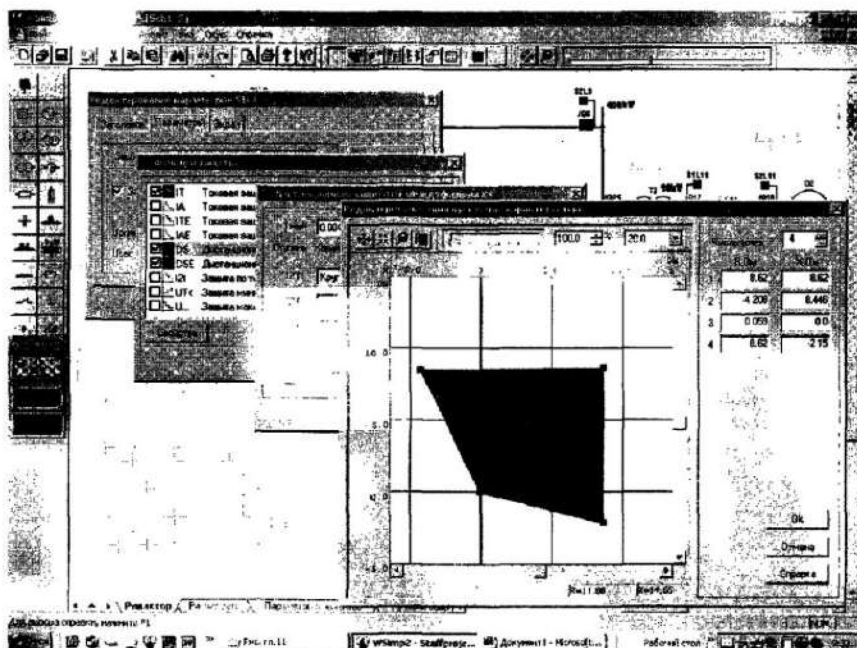
**Расчет токов и напряжений при КЗ** (блок 5). Методы расчета КЗ в электрических системах детально разработаны, существует большое количество соответствующих программ. Блок 5 рассчитывает для каждого рассматриваемого единичного случая напряжения и токи, подводимые ко всем УРЗ, установленным на различных элементах рассматриваемого участка ЭС (см. рис. 11.4). Отметим, что при этом учитывается действие УРЗ на отдельные выключатели ЭС в процессе устранения КЗ (см. блок 6 на рис. 11.3). Информация о состоянии выключателей  $Q1—Qn$  с учетом действия УРЗ непрерывно в процессе расчета передается блокам 3 и 5.

Отключение выключателя соответствует изменению конфигурации ЭС при каждом действии УРЗ. Поэтому блоком 5 производится, в общем случае, многократный расчет одного и того же КЗ, учитывающий каждое изменение состояния выключателей и конфигурации ЭС (блок 1) в результате срабатывания УРЗ отдельных элементов ЭС с подачей соответствующих величин ( $U...I$ ) к блоку 6 моделирования УРЗ.

**Моделирование УРЗ** (блок 6) обеспечивает учет действия (недействия) отдельных УРЗ рассматриваемого участка ЭС при на-



а)



б)

Рис. 11.5. Ввод данных элементов ЭС и устройств защиты в программу СИМП

ложении на ЭС потока КЗ и на этой основе оценку чувствительности и селективности РЗ. Так как задачей анализа чувствительности и селективности является оценка правильности выбора



защитных функций, характеристик и уставок, то в большинстве случаев достаточным является расчет установившихся значений тока и напряжения КЗ и моделирование статических характеристик УРЗ, что существенно упрощает анализ. В общем случае задача может быть расширена путем моделирования алгоритмов реализации УРЗ с использованием мгновенных значений величин  $u$  и  $i$ , рассчитываемых с учетом переходных процессов в ЭС при возникновении КЗ.

Важным моментом при моделировании УРЗ является необходимость использования параметров безусловного срабатывания и несрабатывания (см. п. 11.3.1). Так как граница срабатывания УРЗ в общем случае размыта (см. рис. 11.1), то при нахождении единичного показателя чувствительности  $q_E^*$  используются характеристики безусловного срабатывания УРЗ, что дает необходимые запасы при оценке чувствительности РЗ с учетом возможных погрешностей расчета и отклонений характеристик УРЗ в реальных условиях.

Исходя из тех же соображений, при оценке селективности УРЗ используются характеристики безусловного несрабатывания УРЗ, что также дает необходимые запасы, учитывающие неточность расчетов и погрешности УРЗ.

В случае соответствия рассчитываемых значений  $U...I$  характеристикам безусловного срабатывания УРЗ, в том числе с учетом выдержек времени отдельных ступеней УРЗ по длительности существования сигналов, блоком 6 формируются сигналы отключения выключателей, которые (с учетом времени действия выключателей) передаются блокам 1 и 5 для расчета КЗ. Затем проводятся последовательно новые расчеты КЗ, учитывающие изменение конфигурации ЭС после отключения каждого выключателя. При моделировании УРЗ обеспечивается генерация не только отключающих сигналов, но и других сообщений, например, о попадании параметров в зону действия реле отдельных фаз, о пуске отдельных ступеней и т.д.

**Архивация расчетов, сообщений результатов** (блок 7) обеспечивает фиксацию значений токов и напряжений во всех местах установки УРЗ в процессе КЗ и коммутаций выключателей ЭС, возникающих сообщений УРЗ, а также единичных и результирующих показателей чувствительности и селективности.

**Автоматический контроль показателей чувствительности и селективности**  $q_E, q_S$  (блок 8) осуществляется на осно-

ве общих критериев, определяемых выражением (11.1). При этом при каждом текущем КЗ с номером  $n$  из общего потока КЗ с учетом критериев, приведенных в п. 11.3.2, оцениваются единичные показатели чувствительности  $q_{En}^*$  и селективности  $q_{Sn}^*$  для РЗ отдельных элементов ЭС (см. табл. 11.1). Процесс оценки (контроля) показателей чувствительности и селективности релейной защиты участка сети содержит следующие основные моменты.

1. В рассматриваемой ЭС пользователем выделяется участок, где необходимо проконтролировать чувствительность и селективность РЗ (программой дается возможность такого выделения в графическом редакторе — см. рис. 11.4). При этом имеется в виду, что все параметры ЭС, релейной защиты и данные потока КЗ заданы.

2. Программа на основе анализа топологии ЭС самостоятельно формирует табл. 11.1 для оценки показателей чувствительности и селективности, включающую все элементы ЭС, входящие в выделенный участок, и определяет «собственные» выключатели для каждого из элементов. Предельные времена чувствительности  $T_E$  (см. п. 11.3.2) вводятся в табл. 11.1 в соответствии с требованиями к рассматриваемым элементам ЭС.

3. Для выявления показателей чувствительности и селективности  $q_E$  и  $q_S$  релейной защиты отдельных элементов ЭС, что является основной целью анализа, поток КЗ автоматически проходит каждый из элементов ЭС (например, ВЛ с заданным шагом) и в соответствии с заданными ранее видами и параметрами КЗ. При каждом отдельном КЗ одновременно контролируется действие всех УРЗ в рассматриваемом участке ЭС.

4. При анализе чувствительности в УРЗ, действующих на «собственные» выключатели принимаются характеристики безусловного срабатывания (см. § 11.2), т.е. УРЗ загроубляются, что обеспечивает необходимый запас по чувствительности при КЗ на защищаемом объекте. Требование по чувствительности для любого из элементов ЭС, входящих в табл. 11.1, будут при этом выполнены, если *при всех КЗ* на указанном элементе ЭС отключение «собственных» выключателей происходит за время  $t \leq T_E$ . В противном случае, т.е. при невыполнении данного условия хотя бы при одном КЗ, имеет место  $q_E = 0$ .

5. При анализе селективности РЗ каждого из элементов ЭС при прохождении потока КЗ по рассматриваемому элементу в

защитах всех других элементов ЭС, действующих на «чужие» в данном случае выключатели, принимаются характеристики безусловного несрабатывания (чувствительность УРЗ увеличивается), что обеспечивает необходимый запас при контроле показателя  $q_S$ . Для выполнения условия селективности необходимо, чтобы *при всех КЗ* на рассматриваемом элементе не произошло срабатывания защит, установленных на чужих выключателях.

б. Подобным образом поток КЗ накладывается на все элементы ЭС, входящие в рассматриваемый участок, и определяются соответствующие коэффициенты  $q_E$  и  $q_S$ .

При невыполнении требований чувствительности и селективности при КЗ в отдельных точках ЭС (единичные показатели  $q_E^*$  или  $q_S^*$  при КЗ в этих точках равны 0) указанные случаи фиксируются (блок 7). Далее пользователем производится анализ данных случаев и соответствующая корректировка уставок УРЗ (блок 9), эффективность которой проверяется повторной автоматической оценкой показателей чувствительности и селективности.

Основным принципиальным моментом рассмотренного анализа является возможность полноценного контроля чувствительности и селективности релейной защиты участка сети в автоматическом режиме с возможностью просчета тысяч вариантов. Указанное позволяет охватить и выявить случаи наиболее опасных режимов ЭС, видов и мест КЗ, которые являются определяющими при оценке чувствительности и селективности релейной защиты. Выявление указанных определяющих условий для ЭС сложной конфигурации аналитическими методами затруднительно (см., например, простейший случай двухфазного КЗ на землю в §7.4).

#### **11.4. Оценка чувствительности и селективности резервных защит**

Выше рассматривались чувствительность и селективность РЗ в предположении отсутствия отказов УРЗ и силовых выключателей. Резервные ступени РЗ функционируют, как правило, при отказе УРЗ или выключателя, а также при недостаточной чувствительности основных ступеней защиты вследствие экстремальных условий, например, большого сопротивления электричес-

кой дуги. Рассмотренные выше критерии и алгоритмы возможно применить и для анализа чувствительности и селективности РЗ в случае отказа любого УРЗ или выключателя в ЭС. При этом алгоритм анализа (см. табл. 11.1, и рис. 11.3) должен дополнительно содержать следующие аспекты:

1) в процессе анализа производится поочередное моделирование отказа защиты или выключателя в ЭС например, прерыванием связи между защитой и выключателем, что делает невозможным отключение рассматриваемого выключателя при действии УРЗ;

2) при отказе выключателя релейная защита других, соседних с выключателем, элементов ЭС должна произвести необходимые отключения. Поэтому поврежденный выключатель или выключатель с неисправной защитой в данном случае при анализе не рассматривается и в «свои» вносятся выключатели элементов ЭС, соседних с отказавшим выключателем. В частности, например, для линии  $W9$  (см. рис. 11.2) при отказе выключателя  $Q9$  (защиты  $S9$ ) «своими» выключателями являются выключатели:  $Q8$  (или  $Q4$ ),  $Q10$ ,  $Q15$ , а при отказе выключателя  $Q15$ :  $Q9$ ,  $Q14$  (или  $Q7$ ),  $Q16$  (или  $Q17$ ),  $Q13$ ;

3) при проверке резервных ступеней защит программой моделируется поочередный отказ выключателей в рассматриваемом участке ЭС и соответственно корректируются условия проверки в таблице чувствительности и селективности типа табл. 11.1. Эти условия относятся к заданию «своих» выключателей, обеспечивающих отключение КЗ на рассматриваемом элементе ЭС при наложении потока КЗ, что определяет соответствующие изменения при проверке чувствительности и селективности.

### **11.5. Возможности автоматического контроля уставок РЗ в ЭС**

Рассмотренные обобщенные оценки чувствительности и селективности РЗ позволяют объективно оценить соответствие уставок и характеристик РЗ требованиям ЭС с учетом возможного потока КЗ, что особенно важно для ЭС сложной конфигурации. Эта задача становится еще более актуальной с учетом тенденции к либерализации энергетического рынка, приводящей к более частым коммутациям в сетях и, следовательно, к смене конфигураций и режимов

ЭС. Вполне очевидно, что одновременно изменяются условия, определяющие необходимые уставки РЗ и согласование отдельных УРЗ по чувствительности и селективности.

В этих условиях представляется перспективной появляющаяся принципиально новая возможность *автоматического контроля* правильности уставок и характеристик РЗ на основе текущего наблюдения выполнимости критериев чувствительности и селективности  $q_E$  и  $q_S$  с использованием структуры аналогичной рис. 11.3. Непрерывный контроль этих параметров основан на том, что с учетом совершенствования средств управления и обмена информацией в ЭС (см., например, гл. 10) в программу анализа чувствительности и селективности РЗ могут в текущем режиме вноситься происходящие изменения в конфигурации ЭС, например, при вводе или выводе генерирующих мощностей и нагрузок, выводе в ремонт или вводе силового оборудования и т.д. При этом в структуре оценки параметров  $q_E$  и  $q_S$  (см. рис. 11.3), функционирующей в данном случае в *непрерывном режиме* («on-line») при непрерывно моделируемом потоке КЗ, отслеживаются текущие данные ЭС, определяющие поток токов и напряжений, подводимых к блоку моделирования УРЗ. Это позволяет автоматически контролировать реальную готовность РЗ к правильному функционированию в изменившемся режиме ЭС и выдать соответствующие сообщения о необходимости корректировки уставок УРЗ.

На рис. 11.6 поясняется стратегия автоматического контроля чувствительности и селективности релейной защиты участка ЭС.

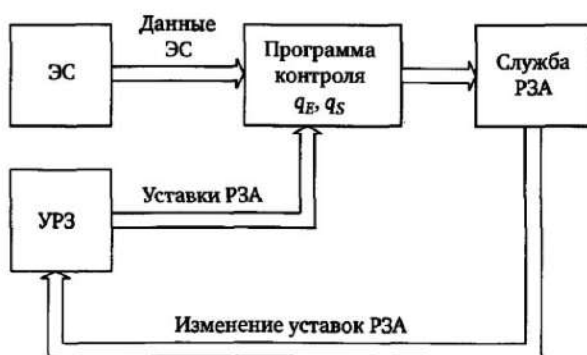


Рис. 11.6. Стратегия автоматического контроля чувствительности и селективности РЗ заданного района ЭС

К программе контроля показателей  $q_E$  и  $q_S$ , содержащей с учетом структуры, представленной на рис. 11.3, данные о конфигурации рассматриваемого участка ЭС, уставки и характеристики УРЗ отдельных элементов ЭС поступают с использованием систем управления текущие данные об изменениях в конфигурации ЭС, проходящих в процессе эксплуатации. Программа функционирует в непрерывном режиме, и при невыполнении условий чувствительности или селективности вследствие изменений в ЭС соответствующие сообщения от программы поступают к персоналу служб РЗА, определяющему уставки УРЗ.

Эти сообщения содержат необходимую информацию о причинах нарушения чувствительности и селективности РЗ в ЭС, прежде всего об элементе ЭС и защитных функциях УРЗ, не удовлетворяющих в новых условиях требованиям чувствительности и селективности, а также о видах КЗ и условиях, при которых эти требования не удовлетворяются. Указанные данные позволяют персоналу служб РЗА произвести необходимые корректировки уставок или принять решения о введении изменений в структуру РЗ рассматриваемого участка ЭС. Эффективность принимаемых решений после введения изменений оперативно оценивается текущим контролем показателей  $q_E$  и  $q_S$ .

### 11.6. Особенности проверки функций цифровых УРЗ

Рассматривая факторы группы II (см. §11.1), определяющие аппаратную готовность УРЗ к правильному функционированию, следует отметить ряд специфических особенностей цифровой релейной защиты.

Как показывает практика, процент неправильных действий, связанных с использованием цифровых УРЗ, на первоначальном этапе существенно не уменьшается, а в ряде случаев даже возрастает [43]. Указанное обусловлено среди прочего возможными несоответствиями функций цифрового УРЗ конкретным требованиям рассматриваемой ЭС или ошибками, не выявленными в процессе испытаний, которые будем в дальнейшем называть *аттестационными*. Возможность возникновения подобных ошибок определяется, прежде всего, принципиальными различиями в формировании структуры и реализации отдельных функций цифровых УРЗ и УРЗ на основе электромеханических и электронных статических элементов.

При реализации цифровых УРЗ используется имеющаяся возможность строить (программировать) отдельные функции, алгоритмы, логические связи, сообщения защиты на одной общей конструктивной и программной основе практически без увеличения объема физических компонентов. Это существенно повышает функциональность УРЗ, но и приводит во многих случаях к их существенному усложнению. При этом в многофункциональных цифровых УРЗ практически затруднительно графически описать все связи, описывающие прохождение сигналов и их взаимодействие, так как они осуществляются на программном уровне. По этой же причине затруднительно также выделить полностью законченные независимые функциональные блоки. Поэтому цифровые УРЗ в этом смысле менее «прозрачны» по сравнению с предыдущими поколениями УРЗ на основе отдельных конструктивных и функциональных элементов. Помимо этого, цифровые УРЗ содержат, как правило, значительно большее число параметров и генерируют значительно большее число сообщений. В частности, отдельные цифровые защиты объектов высоких напряжений имеют сотни параметров и тысячи различного вида сообщений.

Отсутствие функционально законченных блоков и программный уровень формирования структуры цифровых УРЗ во многих случаях затрудняют проверку выбранных функций вследствие одновременного пуска других функций. Учет этого фактора приводит к необходимости применения дополнительных мер по исключению влияния непроверяемых функций в процессе проверки, что, в свою очередь, требует объективной оценки корректности подобных проверок с учетом влияния вводимых при проверке изменений.

Указанное обуславливает необходимость достаточно глубоких аттестационных проверок цифровых УРЗ на первоначальном этапе с целью выявления особенностей выполнения отдельных функций и исключения возможностей неправильных действий в ряде специальных режимов, например, при переходах из одного вида повреждения в другой и т. п. Объем необходимых проверок увеличивается и потому, что вследствие отсутствия «прозрачности» взаимодействия функциональных блоков необходима проверка в определенных условиях не только правильности реакции выбранной функции, но и контроль при этом других функций (контроль несрабатывания).

*Изложенное обуславливает существенные отличия концепции проверки цифровых УРЗ от защит предыдущих поколений. При этом полноценная проверка многих функций цифровых УРЗ «ручными» методами становится практически невозможной ввиду как усложнения самих функций и увеличения числа соответствующих им параметров и сообщений, так и «интегрирования» проверяемых функций в общей программе цифрового УРЗ. Последнее требует организации дополнительных воздействий на устройство для выделения проверяемой функции. Все указанное, с учетом современной тенденции к сокращению обслуживающего персонала, делает необходимым использование полуавтоматических и автоматических систем и средств проверки УРЗ и специализированных программ проверки отдельных функций и устройств.*

В перспективе целесообразно использование автоматизированных полных программ проверки с выдачей соответствующих протоколов и фиксацией как хода проверки, так и результатов на соответствующем носителе информации. Это позволит формализовать и существенно ускорить проверку и в необходимых случаях сравнительно легко ее повторить без больших затрат времени и привлечения квалифицированного персонала (подробнее см. §11.7).

## **11.7. Современные средства и методы проверки УРЗ**

### **11.7.1. Ручные и компьютерно-управляемые средства проверки**

Средства проверки УРЗ представляют собой устройства, которые в общем случае выполняют все или некоторые из следующих функций:

- генерацию аналоговых сигналов переменного и постоянного тока (напряжения) для проверки характеристик УРЗ при различных видах КЗ и аномальных режимах (например асинхронных режимах ЭС);
- синхронизированную определенным образом с аналоговыми сигналами генерацию дискретных сигналов, подводимых к УРЗ (преимущественно контакты промежуточных реле);
- контроль реакции УРЗ (прием и обработка сигналов от УРЗ для проверки параметров и характеристик);
- оценку правильности защитных функций и точности параметров и уставок УРЗ;



- автоматическое создание протокола испытаний установленной формы.

Достаточная сложность проверяемых функций, большие диапазоны входных сигналов, при которых проверяются УРЗ, необходимость имитации при проверке различных видов КЗ и предаварийных режимов ЭС делают неэффективным использование стандартных генераторов сигналов и обуславливают уже в течение многих десятилетий применение для проверки УРЗ специализированных устройств проверки.

**Ручные устройства проверки** в зависимости от назначения (прежде всего вида проверяемых УРЗ) могут быть однофазными или трехфазными, генерировать только токи или токи и напряжения, устанавливать фазовые сдвиги между векторами, соответствующими подводимым величинам, фиксировать времена срабатывания УРЗ и т.д. Управление данными устройствами (выбор вида проверяемого КЗ, входных величин и других необходимых функций) осуществляется непосредственно пользователем с помощью соответствующей аппаратуры, входящей в устройство (кнопки, переключатели, плавно регулируемые элементы).

Современные ручные устройства проверки УРЗ содержат в общем случае микропроцессорные блоки и дисплей как для измерения и фиксации параметров срабатывания, так и для генерации определенных последовательностей аналоговых и дискретных сигналов, необходимых для проверки УРЗ (например, проверки функции АПВ, АВР и т. д.).

Ручные устройства проверки используются, прежде всего, для сравнительно простых УРЗ, где возможна и допустима полноценная проверка на основе ручного управления. Однако использование ручных средств вызывает серьезные затруднения при проверке современных сложных цифровых УРЗ, имеющих преимущественно большое число функций и более сложные характеристики, а также специфическую структуру, объединяющую различные защитные функции (см. §11.6). Другим аспектом являются существенно возрастающие затраты времени на проверку ручными средствами и оформление необходимых протоколов, а также более высокие требования к квалификации персонала, проводящего ручную проверку.

**Компьютерно-управляемые средства проверки** обладают принципиально новыми свойствами, обеспечивающими повы-



Рис. 11.7. Устройство проверки релейной защиты RETOM-51

шение качества и производительности при проверке простых и сложных УРЗ. Первое полностью компьютерно-управляемое средство проверки разработано фирмой Omicron (Австрия). Подобные средства выпускаются в настоящее время многими фирмами, в том числе фирмой «Динамика» (Россия) — устройство типа RETOM (рис. 11.7).

Структура, поясняющая функционирование компьютерно-управляемого средства проверки на примере устройства RETOM-51, приведена на рис. 11.8. В него входит проверочное устройство, содержащее генераторы трехфазного тока и напряжения и блоки ввода—вывода дискретных сигналов, управляемые персональным компьютером (ПК).

С помощью программ, разработанных для проверки отдельных реле или более сложных УРЗ в том числе панелей (шкафов), оператор вводит в ПК требуемые исходные данные, с учетом которых ПК рассчитывает необходимые для проверки режимы и отправляет информацию во внутренний контроллер силового блока. Этот контроллер по заданию программы рассчитывает цифровые выборки токов и напряжений, передает их в интерфейсный модуль, откуда эти выборки подаются в ци-

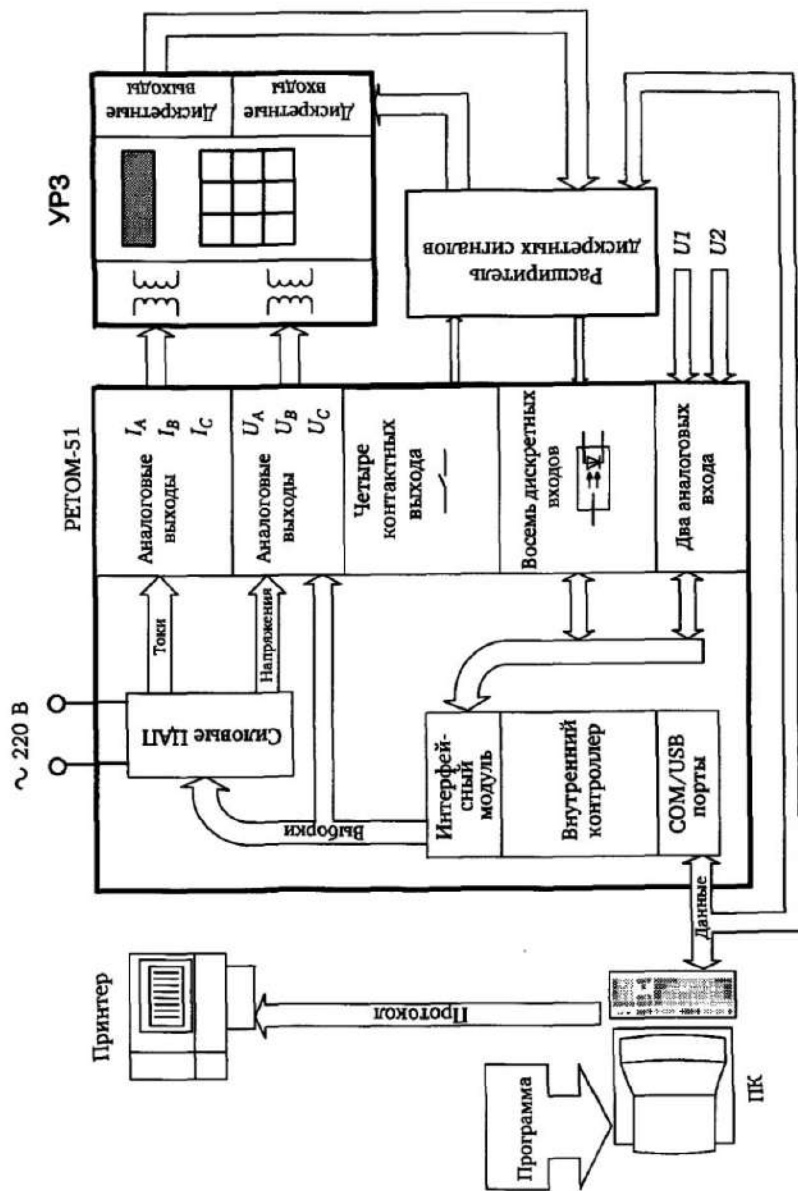


Рис. 11.8. Структура компьютерно-управляемого комплекса на основе RETOM-51

фро-аналоговый преобразователь (ЦАП). С выхода ЦАП требуемые аналоговые сигналы через усилители подаются в проверяемое УРЗ. Туда же через контактные выходы силового блока подаются задаваемые программой проверки управляющие команды, синхронизируемые во времени с аналоговыми сигналами.

Выходные сигналы проверяемого УРЗ подаются на дискретные или аналоговые входы силового блока и через внутренний контроллер РЕТОМ отправляются в ПК. Здесь сигналы обрабатываются, и ПК выдает на экран результаты проверки устройства. Эти результаты по желанию оператора могут быть распечатаны в виде протокола.

При проверке отсутствует необходимость использования измерительных приборов (амперметров, вольтметров, частотомеров, фазометров, секундомеров, осциллографов), так как ПК-управляемое устройство проверки является обычно сертифицируемым измерительным устройством с заданными классами точности для отдельных измерений.

Учитывая, что вся последовательность операций подачи аналоговых и дискретных сигналов программируется и в зависимости от реакции УРЗ может соответствующим образом ветвиться, возможности автоматической проверки характеристик и функций УРЗ теоретически неограниченны по объему и зависят только от применяемых программных средств. При этом возникает возможность полноценно проверить цифровые УРЗ со сложной структурой, подводя к УРЗ в автоматическом режиме синхронизированно аналоговые и дискретные сигналы (контакты управляемых реле), обеспечивающие проверку необходимых функций и характеристик УРЗ (см. §11.6). При этом подводимые к УРЗ при каждом измерении значения переменного тока и напряжения изменяются в динамическом режиме (например, скачкообразное падение соответствующего напряжения и возрастание тока), что правильно имитирует изменение величин, подводимых к УРЗ при КЗ различного вида.

При проверке сложных УРЗ, когда требуются операции с большим числом входных и выходных дискретных сигналов, может быть использован расширитель числа дискретных сигналов, также управляемый от ПК (см. рис. 11.8), что увеличивает возможности проверки.

Для проверки дифференциальных защит в многофазном режиме может понадобиться использование одновременно нескольких ПК-управляемых средств проверки.

При этом сигналы от них должны иметь одинаковую частоту. С этой целью должна быть предусмотрена их синхронизация или от внешнего сигнала, или от одного из ПК-управляемых устройств проверки — ведущего, когда все остальные работают в режиме ведомого.

### **11.7.2. Программное обеспечение ПК-управляемых средств проверки**

**Универсальные программы** включают проверку наиболее распространенных защитных функций независимо от типа устройств защиты, например:

- ручное (через ПК) управление трехфазными системами токов и напряжений;
- измерение времени (секундомер, регистратор);
- проверка реле тока и максимальной токовой защиты;
- проверка реле напряжения и защиты минимального и максимального напряжения;
- проверка реле направления мощности, реле сопротивления и реле частоты.

**Вспомогательные программы** проверки обеспечивают пользователю ряд дополнительных функций, необходимых для анализа УРЗ, например:

- воспроизведение динамических процессов, записанных цифровыми аварийными осциллографами в международном формате COMTRADE при повреждении в ЭС;
- формирование (программой-редактором) периодических сигналов произвольной формы и их воспроизведение, что позволяет моделировать искажения формы сигналов тока и напряжения, например, при пробое вентильных разрядников или при глубоком насыщении измерительных трансформаторов тока;
- формирование сигналов сложной формы суммированием основной и высших гармоник, а также апериодических составляющих сигнала и их воспроизведение. Это позволяет моделировать искаженную форму сигнала — если известен его гармонический состав.

**Специализированные полуавтоматические и автоматические программы** проверки УРЗ. Возможности ПК-управляе-

мых средств проверки по формированию последовательностей комбинаций сигналов переменного тока и дискретных сигналов и по анализу на каждом шаге сформированных последовательностей соответствующей реакции УРЗ позволяют создать полуавтоматические (с вмешательством оператора для осуществления коммутаций на определенных шагах проверки) и полностью автоматические (без вмешательства оператора) программы проверки отдельных типов УРЗ. Программы данного типа должны обеспечивать в автоматическом режиме:

- проверку соответствия установленных параметров, уставок, характеристик УРЗ заданным требованиям точности;
- проверку правильности логических связей и функций в УРЗ;
- проверку правильности реакции УРЗ на возможные комбинации входных аналоговых и дискретных сигналов;
- выявление несоответствия функций УРЗ заданным требованиям и возможность анализа причины несоответствия;
- выдачу протоколов проверки с фиксацией последовательности и отдельных результатов проверки;
- возможность многократного повторения проверки и сравнения результатов.

Для обеспечения автоматической проверки в полном объеме с контролем входных и выходных сигналов необходимо во многих случаях расширение числа обрабатываемых дискретных сигналов путем включения расширителя числа дискретных сигналов.

При этом одним из условий проведения автоматической проверки должна быть соответствующая фиксация соединений между выходными зажимами устройства проверки и зажимами проверяемого УРЗ (шкафа, панели), в соответствии с которой программой формируются необходимые воздействия и производится обработка поступающей через дискретные входы информации.

При автоматической проверке оценка результатов проверки производится программой по принципу «да—нет», где «да» соответствует нахождению результата измерения в границах, обусловленных требованиями точности. Так, например, при характеристике 1 реле сопротивления (рис. 11.9) программа фиксирует, что полученные сопротивления срабатывания на различных углах (характеристика 4) находятся внутри области, ограниченной характеристиками 2 и 3, соответствующими допустимым

границам, исходя из требуемой точности.

Учитывая, что цифровые УРЗ строятся на программном уровне и не имеют физических выходов, соответствующих отдельным защитным функциям (см. §11.7), необходимо иметь в виду возможность параллельной работы нескольких защитных функций на общий выход. При полных (аттестационных) проверках необходимо в определенных случаях программировать отдельные выходные реле только на одну из проверяемых функций. При сокращенных контрольных автоматизированных проверках в условиях эксплуатации программа должна таким образом формировать входные величины переменного тока и входные логические сигналы, чтобы без перепрограммирования параметров ЦРЗ могла проверить основные функции защиты.

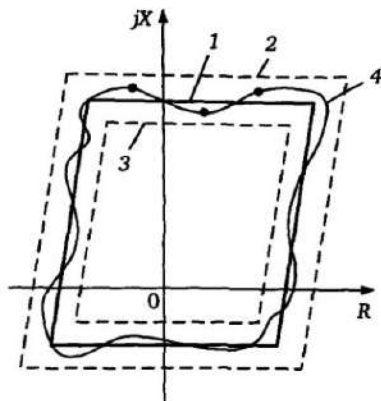


Рис. 11.9. Проверка характеристики реле сопротивления в автоматическом режиме

## 11.8. Электромагнитная совместимость ЦРЗ

*Электромагнитная совместимость (ЭМС)* определяет способность аппаратуры функционировать правильно и без повреждений в условиях электромагнитных помех, возникающих на объекте, где установлена данная аппаратура.

**Основные источники помех, воздействующих на УРЗ.** Особенностью условий функционирования устройств релейной защиты с точки зрения ЭМС является наличие топологически распределенной по энергообъекту (электрической станции, подстанции) сети, объединяющей высоковольтные элементы, измерительные трансформаторы, коммутационные аппараты, источники питания и сами устройства РЗА с помощью заземлителей, высоковольтных соединений (например, ошиновка) и кабельных линий (рис. 11.10).

Можно выделить следующие основные причины возникновения помех на энергообъектах.

- короткие замыкания в высоковольтной сети с заземленной

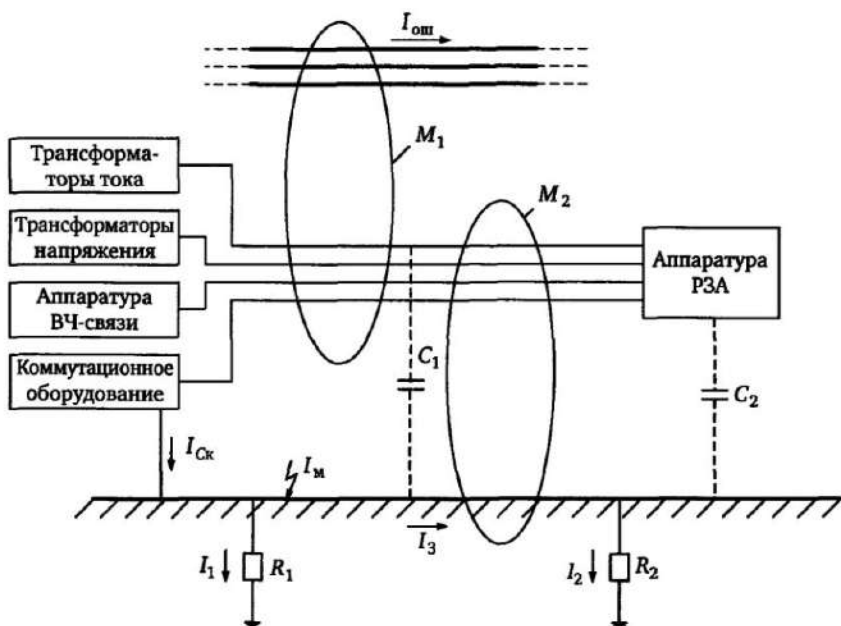


Рис. 11.10. Пути воздействия помех на аппаратуру РЗА:

$I_{омh}$  — ток высоковольтной ошиновки;  $I_{Cк}$  — емкостной высокочастотный ток через заземлитель при коммутации;  $I_m$  — ток грозового разряда;  $C_1, C_2$  — емкостные связи вторичных кабелей и оборудования;  $R_1, R_2$  — эквивалентные сопротивления отдельных заземлителей;  $I_3$  — уравнивающий ток между заземлителями;  $M_1, M_2$  — электромагнитные связи между вторичными кабелями, ошиновкой и землей

нейтралью. Протекающие по отдельным заземлителям токи вызывают в общем случае, особенно при некачественном заземлении, неодинаковость потенциалов заземленных устройств. В результате во вторичных кабелях и на входе устройств защиты наводятся токи и напряжения с преобладающей составляющей основной частоты;

- грозовые разряды и явления, связанные со срабатыванием высоковольтных разрядников. В данном случае высокочастотный характер грозового разряда определяет существенно большее результирующее сопротивление заземления, чем при протекании токов основной частоты при КЗ и, следовательно, большие высокочастотные (импульсные) помехи во вторичных цепях, обусловленные неодинаковыми потенциалами заземляющих элементов;



- переходные процессы в первичных высоковольтных цепях при коммутациях силовыми выключателями и разъединителями;
- переходные процессы во вторичных цепях при коммутациях низковольтного оборудования;
- высокочастотные поля, создаваемые радиопередающими устройствами, блоками питания и т.п.;
- электростатические разряды.

Следует отметить, что напряжения источников помех могут достигать достаточно больших значений — перепады напряжения между отдельными элементами заземляющей системы составляют десятки киловольт при КЗ на землю и грозовых разрядах и единицы киловольт при коммутациях силового оборудования. Возникающие при этом высокочастотные составляющие токов, стекающих на землю, создают перепады напряжения высокой частоты между заземлениями. Следствием этого является повышение потенциала заземленного вторичного оборудования и возрастание нагрузки на его изоляцию. Проникновение помех во вторичные цепи происходит через измерительные трансформаторы тока и напряжения и соответствующие кабельные связи, через цепи управления, соединяющие вторичную аппаратуру между собой и с первичным оборудованием, а также через присоединения высокочастотной аппаратуры защиты и связи (см. рис. 11.10). Помехи передаются также на проходящие по подстанции кабели путем наводок от токов высоковольтных шинопроводов и от уравнительных токов между заземлителями.

Без принятия специальных мер, указанные помехи могут привести к повреждению маломощных электронных компонентов ЦРЗ, имеющих низкие уровни допустимых напряжений. Другим следствием воздействия помех является неправильное функционирование ЦРЗ под их влиянием — излишние действия или отказы в срабатывании.

Оценка электромагнитной обстановки на объекте по уровню помех производится на основе имеющихся международных норм, стандартов и методик [34]. При этом используются как расчетные методы (специализированные программы для определения токов и потенциалов в системе заземления и наводимых на кабели импульсных помех), так и непосредственные измерения на объекте с моделированием высокочастотных и низкочастотных помех [38, 39].

**Обеспечение электромагнитной совместимости ЦРЗ.** Можно выделить следующие основные решения по обеспечению ЭМС устройств релейной защиты на энергообъектах:

1) *снижение уровня помех, воздействующих на ЦРЗ, обеспечиваемое:*

- *конструкцией строительных сооружений (в том числе зонная концепция защиты со специальными экранами и установкой в расчетных местах соответствующих по числу и конструкции заземлителей);*

- *правильной концепцией построения сетей электропитания низкого переменного и постоянного напряжений;*

- *установкой необходимых средств защиты от перенапряжений (разрядников, варисторов, частотных фильтров);*

- *правильной прокладкой контрольных и силовых кабелей (обеспечением необходимого расстояния между ними, а также между объектами молниезащиты и кабельными каналами, наличие экранов в кабелях и их заземление);*

- *выполнением системы питания постоянным током с обеспечением необходимого качества напряжения, прежде всего по уровню пульсаций, и обеспечением защиты от перенапряжений в системе постоянного тока;*

2) *выполнение необходимых мер по заземлению конструкций устройств РЗА (панелей, шкафов) и их отдельных конструктивных элементов;*

3) *качественное конструктивное выполнение устройств РЗА, в особенности ЦРЗ, обладающих повышенной чувствительностью к электромагнитным и чисто электрическим импульсным помехам. Указанное обеспечивается введением в конструкцию устройств специальных экранов для защиты отдельных блоков от различного вида электромагнитных и радиопомех. На схемном уровне должны предусматриваться технические решения, обеспечивающие защиту входов чувствительных элементов от перенапряжений и установку специальных фильтров, демпфирующих высокочастотные помехи и отводящих емкостные токи;*

4) *алгоритмические решения, предотвращающие неправильные действия устройств ЦРЗ в случае сбоя программы или возникновения требования к срабатыванию вследствие воздействия импульса помехи на устройство. К таким решениям относятся дополнительный контроль цепи отключения (формирова-*

ние отключающего сигнала по двум и более независимым признакам, например, при наличии сигнала общего пуска), контроль длительности сигнала на срабатывание, проведение повторных измерений контролируемых параметров. Цифровые защиты содержат элементы текущего контроля выполнения отдельных программ и общего контроля исправности (см. гл.10), что также обеспечивает сигнализацию и предотвращает неправильные действия;

5) *контроль качества УРЗ по критериям ЭМС. Устойчивость УРЗ к перенапряжениям, электромагнитным и радиопомехам регламентируется соответствующими национальными и международными стандартами (см. табл. 1.4). Указанные стандарты предусматривают проверку:*

- электрической изоляции независимых цепей (при синусоидальном и импульсном воздействиях);

- на помехоустойчивость при различных по форме и амплитуде одиночных и повторяющихся импульсах и циклически повторяющихся последовательностях (пакетах) высокочастотных импульсов;

- устойчивости к наведенным электромагнитным полям и наведенным радиопомехам;

- устойчивости к электростатическим разрядам.

При оценке устойчивости устройств к влиянию помех фиксируются в соответствии с назначением и условиями функционирования УРЗ:

- виды испытаний;

- степень жесткости в соответствии со стандартами;

- условия испытаний (амплитуды и формы воздействий);

- критерии оценки функционирования ЦРЗ при испытаниях.

При этом в условиях наложения помех фиксируются следующие состояния ЦРЗ:

- отсутствие срабатывания и отсутствие сбоя программы (готовность ЦРЗ к срабатыванию) в нормальном доаварийном режиме. Наиболее опасным при данном испытании является случай, когда входные величины ЦРЗ соответствуют максимально нагрузочному режиму или максимальному расчетному небалансу, например у дифференциальных защит, т.е. измеряемый параметр находится вблизи границы срабатывания;

- устойчивое срабатывание ЦРЗ и отсутствие сбоя программы при имитации повреждения в зоне действия. Опасным в дан-

ном случае является режим КЗ с небольшой кратностью, когда входной параметр находится в зоне действия на минимально допустимом по требованиям точности расстоянии от границы срабатывания. При данных испытаниях фиксируется также возврат ЦРЗ в исходное состояние после устранения повреждения в условиях воздействия сигнала помехи (отсутствие сбоя или перезапуска программы);

б) *оценка соответствия электромагнитной обстановки на энергообъекте допустимым условиям эксплуатации УРЗ.* Учитывая сложность, нелинейность и многофакторность процессов, определяющих амплитуды и формы сигналов помехи, подводимых к УРЗ при КЗ, грозовых разрядах и различного вида коммутациях, применимость расчетных методов допустима лишь в ограниченных случаях для грубого качественного анализа. Более близкие результаты дают измерения, заключающиеся в искусственной генерации определенного вида помех на энергообъекте и фиксации уровня возникающих сигналов на входах УРЗ. Интерполирование полученных результатов для оценки помех в реальных условиях не дает высокой точности в связи с многофакторностью и нелинейностью реальных процессов, но позволяет в первом приближении оценить уровень сигналов на входах УРЗ. В этом плане целесообразно производить мониторинг реальных помех на объектах с помощью систем регистрации, устанавливаемых с целью накопления данных, и введение корректировок в расчетные методы и результаты, полученные измерениями при испытаниях с генерацией сигналов [38, 39].

### **11.9. Обеспечение эксплуатационной эффективности релейной защиты**

Правильный выбор релейной защиты и контроль ее эксплуатационной готовности во многом определяет качество и надежность электроснабжения и способствует предотвращению развития аварий в ЭС, в то время как неправильные действия РЗ могут быть причиной возникновения или развития аварий. Современное развитие электроэнергетики характеризуется рядом факторов, влияющих на уровень эксплуатационной эффективности РЗ. К ним в первую очередь относятся:

- либерализация рынка энергетики, приводящая к более частым сменам режимов и конфигурации ЭС и, следовательно, к

необходимости изменения защитных функций и уставок УРЗ;

- ускоряющееся внедрение цифровых УРЗ различных производителей, имеющих большее число функций, параметров и уставок и в целом функционально более сложных по сравнению с предыдущими поколениями УРЗ;

- ускоряющееся старение аппаратуры релейной защиты предыдущих поколений;

- существенное снижение численности персонала, связанного с обслуживанием УРЗ.

С учетом этого, можно выделить следующие основные факторы, обуславливающие неправильные действия (отказы, излишние или ложные срабатывания) УРЗ:

- невыявленное несоответствие функций УРЗ (прежде всего цифровых) принятой концепции защиты объекта ЭС;

- неправильный выбор защитных функций, параметров и уставок, в том числе вследствие непредусмотренного изменения режима или конфигурации ЭС;

- ошибки в проектировании и монтаже УРЗ;

- ошибки при вводе УРЗ в эксплуатацию;

- неисправности УРЗ, возникшие в процессе эксплуатации вследствие отказа (отклонения параметров элементов), сбоя программы или других причин, в том числе и старения оборудования;

- недостаточная квалификация обслуживающего персонала (до 50% всех отказов УРЗ связаны с ошибками персонала [27]).

Указанные факторы могут привести к тому, что несмотря на существенно более высокое техническое совершенство цифровых УРЗ их реальная эксплуатационная эффективность, особенно на первоначальных этапах, оказывается ниже, чем у защит предыдущих поколений.

Устранению влияния приведенных выше факторов и обеспечению эксплуатационной эффективности УРЗ, в том числе и полноценной реализации преимуществ цифровых УРЗ, способствует выполнение ряда условий, рассматриваемых ниже.

**1. Испытания новых цифровых УРЗ.** В рамках аттестации (сертификации) целесообразно проводить испытания УРЗ в статических и динамических режимах. Данные испытания позволят исключить скрытое (невыявленное) несоответствие функций цифровых УРЗ требованиям принятой в ЭС концепции релейной защиты. При этом не только подтверждаются определенные

данные изготовителя, но и выявляются особенности, связанные с функционированием УРЗ при сложных повреждениях (например, при переходе из одного вида КЗ в другой, насыщении измерительных трансформаторов тока при КЗ, при дуговых повреждениях и т.п.).

**2. Выбор концепции («идеологии»), параметров и уставок РЗ.** Обоснованный выбор концепции РЗ, прежде всего видов защит и защитных функций, глубины резервирования с учетом возможных отказов силового оборудования, измерительных трансформаторов и самих УРЗ, а также выбор параметров и уставок является одним из основных условий обеспечения эксплуатационной эффективности УРЗ. При этом принятые решения должны основываться на полноценном анализе и учете основных влияющих на поведение УРЗ факторов (см. §11.2). Обычная методика, учитывающая лишь несколько выбираемых проектантом режимов ЭС (минимальных и максимальных) может быть использована лишь для простейших конфигураций ЭС, а для ЭС более сложной конфигурации выбор определяющих режимов ЭС требует дополнительного анализа и обоснования. В общем случае правильность выбора уставок и согласования многоступенчатых УРЗ может быть обеспечена с учетом многообразия возможных комбинаций влияющих факторов путем совместного анализа всех УРЗ рассматриваемого района ЭС с наложением на этот район потока различных КЗ (см. §11.3 и 11.4).

С учетом изменяющейся конфигурации защищаемого района ЭС характеристики УРЗ должны быть во многих случаях соответствующим образом изменены. Цифровые УРЗ обладают, как правило, возможностью введения одной из нескольких заранее заданных групп уставок в соответствии с внешними командами (см. §10.3). В общем случае для обеспечения надежности электроснабжения перспективен контроль соответствия уставок и параметров УРЗ текущему состоянию (конфигурации) защищаемого участка ЭС (см. рис. 11.6).

**3. Проектирование цифровых УРЗ.** При проектировании цифровых УРЗ энергообъектов должны быть правильно учтены рекомендации изготовителя и при необходимости проведен в ряде случаев дополнительный анализ. Это относится, прежде всего:

- к оценке особенностей реализации отдельных защитных функций;

- к оценке функционирования защит с учетом возможных отличий характеристик трансформаторов тока в статических и динамических режимах от характеристик трансформаторов тока, при которых гарантируется правильное функционирование применяемых цифровых УРЗ (это особенно важно для дифференциальных и дистанционных защит);

- к правильности выполнения контура заземления и выбору его параметров, а также к правильности выполнения внешнего монтажа кабелей и проводов, подводимых к цифровому УРЗ, что связано с влиянием наведенных импульсных помех в контуре заземления и с различного вида электромагнитными помехами.

**4. Контроль УРЗ при включении в эксплуатацию.** Функциональная сложность многих цифровых УРЗ вследствие большого объема защитных и дополнительных функций, параметров и сообщений определяет возможность ошибок при вводе УРЗ в эксплуатацию. Как отмечалось, отдельные цифровые УРЗ могут содержать до нескольких сотен параметров и уставок, десятки дискретных входов и выходов и множество различного вида сообщений. В этих условиях достаточно важно не только зафиксировать правильность соединения УРЗ с цепями измерительных трансформаторов тока и напряжения, но и обеспечить правильность установки многочисленных параметров и уставок и программирование дискретных входов и выходов и их соединение с другими устройствами РЗА.

Для этого при первом включении осуществляется комплексная проверка работоспособности устройства — его основных защитных функций, выходных сигналов, реагирования УРЗ на различные комбинации входных сигналов. В перспективе целесообразно использование ПК-управляемых испытательных комплексов *со специализированными программами проверки отдельных типов УРЗ*, обеспечивающими проверку данного УРЗ в выбираемом пользователем объеме (например, в объеме проверки при первом включении и др.) с выдачей протокола, фиксирующего объем и результаты проверки. Применение автоматической проверки обеспечивает прежде всего:

- необходимый объем проверки;
- достоверность и правильность проведения проверки;
- снижение требований к квалификации проверяющего персонала и независимость результатов проверки от его ошибок;

- объективную и не зависящую от пользователя фиксацию результатов проверки;
- запоминание хода и результатов проверки на носителе информации и возможность при необходимости ее быстрого повторения (например, после введения изменения параметров или введения новой программной версии).

Рассмотренное не исключает традиционной окончательной проверки УРЗ «под нагрузкой», однако позволяет в ряде случаев сократить объем и длительность этой проверки. Следует отметить, что введение необходимых параметров (уставок) в цифровых УРЗ в редких случаях (в достаточно простых устройствах) делается только вручную. Большинство цифровых УРЗ дополняется служебными программами (см. гл. 10), обеспечивающими ввод параметров и уставок через служебный порт с персонального компьютера или же передачу от устройства высшего уровня. Также с помощью служебных программ фиксируются (распечатываются) установленные параметры и уставки, а также функции (параметрирование) дискретных входов и выходов. Все выставленные параметры и уставки могут контролироваться централизованно с верхнего уровня (см. §10.4).

**5. Контроль готовности УРЗ в эксплуатационных условиях.** Данный вопрос достаточно актуален и относится ко всем устройствам РЗА. К 2006 г. в России и других странах СНГ большинство устройств РЗА, находящихся в эксплуатации, не являются цифровыми, — это электромеханические или статические электронные реле и панели (шкафы), включающие в себя электромеханические реле и частично электронные блоки.

Цифровые УРЗ являются существенно более надежными по сравнению с УРЗ предыдущих поколений с точки зрения возможности аппаратных отказов вследствие старения и выхода из строя отдельных компонентов. Это обусловлено принципиально новой технологией, обеспечивающей существенно меньшее число элементов, внутренних проводных соединений, промежуточных реле и контактов.

Указанное не означает, что периодических эксплуатационных проверок цифровых УРЗ не требуется вообще. Данные УРЗ содержат выходные и сигнальные реле и целый ряд компонентов, в частности аналоговые фильтры и усилители в цепях обработки входных сигналов, отклонение параметров которых или вы-



ход из строя не контролируется полностью встроенными средствами самоконтроля и может привести к существенному отклонению уставок и неправильному действию УРЗ. Существуют и другие причины необходимости периодического эксплуатационного контроля готовности цифровых УРЗ, хотя бы в сокращенном объеме, в том числе проверка отсутствия сбоя программного обеспечения, правильности проведенных изменений уставок, проверка возможности обрыва соединений шкафа (панели), контроль выходных реле и т. д.

В то же время, объем периодических проверок цифровых УРЗ, учитывая их конструктивные свойства, может быть существенно сокращен, если выявлена исправность основных функций.

Периодические проверки цифровых УРЗ также целесообразно проводить с использованием ПК-управляемых средств проверки (см. выше).

В целом, при наличии автоматизированной специализированной программы проверки УРЗ, она может использоваться как при первом включении, так и при дальнейших периодических проверках готовности с возможным сокращением объема проверки.

**6. Централизованный контроль готовности ЦРЗ.** Возможность обмена потоками информации между ЦРЗ и верхним уровнем управления (см. §10.4, рис. 10.9) позволяет осуществлять контроль правильности выставления параметров и уставок, изменять отдельные параметры и уставки, а также производить в необходимых случаях переключение групп уставок централизованно с верхнего уровня управления. Этими же средствами осуществляется в определенном объеме непрерывный контроль готовности ЦРЗ посредством передачи на верхний уровень сообщений функций внутреннего самоконтроля устройств (см. §10.2).

Неисправность ЦРЗ в определенных случаях может быть выявлена путем анализа сообщений и осциллограмм, принимаемых на верхнем уровне управления при пусках ЦРЗ, возникающих вследствие КЗ и коммутаций в ЭС.

**7. Электромеханические и статические электронные УРЗ.** Многие из этих реле находятся в эксплуатации уже несколько десятилетий, содержат по сравнению с цифровыми УРЗ значительно большее число компонентов, подверженных физическому старению (нарушение контактных соединений, разрушение

пластмассовых материалов, отказы измерительных систем), что обуславливает целесообразность их более частого периодического контроля. Существующие инструкции по проверкам данных устройств включают в себя достаточно трудоемкую проверку отдельных блоков, в том числе операции с настройкой электромеханических элементов (промежуточных реле, трансформаторов с регулируемым зазором и т.д.), требующие сравнительно больших затрат времени и специальную подготовку квалифицированного персонала.

Учитывая преобладающий парк этих УРЗ и тенденцию сокращения обслуживающего персонала, обеспечение эксплуатационной готовности данных УРЗ и, прежде всего, выявление их неисправностей, является актуальной проблемой. Ее решением может быть, как и в других случаях, создание специализированных автоматических и полуавтоматических средств проверки, обеспечивающих необходимую диагностику исправности УРЗ. Современные технические средства проверки делают данную задачу вполне реальной. При этом панель (шкаф) релейной защиты на большинстве этапов проверки может рассматриваться как «черный ящик», к зажимам которого ПК-управляемое средство проверки подводит все необходимые комбинации сигналов переменного тока и напряжения и дискретные сигналы для диагностирования работоспособности УРЗ, осуществляемого на основе анализа выходных сигналов. По результатам диагностики принимаются решения о необходимом восстановлении или модернизации УРЗ.

В табл. 11.2 приведены основные составляющие, обеспечивающие эксплуатационную эффективность УРЗ.

**8. Оптимизация объема функций УРЗ и типизация решений.** Результаты эксплуатации показывают на начальных этапах отсутствие существенного преимущества цифровых УРЗ перед предыдущими поколениями релейной защиты в части показателей правильной работы, например [27, 43]. Указанное не ставит под сомнение развитие направления техники релейной защиты в области цифровых УРЗ, тесно связанного с общим техническим прогрессом в части повышения технологичности изделий, уменьшения затрат материалов и массогабаритных показателей. Помимо возможности интегрирования в общую информационно-управляющую систему энергообъектов, цифровые УРЗ обладают такими существенными преимуществами как:

- низкое потребление по входным цепям тока и напряжения, что снижает нагрузку на измерительные трансформаторы тока и напряжения, повышает качество характеристик самих УРЗ и позволяет использовать современное оборудование для автоматизированной проверки;

- высокая аппаратная надежность, достигаемая как интеграцией функций и снижением числа внутренних соединений, так и более глубоким самоконтролем исправности;

- возможность реализации качественно новых защитных функций;

- возможность принципиально новой организации обслуживания (дистанционное управление параметрами и уставками, фиксация сообщений и т.п.);

- потенциальная возможность снижения затрат на обслуживание УРЗ ввиду отсутствия требующих периодической ручной проверки и настройки электромеханических элементов и увеличения периодов профилактического восстановления.

В общей совокупности факторов, определяющих эксплуатационную эффективность УРЗ (табл.11.2), следует особо выделить следующие факторы, связанные с увеличением вероятности ошибок проектирующего и эксплуатационного персонала:

- *чрезмерное усложнение во многих случаях цифровых УРЗ, содержащих неоправданно большое количество основных и вспомогательных функций, параметров, сообщений, уставок, что затрудняет понимание их функционирования и, как следствие, усложняет проектирование и эксплуатацию, увеличивая вероятность ошибок. Следует иметь в виду, что персонал, проектирующий использование и эксплуатирующий цифровые УРЗ не всегда обладает совокупными знаниями разработчиков этого продукта, имеющего десятки, а иногда и сотни параметров, что вызывает в определенных случаях затруднения;*

- *использование при проектировании защиты энергообъектов неоправданно большого числа часто дублирующих друг друга основных и вспомогательных функций, в том числе и элементов свободно-программируемой логики (гл. 10). Это существенно усложняет комплектные устройства с цифровыми УРЗ и коммуникационные связи между ними, усложняет способы фиксации их исправности и увеличивает объемы проверки;*

- *недостаточно полноценные описания функций цифровых*

Таблица 11.2. Составляющие эксплуатационной эффективности УРЗ

№	Составляющие эксплуатационной эффективности	Методы обеспечения и контроля	Этапы реализации
1	Правильность функций УРЗ и их соответствие требованиям ЭС	Анализ функций. Полноценные аттестационные испытания. Автоматизация испытаний и протоколирование	Стадия принятия решений об использовании УРЗ
2	Выбор концепции РЗ объекта, защитных функций и уставок УРЗ	Анализ возможных вариантов. Полноценные расчеты с учетом многообразия режимов ЭС и видов КЗ. Использование специальных программ для охвата возможных режимов. Выбор групп уставок (для ЦРЗ). Учет характеристик измерительных трансформаторов	Проектирование РЗ объекта
3	Правильность реализации проекта	Контроль качества на этапах проектирования и монтажа. Учет особенностей монтажа оборудования с цифровыми УРЗ (электромагнитная совместимость)	Проектирование и монтаж УРЗ
4	Правильное выставление уставок и подключения УРЗ	Подготовка квалифицированного персонала. Использование служебных программ для ввода уставок. Использование специализированных проверочных устройств. Централизованный контроль на верхнем уровне (для ЦРЗ)	Ввод в эксплуатацию
5	Текущая готовность УРЗ к правильному действию	Периодические проверки с использованием специализированных проверочных устройств. Анализ сообщений и осциллограмм при КЗ и коммутациях в ЭС. Централизованный анализ сообщений на верхнем уровне (для ЦРЗ)	В процессе эксплуатации

*УРЗ, методик выбора их конфигураций, уставок, параметров и рекомендации по проектированию;*

- отсутствие в ряде случаев полноценной документации по введенным в эксплуатацию комплектным устройствам с цифровыми УРЗ с фиксацией (описанием) принятых на данном объекте решений. Указанное особенно важно при последующей эксплуатации в связи с существенным снижением доли типовых решений при выполнении ЦРЗ с использованием изделий различных изготовителей;*

- отсутствие во многих случаях методик и норм проверок при вводе в эксплуатацию и при профилактическом контроле.

В совокупности все перечисленное затрудняет эксплуатацию и увеличивает вероятность неправильных действий УРЗ.

Следует отметить, что существует определенный предел увеличения объема, сложности и числа используемых в конкретном проекте защитных функций, превышение которого с учетом растущего объема обрабатываемой информации и реальными возможностями эксплуатационного персонала становится неоптимальным. Дальнейшее усложнение проектов УРЗ объекта увеличивает вероятность различного рода ошибок. Следует также иметь в виду, что любое увеличение числа используемых параллельно функций увеличивает вероятность излишнего срабатывания. Достаточно эффективное функционирование УРЗ предыдущих поколений, несмотря на все их недостатки по сравнению с цифровыми УРЗ и имеющийся опыт, дают в определенных случаях ориентиры в части минимального объема необходимых защитных функций.

Во многих случаях, особенно при выполнении логики комплектных устройств с цифровыми УРЗ, необходимо учитывать новые функциональные возможности цифровых УРЗ и не повторять прежние достаточно громоздкие решения, в том числе с использованием большого числа переключателей и накладок.

Негативное влияние перечисленных выше факторов на функционирование УРЗ в существенной степени уменьшится, если при рассмотрении концепции релейной защиты объектов, принадлежащих определенной структуре, стремиться по возможности к *оптимизации и типизации решений*, прежде всего в части структуры, объема и вида функций цифровых УРЗ отдельных типов объектов. Указанное обеспечит повышение практически всех составляющих эксплуатационной эффективности УРЗ в том числе и уменьшение нагрузки на проектирующий и эксплуатационный персонал, облегчит введение методик и норм проектирования и проверки цифровых УРЗ.

Таким образом, эффективность цифровых УРЗ, в том числе и снижение затрат на эксплуатацию, не достигается автоматически только установкой устройств и может быть реализована лишь при обеспечении соответствующих условий при проектировании и эксплуатации.

## Приложение 1

### Отображение области, ограниченной двумя лучами, дробно-линейным преобразованием

Рассмотрим плоскость  $w$  (рис. П.1.1,а) и область этой плоскости, ограниченную лучами 1 и 2, проходящими соответственно под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  к оси абсцисс (область заштрихована).

Эта область описывается неравенством

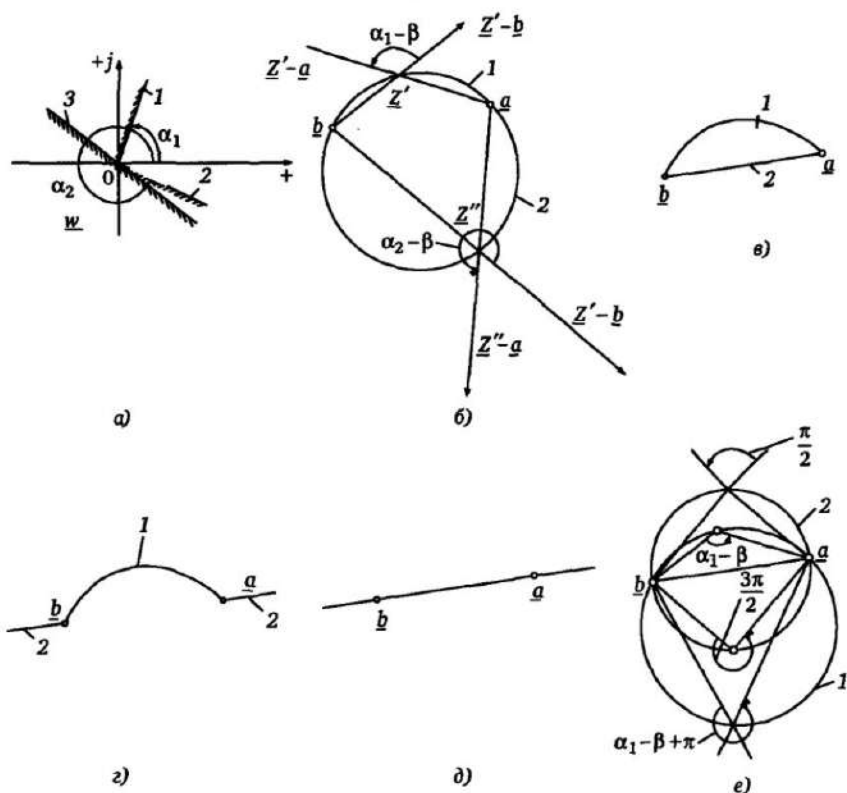


Рис. П.1.1. Отображения областей, ограниченных прямыми в плоскости  $w$ , на плоскость  $Z$

$$\alpha_1 \leq \arg w \leq \alpha_2, \quad (\text{П1.1})$$

которому удовлетворяют все точки  $w$  области.

Рассмотрим другую комплексную плоскость  $Z$ , характеризующую тем, что каждая ее точка получается следующим преобразованием точек плоскости  $w$ :

$$\underline{Z} = -\frac{k_2 w - k_4}{k_1 w - k_3},$$

т.е. каждой точке  $Z$  соответствует точка плоскости, определяемая следующим дробно-линейным преобразованием:

$$\underline{w} = \frac{k_3 Z + k_4}{k_1 Z + k_2}. \quad (\text{П1.2})$$

Найдем конфигурацию области в плоскости  $Z$ , получаемой применением преобразования (П1.2) к точкам плоскости, расположенным внутри заштрихованной области на рис. П1.1,а, т.е. отображение заданной области в плоскости  $w$  на плоскость  $Z$  дробно-линейным преобразованием (П1.2).

Неравенство (П1.1) можно представить как систему неравенств  $\arg w \geq \alpha_1$ ;  $\arg w \leq \alpha_2$ . Граничная линия в плоскости  $1$ , отделяющая область, соответствующую первому из неравенств, определяет луч  $l$  в плоскости  $w$  и описывается соотношением  $\arg w = \alpha_1$ , которое с учетом (П1.2) имеет вид

$$\arg \frac{k_3 Z + k_4}{k_1 Z + k_2} = \alpha_1. \quad (\text{П1.3})$$

Приняв обозначения

$$\underline{k} = \frac{k_3}{k_1}; \quad \beta = \arg \frac{k_3}{k_1}; \quad \underline{a} = -\frac{k_4}{k_3}; \quad \underline{b} = -\frac{k_2}{k_1}, \quad (\text{П1.4})$$

из (П1.3) получим

$$\arg \frac{Z - \underline{a}}{Z - \underline{b}} = \alpha_1 - \beta. \quad (\text{П1.5})$$

Для удовлетворения условию (П1.5) точки  $\underline{Z} = \underline{Z}'$  должны располагаться в плоскости  $\underline{Z}$  таким образом, чтобы угол между векторами  $Z'-a$ ,  $Z'-b$  был постоянен. Этому условию при  $\alpha_1 - \beta \neq 0$ ;  $\alpha_1 - \beta \neq \pi$  удовлетворяют только точки  $\underline{Z}'$ , расположенные на дуге окружности  $\underline{aZ'b}$ , опирающейся на точки  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$  и имеющей вписанный угол  $\alpha_1 - \beta$  (линия 1 на рис. П1.1,б). Условие (П1.5) определяет граничную линию плоскости  $\underline{Z}$ , соответствующую граничной линии в плоскости по  $\underline{w}$ -условию (П1.3).

Аналогично получим вторую граничную линию в плоскости  $\underline{Z}$ , соответствующую лучу 2 в плоскости  $\underline{w}$  (рис. П1.1,а), описываемую соотношением  $\arg \underline{w} = \alpha_2$ , которое с учетом (П1.2) принимает вид

$$\arg \frac{k_3 \underline{Z} + k_4}{k_1 \underline{Z} + k_2} = \alpha_2. \quad (\text{П1.6})$$

С учетом (П1.4) из (П1.6) имеем

$$\arg \frac{\underline{Z} - \underline{a}}{\underline{Z} - \underline{b}} = \alpha_2 - \beta. \quad (\text{П1.7})$$

Соотношению (П1.7) соответствует дуга 2 на рис. П1.1,б, опирающаяся на точки  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$  и имеющая вписанный угол  $\alpha_1 - \beta$ . На этой дуге лежат точки  $\underline{Z} = \underline{Z}''$ , удовлетворяющие условию (П1.7). Таким образом, лучам 1 и 2 в плоскости  $\underline{w}$  при отображении плоскости  $\underline{w}$  на плоскость  $\underline{Z}$  дробно-линейным преобразованием (П1.2) соответствуют при  $\alpha_{1,2} - \beta \neq 0$ ,  $\alpha_{1,2} - \beta \neq \pi$  две дуги окружности, опирающиеся на точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  с вписанными углами  $\alpha_1 - \beta$ ,  $\alpha_2 - \beta$ . Области  $\underline{w}$ , находящиеся между двумя лучами в плоскости  $\underline{w}$ , соответствует область плоскости  $\underline{Z}$ , расположенная внутри или вне замкнутой фигуры, образованной дугами 1, 2 на рис. П1.1,б. Эта область с учетом (П1.5) и (П1.7) описывается соотношением

$$\alpha_1 - \beta \leq \arg \frac{\underline{Z} - \underline{a}}{\underline{Z} - \underline{b}} \leq \alpha_2 - \beta. \quad (\text{П1.8})$$

Определить соответствие областей в плоскостях  $\underline{w}$  и  $\underline{Z}$  можно следующим образом. Подставляя в (П1.2)  $\underline{Z} = \infty$ , получаем



$\underline{w} = k_3/k_1$ , т.е. с учетом (П1.4)  $\arg \underline{w} = \beta$ . Таким образом, область плоскости  $\underline{w}$ , в которой находится луч  $\arg \underline{w} = \beta$ , соответствует той области плоскости  $\underline{z}$ , в которой находятся точки  $\underline{z} = \infty$ . В частности, если луч  $\arg \underline{w} = \beta$  расположен в незаштрихованной области в плоскости  $\underline{w}$ , т.е.  $\alpha_1 \leq \alpha_2$  (рис. П1.1,а), то этой области соответствует область вне полученной замкнутой линии в области  $\underline{z}$ , содержащей и точки  $\underline{z} = \infty$  (срабатывание внутри замкнутой линии в плоскости  $\underline{z}$ ). Если же луч  $\arg \underline{w} = \beta$  лежит в заштрихованной области, то этой области соответствует область, охваченная дугами 1, 2 в плоскости  $\underline{z}$  (срабатывание вне замкнутой линии в плоскости  $\underline{z}$ ). Начало координат в плоскости  $\underline{w}$  соответствует точке  $\underline{z} = a$  в плоскости  $\underline{z}$ , так как из (П1.2) следует  $\underline{w} = 0$  при  $\underline{z} = a$ . Точка  $b$  в плоскости  $\underline{z}$  соответствует  $\underline{w} = \infty$ , что также следует из (П1.2).

**Некоторые важные частные случаи.**

1. При  $\alpha_1 - \beta = \pi$  или  $\alpha_2 - \beta = \pi$  соответствующие дуги 1 или 2 на рис. П1.1,б превращаются в прямые, соединяющие точки  $a$  и  $b$  (рис. П1.1,в при  $\alpha_2 - \beta = \pi$ ).

2. При  $\alpha_1 - \beta = 0$  или  $\alpha_2 - \beta = 0$  соответствующие дуги превращаются в окружности с бесконечно большим радиусом. Граничная линия образуется участками прямой, проходящими через точки  $a$ ,  $b$ , расположенными вне отрезка  $\underline{ab}$  (рис. П1.1,г,  $\alpha_2 - \beta = 0$ ).

3. При  $\alpha_1 - \alpha_2 = \pi$  граничная линия в плоскости  $\underline{w}$  есть прямая линия (прямая 3 на рис. П1.1,а). Область, охватываемая граничной линией в плоскости  $\underline{z}$ , с учетом (П1.8) описывается соотношением

$$\alpha_1 - \beta \leq \arg \frac{\underline{z} - a}{\underline{z} - b} \leq \pi + \alpha_1 - \beta \quad (\text{П1.9})$$

и соответствует  $\alpha_1 - \beta \neq 0$ ;  $\alpha_1 - \beta \neq \pi$  при окружности, проходящей через точки  $a$  и  $b$  (рис. П1.1,е характеристика 1). В частности, при  $\alpha_1 - \beta = \pi/2$ ,  $\alpha_2 - \beta = 3\pi/2$ , т.е. при

$$\frac{\pi}{2} \leq \arg \frac{\underline{z} - a}{\underline{z} - b} \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (\text{П1.10})$$

точки  $a$  и  $b$  расположены по концам диаметра окружности (рис. П1.1,е, характеристика 1).

4. При  $\alpha_1 - \beta = 0$ ;  $\alpha_2 - \beta = \pi$ , т.е. при условии

$$0 \leq \arg \frac{Z - \underline{a}}{Z - \underline{b}} \leq \pi, \quad (\text{П1.11})$$

прямой  $\mathcal{Z}$  в плоскости  $\underline{w}$  соответствует прямая в плоскости  $\underline{Z}$ , проходящая через точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  (рис. П1.1,д), так как с учетом рассмотренных выше случаев одна из дуг превращается в отрезок  $\underline{a}\underline{b}$ , а другая — в продолжение этого отрезка. Область, соответствующая (П1.11), находится слева от прямой при движении от  $\underline{b}$  к  $\underline{a}$ .

## Приложение 2

### Отображение области, ограниченной окружностью с центром в начале координат, дробно-линейным преобразованием

Рассмотрим в плоскости  $w$  область, ограниченную окружностью единичного радиуса (заштрихованная область на рис. П2.1, а).

Эта область описывается неравенством

$$|w| \leq 1. \quad (\text{П2.1})$$

Рассмотрим отображение этой области на комплексную плоскость  $Z$  на основе дробно-линейного преобразования (П1.2). Уравнение граничной линии этой области в плоскости  $Z$  с учетом (П2.1) примет вид  $|w| \leq 1$ , откуда, используя (П1.2), получаем

$$\left| \frac{k_3 Z + k_4}{k_1 Z + k_2} \right| = 1, \quad (\text{П2.2})$$

или с учетом обозначений (П1.4)

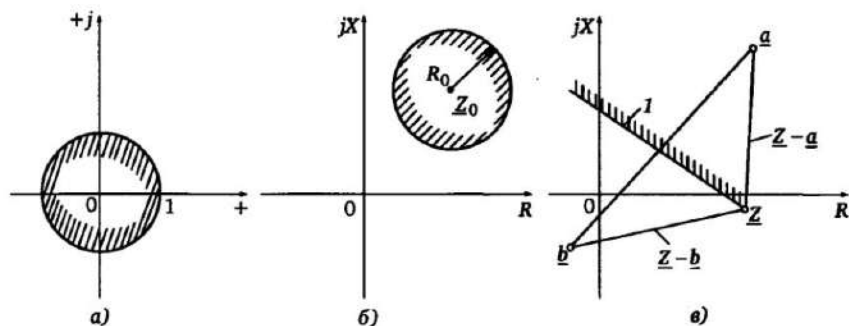


Рис. П2.1. Отображение области, ограниченной окружностью с центром в начале координат в плоскости  $w$ , на плоскость  $Z$

$$k \left| \frac{\underline{z} - \underline{a}}{\underline{z} - \underline{b}} \right| = 1. \quad (\text{П2.3})$$

Преобразуем (П2.3), раскрыв скобки и возведя обе части в квадрат, при обозначениях

$$\underline{z} = ze^{j\varphi}, \quad \underline{b} = be^{j\varphi_1}, \quad \underline{a} = ae^{j\varphi_2}. \quad (\text{П2.4})$$

В результате при  $k \neq 1$

$$k^2 \frac{z^2 - 2za \cos(\varphi - \varphi_2) + a^2}{z^2 - 2zb \cos(\varphi - \varphi_1) + b^2} = 1; \quad (\text{П2.5})$$

$$z^2 - 2z \frac{k^2 a \cos(\varphi - \varphi_2) - b \cos(\varphi - \varphi_1)}{k^2 - 1} + \frac{k^2 a - b}{k^2 - 1} = 0. \quad (\text{П2.6})$$

После ряда преобразований с учетом (П2.4) получим

$$\frac{k^2 a \cos(\varphi - \varphi_2) - b \cos(\varphi - \varphi_1)}{k^2 - 1} = z_0 \cos(\varphi - \varphi_0),$$

где

$$z_0 = \frac{\sqrt{k^4 a^2 - 2k^2 ab \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + b^2}}{k^2 - 1} = \frac{|k^2 \underline{a} - \underline{b}|}{k^2 - 1}; \quad (\text{П2.7})$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{k^2 a \sin \varphi_2 - b \sin \varphi_1}{k^2 a \cos \varphi_2 - b \cos \varphi_1} = \arg(k^2 \underline{a} - \underline{b}). \quad (\text{П2.8})$$

Уравнение (П2.6) примет при этом вид

$$z^2 - 2zz_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \frac{k^2 a - b}{k^2 - 1} = 0, \quad (\text{П2.9})$$

что соответствует в комплексной плоскости  $\underline{z}$  окружности (рис. П2.1,б) с координатой центра

$$\underline{Z}_0 = \frac{k^2 \underline{a} - \underline{b}}{k^2 - 1} \quad (\text{П2.10})$$

и радиусом

$$R_0 = \frac{k|\underline{a} - \underline{b}|}{|k^2 - 1|}. \quad (\text{П2.11})$$

Таким образом, при  $k \neq 1$  окружность в плоскости  $\underline{w}$  отображается в плоскости  $\underline{Z}$  дробно-линейным преобразованием (П1.2) в окружность с параметрами  $\underline{Z}_0$ ,  $R_0$ , определяемыми (П2.10) и (П2.11). При  $k = 1$  из (П2.3) следует, что геометрическое место расположения точек  $\underline{Z}$  есть прямая  $l$ , равноудаленная от особых точек  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  (рис. П2.1,в), так как только в этом случае выполняется условие  $|\underline{Z} - \underline{a}| = |\underline{Z} - \underline{b}|$ .

Соответствие областей в плоскостях  $\underline{w}$  и  $\underline{Z}$  определится на основе следующего. Уравнение области в плоскости  $\underline{Z}$ , соответствующей в плоскости  $\underline{w}$  области внутри окружности единичного радиуса (рис. П2.1,а) с учетом (П2.3) имеет вид

$$k \left| \frac{\underline{Z} - \underline{a}}{\underline{Z} - \underline{b}} \right| \leq 1. \quad (\text{П2.12})$$

При  $\underline{Z} = \infty$  условие (П2.12) выполняется при  $k < 1$ , т.е. в этом случае заштрихованная область внутри окружности в плоскости  $\underline{w}$  соответствует области вне окружности в плоскости  $\underline{Z}$ . И, наоборот, при  $k > 1$  имеется соответствие областей внутри окружностей в плоскостях  $\underline{w}$  и  $\underline{Z}$  (рис. П2.1,б). При  $k = 1$  области внутри окружности в плоскости  $\underline{w}$  соответствует та полуплоскость  $\underline{Z}$ , в которой расположена точка  $\underline{a}$ , так как при  $\underline{Z} = \underline{a}$  условие (П2.12) выполняется.

## Список литературы

1. **Международный стандарт IEC 50 (448) Защита энергетических систем.** Женева, 1995.
2. **IEEE Standart Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations (IEEE Std C37.2 — 1996):** New York, USA, 1997.
3. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976.
4. **Атабеков Г. И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
5. **Шнеерсон Э.М.** Дистанционные защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. **Фабрикант В.Л.** Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. М.: Высшая школа, 1968.
7. **Ziegler G.** Digitaler Distanzschutz. Erlangen: Publicis — MCD-Verl., 1999.
8. **Ziegler G.** Digitaler Differentialschutz. Erlangen: Publicis Corporate Publisching, 2004.
9. **Siprotec Numerical Protection Relays (Siemens).** Catalog SIP, 2006.
10. **Monaghan J.** Analysis of relaying performance for high resistance single phase faults on a solidly grounded 110 kV system with no ground wires. CIGRE Paper 34—05, 1976.
11. **Meinnes A.D., Morrison I.F.** Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer // IEEE Trans. Institution of Engineers Australia. 1971. № 1. P. 16—31.
12. **Cook V.** Analysis of Distance Protection; Research Studies Press Ltd. Letchworth, Herfordshire, England, 1985.
13. **Мутон, Суллар.** Быстродействующие статические реле сопротивления. В кн.: Современная релейная защита (СИГРЭ, 1968). М.: Энергия, 1970.
14. **Оппенгеймер А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов. М.: Связь, 1979.
15. **Шнеерсон Э.М.** Динамика сложных измерительных органов релейной защиты. М.: Энергоатомиздат, 1981.
16. **Братен Ж.** Наиболее целесообразные формы реле сопротивления. В кн.: Современная защита (СИГРЭ, 1968). М.: Энергия, 1970.
17. **Herrman H.-J.** Digitale Schutztechnik. VDE-Verlag, Berlin and Offenbach. 1997.
18. **Шнеерсон Э.М.** Динамические свойства релейных защит на основе выделения составляющих взаимно ортогональных функций // Электричество. 1984. № 1.
19. **Коршунов Ю.М.** Математические основы кибернетики. М.: Энергия, 1980.
20. **Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Арсентьев А.П.** Спектральный анализ переходных процессов в электрических сетях // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 1992. №2.
21. **Казовский Б.Я., Руисов Г.В., Аксенова Л.Я.** Крутильные колебания валопроводов турбогенераторов при асинхронном ходе возбужденного турбогенератора // Электротехника. 1982. №1.
22. **Müller L., Boog E.** Selektivschutz elektrischer Anlagen. Frankfurt am Main: VWEW-Verlag, 1990.

23. Шнеерсон Э.М. Траектории входного сопротивления синхронного генератора в асинхронном режиме // *Электричество*. 1988. №1.
24. Шнеерсон Э.М., Федоров Э.К. Дистанционный принцип защиты синхронных генераторов от асинхронных режимов // *Электричество*, 1989. №6.
25. *Техническое руководство по применению реле MICOM P24Л*. Фирма ALSTOM, 2002.
26. Iar M., Reimann B., Brunner D. Numerischer Sammelschienenschutz — neue Schutzmöglichkeiten durch Dezentralisierte Installation // *ABB-Technik*. 1997. №5.
27. Коновалова Е.В. Основные результаты работы РЗА на объектах ЕНЭС // *Релейная защита и автоматика энергосистем*, 2006.
28. *Техническое руководство по применению реле защиты SEPAM-1000* // Фирма Schneider Electric. 2002.
29. Bredthauer J., Struck N. Schutz- und Sicherheitsaspekte beim Hohlauf grosser Hochspannungsmotoren // *etz*. 1995. №617.
30. *Motorschutz 7SK52*. Handbuch. Siemens. 1993.
31. Sashdev M.S., Baribeau M.A. A new algorithm for digital impedance relays // *IEEE Trans. on PAS*. 1979. Vol. 98. №6.
32. Kaiser S. Unterschiedliche Ausprägungen der Impedanzanpassung in Distanzschutzgeräten // *Omicron electronics. Anwendertag*. 2004.
33. Warrington A.R.C. Protective Relays. Their Theory and Practice. Verlag Chapman and Hall, Band 1, London, 1962.
34. *Guide on EMC in Power Plants and Substations* // *CIGRE Publ.* 124, 1997.
35. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике при замыканиях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1986.
36. Фейст П.К. Исследование работы дистанционных реле методом круговых диаграмм в комплексной плоскости сопротивлений // *Тр. ЦНИИЭЛ*, 1953.
37. Clarke E. Impedances Seen bei Relays During Power Swings with and without Faults, *AIEE Tr.* 1945. Т. 64.
38. *Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электронике* / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. М.: Мир; Энергоатомиздат, 2003.
39. Матвеев М.В. Помехи на объекте и устойчивость аппаратуры РЗА // *Новости электротехники*. 2004. №2 (26).
40. Krebs R. Schutzauslöseverfahren. Europäische Patentschrift, EP 0660973B1 // *Patentblatt* 1996 / 19.
41. Сирота И.М., Богаченко А.Б. Защита от замыканий на землю на стороне генераторного напряжения блоков генератор-трансформатор, охватывающая нейтраль генератора. Киев: Изд-во АН УССР, 1972.
42. Knuffer E.F., Nimes K., Neuartiger Stenderendschlusschutz für Hochspannungsmaschinen // *Siemens — Zeitschrift*. 1972. №12.
43. Шалин А.И. Об эффективности новых устройств РЗА // *Энергетика и промышленность России*. 2006. №1 (65).
44. Врублевский Ю. Односистемное трехфазные реле сопротивления для всех видов коротких замыканий // *Пржеглад электротехник*. 1964. №3.
45. Schneerson E., Liebach T. Verfahren zur Überwachung eines Schutzgerätes // *Europäische Patentschrift* EP1004162B1, 1998.
46. Schneerson E., Bewertung and Verifizierung der Qualität des Schutzes für elektrische Netze // *Elektrizitätswirtschaft*, Jg. 99 (2000). Heft 21.
47. Фабрикант В.Л. Дистанционная защита. М.: Высшая школа, 1978.

## Оглавление

Предисловие .....	3
Список сокращений .....	6
<b>Глава 1. Принципы построения релейной защиты .....</b>	<b>7</b>
1.1. Назначение релейной защиты .....	7
1.2. Структура РЗ и используемая информация .....	7
1.3. Виды повреждений .....	12
1.4. Основные требования к защитным функциям .....	14
1.4.1. Чувствительность .....	14
1.4.2. Селективность .....	16
1.5. Релейная защита с относительной селективностью .....	16
1.6. Релейная защита с абсолютной селективностью .....	19
1.7. Измеряемые величины и критерии измерения, используемые в релейной защите .....	22
1.7.1. Критерии, зависящие от одной величины (ток или напряжение) .....	23
1.8. Классификация защитных функций .....	27
1.9. Основные требования, предъявляемые к устройствам релейной защиты .....	30
1.9.1. Общие требования .....	30
1.9.2. Статическая устойчивость функционирования .....	31
1.9.3. Динамическая устойчивость функционирования .....	31
1.9.4. Устойчивость к влиянию внешней среды .....	32
1.9.5. Надежность .....	33
1.10. Основные элементы цифровой релейной защиты .....	35
<b>Глава 2. Измерительные органы цифровой релейной защиты .....</b>	<b>39</b>
2.1. Общие положения .....	39
2.1.1. Структура цифровых измерительных органов .....	39
2.1.2. Предварительная обработка аналоговых сигналов .....	43
2.1.3. Векторное отображение дискретизированных синусоидальных сигналов .....	45
2.2. Алгоритмы цифрового преобразования сигналов релейной защиты .....	48
2.2.1. Общие сведения .....	48



2.2.2. Вычисление средних и действующих значений сигналов	49
2.2.3. Вычисление векторов на основе мгновенных значений величин и их производных	50
2.2.4. Алгоритм двух выборок	52
2.2.5. Алгоритмы на основе дифференциального уравнения линии	55
2.2.6. Алгоритмы ЦИО на основе выделения составляющих ортогональных функций	56
2.3. Измерительные органы одной электрической величины	60
2.4. Цифровые измерительные органы направления мощности	63
2.4.1. Характеристики срабатывания	63
2.4.2. ЦИО с использованием ортогональных составляющих векторов	65
2.4.3. Непосредственное использование выборок мгновенных значений величин	67
2.4.4. Выбор измеряемых величин в ЦИО направления мощности	69
2.4.5. ЦИО направления мощности симметричных составляющих	71
2.5. Цифровые дистанционные органы	73
2.5.1. Входные величины и характеристики срабатывания дистанционных органов	73
2.5.2. Пофазные и трехфазные дистанционные органы	74
2.5.3. Цифровые ДО на основе сравнения абсолютных значений электрических величин	77
2.5.4. Дистанционные органы на основе сравнения фаз двух электрических величин	80
2.5.5. Цифровые ДО с полигональными и комбинированными характеристиками на основе сравнения электрических величин	83
2.5.5. Цифровые ДО на основе непосредственного вычисления $Z$	86
2.7. Трехфазные дистанционные органы	94

<b>Глава 3. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты</b>	<b>108</b>
3.1. Уравнения и характеристики цифровых фильтров	108
3.2. Частотные характеристики и передаточные функции ЦФ	112
3.3. Частотные характеристики алгоритмов цифрового измерения синусоидальных величин	117
3.4. Частотные характеристики алгоритма Фурье	124
3.5. Динамические характеристики ЦИО	128
3.5.1. Факторы, обуславливающие динамические свойства ЦИО	128
3.5.2. Собственные динамические характеристики ЦИО	129
3.6. Быстродействующее вычисление векторов на основе фильтров с изменяемыми коэффициентами	137
3.6.1. Постановка вопроса	137

3.6.2. Общий случай фильтра ортогональных составляющих с числом коэффициентов $M < N$ .....	138
3.6.3. Расчет коэффициентов фильтра ортогональных составляющих в общем случае $M < N$ .....	144
3.6.4. Быстродействующие фильтры Фурье ортогональных составляющих .....	147
3.7. Алгоритмы, использующие критерии идентификации сигналов .....	151
3.7.1. Общие понятия .....	151
3.7.2. Особенности использования алгоритмов идентификации в релейной защите .....	153
3.8. Влияние режима электрической системы на динамические свойства релейной защиты .....	157
3.8.1. Установившиеся и свободные составляющие в формируемых величинах .....	157
3.8.2. Критерий интенсивности сигнала помехи .....	159
3.8.3. Области опасных режимов ЭС по критерию интенсивности сигнала помехи .....	162
<b>Глава 4. Токовые и токовые направленные цифровые защиты .....</b>	<b>165</b>
4.1. Формирование токов и напряжений, измеряемых релейной защитой .....	165
4.1.1. Подключение РЗ к измерительным трансформаторам тока и напряжения .....	165
4.1.2. Статические погрешности ТТ и ТН .....	166
4.1.3. Особенности функционирования ТТ в динамических режимах и режимах насыщения .....	169
4.1.4. Емкостные трансформаторы напряжения .....	172
4.2. Максимальная токовая защита .....	173
4.2.1. Основные функции .....	173
4.2.2. Построение ступени МТЗ с независимой выдержкой времени .....	177
4.2.3. Блокирование МТЗ при броске намагничивающего тока силового трансформатора .....	179
4.2.4. МТЗ с независимой выдержкой времени и регулируемым временем возврата .....	181
4.2.5. МТЗ с зависимой от тока выдержкой времени (МТЗЗ) .....	183
4.2.6. Использование пусковых и блокирующих сигналов в МТЗ .....	185
4.3. Токовые защиты на основе измерения симметричных составляющих .....	183
4.3.1. Общие положения .....	183
4.3.2. Токовая защита обратной последовательности .....	188
4.3.3. Токовая защита нулевой последовательности .....	190
4.4. Токовые защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с малым током замыкания на землю .....	192
4.5. Защиты на основе контроля напряжения сети .....	197
4.6. Направленные токовые защиты .....	201
4.6.1. Общие положения .....	201
4.6.2. Структура токовой направленной защиты .....	204
4.6.3. Чувствительная направленная токовая защита нулевой последовательности сетей с изолированной нейтралью .....	206

4.6.4. Использование двустороннего измерения направления мощности .....	211
<b>Глава 5. Защита от тепловой перегрузки .....</b>	<b>215</b>
5.1. Общие положения .....	215
5.2. Тепловая модель измерения температуры .....	216
5.3. Элементы реализации цифровой тепловой защиты .....	221
5.4. Токовая защита и контроль числа включений электродвигателя ..	215
<b>Глава 6. Цифровые дифференциальные защиты .....</b>	<b>234</b>
6.1. Дифференциальные защиты на основе непосредственного сравнения токов .....	234
6.2. Дифференциальные защиты с использованием торможения сравнимыми токами .....	236
6.2.1. Принцип выполнения .....	236
6.2.2. Основные функциональные блоки дифференциальной защиты .....	243
6.2.3. Чувствительность и селективность дифференциальных защит с непосредственным сравнением токов .....	245
6.3. Дифференциальные защиты с торможением от расчетной погрешности .....	251
6.4. Особенности выполнения цифровых дифференциальных защит трансформаторов .....	256
6.5. Продольные дифференциальные защиты ВЛ .....	260
6.5.1. Защиты линий с непосредственным сравнением токов ..	260
6.5.2. Дифференциальные защиты на основе обмена цифровыми сигналами .....	263
6.5.3. Дифференциально-фазные защиты линий на основе обмена цифровыми сигналами .....	266
6.6. Цифровые дифференциальные защиты сборных шин .....	269
6.6.1. Измерительная часть .....	269
6.6.2. Структура цифровой дифференциальной защиты сборных шин .....	277
6.7. Требования к измерительным трансформаторам тока .....	279
<b>Глава 7. Дистанционные защиты .....</b>	<b>284</b>
7.1. Дистанционный принцип в защите линий электропередачи ..	284
7.2. Сопротивления на входах ДЗ при металлических повреждениях ..	291
7.3. Сопротивления на входах ДЗ при переходном сопротивлении в месте КЗ .....	298
7.3.1. Междофазные КЗ .....	298
7.3.2. Однофазные КЗ .....	304
7.3.3. Влияние сопротивления электрической дуги и переходного сопротивления опоры на дистанционное измерение .....	309
7.3.4. Корректировка Z-измерений при двустороннем питании ..	313
7.3.5. Снижение погрешности при использовании модифицированной граничной линии реактивного сопротивления .....	317
7.4. Траектории Z при КЗ через переходное сопротивление (общий случай) .....	320
7.5. Замер дистанционных защит при повреждениях на параллельных линиях .....	326
7.6. Сопротивление на входах ДЗ при повреждениях в зонах	

резервирования	331
7.7. Сопrotивления на входах ДЗ в режимах без коротких замыканий	336
7.7.1. Режим нагрузки	336
7.7.2. Режимы качаний и асинхронного хода	340
7.8. Характеристики срабатывания дистанционных органов и определяющие их факторы	343
7.9. Характеристики срабатывания ДО при различных видах повреждений в трехфазных сетях	349
7.9.1. Основные и неосновные повреждения	349
7.9.2. Измерение петли фаза—земля при двухфазных КЗ на землю	351
7.9.3. Анализ характеристик ДО в плоскостях неосновных повреждений	355
7.10. Характеристики срабатывания направленных ДО с поляризующими цепями	364
7.10.1. Общие соотношения	364
7.10.2. Динамические характеристики отдельных вариантов ДО с поляризующими цепями (см. рис. 2.32)	367
7.10.3. Выявление предельных нагрузочных режимов ЭС для ДО с поляризующими цепями	373
7.11. Выбор поврежденных фаз в дистанционных защитах	378
7.11.1. Область использования	378
7.11.2. Критерии выбора поврежденной фазы на основе Z-измерений	379
7.11.3. Выбор поврежденных фаз при замыканиях на землю с использованием угловых соотношений между симметричными составляющими токов $I_2$ и $I_0$ [9]	381
7.11.4. Совместное использование различных критериев фиксации поврежденных фаз	387
7.12. Обеспечение правильного функционирования дистанционных защит в условиях качаний и асинхронного хода в ЭС	388
7.12.1. Основные принципы выполнения устройств блокирования дистанционных защит при качаниях (УБК)	388
7.12.2. Элементы реализации УБК с пуском ДЗ при КЗ	389
7.12.3. Устройства блокирования при качаниях на основе контроля скорости изменения сопротивления (« $\Delta Z/\Delta t$ »)	395
7.12.4. Граничные условия выявления качаний на основе критерия « $\Delta Z/\Delta t$ »	398
7.12.5. Оценка быстродействия ДО и его влияние на параметры УБК « $\Delta Z/\Delta t$ »	402
7.12.6. Реализация цифрового УБК на основе принципа « $\Delta Z/\Delta t$ »	406
<b>Глава 8. Функциональные элементы цифровой защиты и автоматики ВЛ</b>	<b>408</b>
8.1. Структура программного обеспечения ЦРЗ	8
8.2. Защита абсолютной селективности на основе обмена сигналами	412
8.2.1. Общие соображения	412
8.2.2. Защиты на основе контроля приема отключающих сигналов	413
8.2.3. Защиты на основе обмена разрешающими сигналами	414

8.2.4. Обеспечение правильного функционирования защит с разрешающим сигналом при «слабом» питании и коммутациях в ЭС .....	415
8.2.5. Защиты на основе обмена блокирующими сигналами .....	418
8.2.6. Токовые направленные защиты абсолютной селективности .....	422
8.3. Автоматическое повторное включение .....	422
8.4. Контроль синхронизма при включении ВЛ .....	429
8.5. Устройства резервирования отказа выключателя .....	431
<b>Глава 9. Элементы цифровой защиты электрических машин .....</b>	<b>437</b>
9.1. Защита статора от сверхтоков .....	437
9.1.1. Продольная дифференциальная защита при междуфазных КЗ .....	437
9.1.2. Дифференциальная защита от КЗ на землю .....	438
9.1.3. Защита от витковых замыканий в обмотке статора .....	439
9.1.4. Токовые защиты статора .....	441
9.1.5. Дистанционная защита генераторов .....	444
9.2. Защита статора при замыканиях на землю .....	445
9.2.1. Защиты, использующие напряжения и токи нулевой последовательности .....	445
9.2.2. Защита на основе контроля третьей гармонической составляющей напряжения обмотки статора .....	447
9.2.3. Защиты на основе использования наложенного напряжения .....	449
9.3. Защита ротора от замыкания на землю .....	452
9.4. Защита генератора от аномальных режимов .....	456
9.5. Особенности защиты электродвигателей .....	462
<b>Глава 10. Вспомогательные функции цифровой релейной защиты .....</b>	<b>466</b>
10.1. Фиксация места повреждения .....	466
10.2. Контроль исправности цифровых защит .....	472
10.2.1. Элементы контроля исправности аппаратных и программных средств .....	472
10.2.2. Контроль исправности внешних цепей переменного тока и напряжения .....	477
10.3. Группы параметров и программируемая выходная логика .....	479
10.4. Управление и обработка информации .....	482
10.4.1. Структура системы обмена информацией .....	482
10.4.2. Виды и каналы передачи информации в ЦРЗ .....	482
<b>Глава 11. Эксплуатационная эффективность устройств релейной защиты .....</b>	<b>491</b>
11.1. Составляющие эксплуатационной эффективности УРЗ .....	491
11.2. Факторы, определяющие выбор защитных функций и уставок УРЗ .....	492
11.3. Оценка показателей чувствительности и селективности устройств релейной защиты .....	494
11.3.1. Параметры безусловного срабатывания и безусловного несрабатывания УРЗ .....	494
11.3.2. Единичные показатели чувствительности и селективности .....	496

11.4. Оценка чувствительности и селективности резервных защит	505
11.5. Возможности автоматического контроля уставок РЗ в ЭС	506
11.6. Особенности проверки функций цифровых УРЗ	508
11.7. Современные средства и методы проверки УРЗ1510	510
11.7.1. Ручные и компьютерно-управляемые средства проверки	510
11.7.2. Программное обеспечение ПК-управляемых средств проверки	515
11.8. Электромагнитная совместимость ЦРЗ	517
11.9. Обеспечение эксплуатационной эффективности релейной защиты	522
Приложение 1. Отображение области, ограниченной двумя лучами, дробно-линейным преобразованием	532
Приложение 2. Отображение области, ограниченной окружностью с центром в начале координат, дробно-линейным преобразованием	537
Список литературы	540

Производственно-практическое издание

**Шнеерсон Эдуард Менделевич**

**Цифровая релейная защита**

Редакторы *Л.Л. Жданова, Н.В. Ольшанская*  
Компьютерная верстка *В.В. Дёмкина*

Подписано в печать в оригинал-макета 31.01.2007.  
Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная №1. Усл.-печ. л. 34,31.  
Уч.-изд. 32,5 л. Тираж 1000 экз.

ОАО издательство «Энергоатомиздат», 107031, Москва, ул. Рождественка, 5/7.  
Отпечатано в типографии ООО «Галлея-принт».



**Шнеерсон Эдуард Менделевич,**  
доктор технических наук, профессор

Окончил Ивановский энергетический институт в 1963 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1981 г. — докторскую по теме «Динамика измерительных органов релейной защиты». Более 20 лет проработал во Всесоюзном НИИ релейного строения, где руководил разработками релейных защит энергетических объектов напряжением от 0,4 до 1150 кВ, прежде всего дистанционных защит (в том числе серий ШДЭ, ПДЭ). В 1986—1991 гг. заведовал кафедрой электрических аппаратов Чувашского государственного университета. В период 1991—2004 гг. работал на фирме Siemens, где занимался разработкой цифровых устройств релейной защиты. Автор ряда монографий, статей и изобретений в области релейной защиты энергетических систем.