

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А.Н. Козлов

# МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

*Учебное пособие*



ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А.Н. Козлов

# МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ



Учебное пособие

Благовещенск  
Издательство АмГУ  
2014

***Разработано в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера – филиала Открытого акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» – «МЭС Востока» (филиала ОАО «ФСК ЕЭС» - «МЭС Востока»)***

*Рецензент:*

*С.И. Полещук, главный специалист группы стратегического развития сети филиала Открытого акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» – «МЭС Востока» (филиала ОАО «ФСК ЕЭС» - «МЭС Востока»).*

*Козлов А.Н.*

**К59 Микропроцессорные средства управления: учебное пособие / А.Н. Козлов. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 62 с.**

Рассматриваются основные структуры цифровых устройств защиты и автоматики (ЦРЗ); алгоритмы и свойства цифровых измерительных; органов; построение основных функций ЦРЗ, особенности выполнения ЦРЗ отдельных объектов энергосистем.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

***В авторской редакции.***

## 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 электромеханической и электронной релейной защитой.

Принципы построения и алгоритмы, используемые в цифровой релейной защите (ЦРЗ), во многом отличаются от применяемых в электромеханических 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.

**Цель** дисциплины – формирование у будущих специалистов знаний по физическим основам, схемным, конструктивным решениям и управлению работой технических устройств на базе микропроцессоров в электроэнергетических системах и системах электроснабжения.

**Основная задача** дисциплины - подготовка инженеров по направлению «Электроэнергетика» к использованию в практических целях в реальном времени микропроцессорных вычислительных систем и систем автоматики.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

общепрофессиональных:

- готовности использовать информационные технологии в своей предметной области (ПК-10);

- способности рассчитывать схемы и элементы основного оборудования, вторичных цепей, устройств защиты и автоматики электроэнергетических объектов (ПК-15);

- готовности разрабатывать технологические узлы электроэнергетического оборудования (ПК-17);

- способности использовать современные информационные технологии, управлять информацией с использованием прикладных программ деловой сферы деятельности; использовать сетевые компьютерные технологии, базы данных и пакеты прикладных программ в своей предметной области (ПК-19);

- способности анализировать технологический процесс как объект управления (ПК-28);

- способности к дальнейшему обучению на втором уровне высшего профессионального образования, получению знаний в рамках одного из

конкретных профилей в области научных исследований и педагогической деятельности (ПК-33);

- готовности изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования (ПК-39);

- готовности понимать существо задач анализа и синтеза объектов в технической среде (ПК-41).

Кроме этого, формируются профессионально-специализированные компетенции:

- способность к оценке состояния и условий эксплуатации релейной защиты и автоматики энергообъекта (ПСК-7).

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **знать:** логические структуры устройств защиты и автоматики нового поколения; принципы выполнения и работы основных видов терминалов; микропроцессорные системы управления; языки программирования;

- **уметь** разбираться в функциональных и принципиальных схемах цифровых и систем;

- **иметь навыки** расчета уставок устройств защиты и автоматики, входящих в комплектацию терминалов.

Дисциплина «Микропроцессорные средства управления» предусмотрена Федеральным государственным образовательным стандартом подготовки бакалавров по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» в качестве дисциплины по выбору для профиля «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» – шифр **Б3.В.ДВ.5**. Учебным планом предусмотрено, что общие трудозатраты по дисциплине составляют 4 зачетные единицы трудоемкости (ЗЕТ). Дисциплина изучается в седьмом и восьмом семестрах, общее число часов – 144, в том числе 14 – лекции, 42 – практические занятия. Предусмотрено выполнение курсового проекта.

Настоящее учебное пособие – очередная часть комплекта учебно-методических материалов, разрабатываемого кафедрой энергетики Амурского государственного университета в рамках реализации гранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера - филиала Открытого акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» – «МЭС Востока» (филиала ОАО «ФСК ЕЭС» - «МЭС Востока»)

## ВВЕДЕНИЕ

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

В основу пособия положены материалы книг [1] – [5].

# 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ [1]

## 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) [6] «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].

Аппаратная часть устройств защиты постоянно совершенствуется. На протяжении достаточно длительного периода все устройства защиты и автоматики (РЗА) выполнялись на *электромеханической* элементной базе.

*Электромеханические устройства РЗА* характеризуются:

– большими габаритами (нужны большие релейные залы, высока стоимость строительной части);

– большим потреблением в измерительных цепях (кроме информативной составляющей нужен достаточно большой уровень сигнала для срабатывания электромеханического устройства). Из-за этого: - *требуются контрольные кабели с медными жилами большого сечения; - измерительные трансформаторы выходят из класса точности из-за перегрузок (особенно ТН при двойной системе шин);*

– большой номенклатурой изделий (каждое реле охватывает только часть диапазона возможных значений контролируемого параметра);

– большим количеством разнообразных запасных частей и резервных реле;

– зависимостью надежности функционирования от состояния механической части устройств (чистота подпятников, нормативные величины люфтов, равномерность зазоров, особенно – в контактных группах). Отсюда – трудоемкость технического обслуживания, связанная с необходимостью механических регулировок;

– сравнительно низкой точностью вследствие высокой температурной и частотной зависимости;

– низким быстродействием и его зависимостью от кратности параметров на зажимах реле;

– **нулевой информативностью о готовности к функционированию в период между проверками.** Как результат: необходимая надежность достигается дублированием аппаратуры, что в свою очередь ведет к увеличению габаритов помещения, повышению загрузки измерительных трансформаторов тока и напряжения, возрастанию объемов техобслуживания и увеличению количества персонала. Кроме того, избыточность устройств, **снижая вероятность отказа, повышала вероятность ложной работы.**

При разработке полупроводниковых устройств РЗиА ожидали, что часть проблем удастся снять:

– снизить нагрузку на измерительные трансформаторы;

– уменьшить объемы механических регулировок (герконовые контакты).

Ожидания оправдались, но появились новые проблемы:

– низкая помехозащищенность;

– плохая взаимозаменяемость элементов из-за большого разброса их параметров.

В результате широкого развития эти устройства не получили.

**Внедрение компьютерных технологий** позволило резко уменьшить:

– вес и габариты;

– потребление в цепях тока и напряжения;

– потребление в цепях оперативного тока;

– свести к минимуму периодическое техобслуживание и заметно уменьшить вероятность отказа РЗиА из-за утраты функциональности в межтестовый период за счет введения функции автоконтроля.

Но остались и проблемы:

– на первый план вышли вопросы электромагнитной совместимости и защиты от помех;

– пришлось сохранить принцип дублирования устройств, несмотря на высокую стоимость каждого.

## 1.2. Структура РЗ и используемая информация [1]

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

Потоки информации, используемые в общем случае в цифровой релейной защите (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.

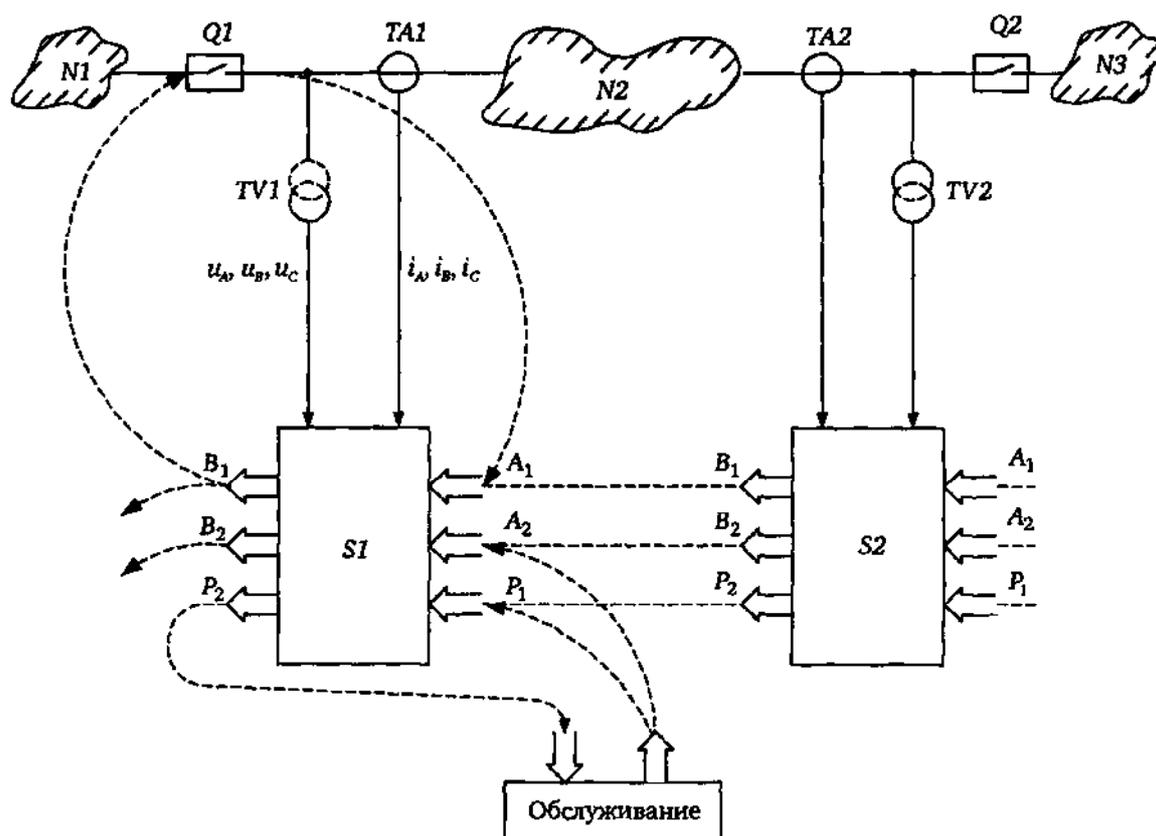


Рис. 1. Потоки информации, используемые в ЦРЗ [1].

**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.;

– А1 – входная дискретная (бинарная) информация (0/1), в том числе сигналы от коммутационных аппаратов, других устройств РЗ и от обслуживающего персонала;

– А2 – цифровая информация от других устройств РЗ, характеризующая как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы, получаемые посредством цифровых коммуникационных интерфейсов;

– Р1 – управление уставками и параметрами ЦРЗ, осуществляемое обслуживающим персоналом или системами управления через коммуникационный интерфейс [1].

**Выходная информация** ЦРЗ может быть представлена следующим образом:

– В1 – выходная дискретная информация (логические сигналы к другим защитам и на отключение выключателей);

– В2 – цифровая информация к другим устройствам (характеризующая в общем случае как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы), получаемая посредством цифровых коммуникационных интерфейсов;

– Р2 – 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;

фиксация текущего состояния защиты, параметров и уставок, в том числе готовности защиты к действию;

запись и передача сообщений (протоколов) в аварийных режимах.

Структурная схема ЦРЗ приведена на рис. 2. В ней можно выделить следующие функциональные блоки.

*Аналоговые входы* переменного тока и напряжения служат для ввода сигналов от измерительных трансформаторов тока ( $TA1, \dots$ ) и напряжения ( $TVI, \dots$ ). Сигналы поступают на входы промежуточных преобразователей (трансформаторов), обеспечивающих гальваническое разделение цепей и первичную обработку измеряемых величин.

Выходы промежуточных преобразователей с помощью *аналогового мультиплексора* поочередно соединяются с *аналого-цифровым преобразователем*, переводящим полученные аналоговые сигналы в цифровую форму. После того, как опрос аналоговых входов будет закончен

(мультиплексор завершит первый цикл), в ОЗУ будет накоплен первый блок цифровой информации и начнется этап анализа этой информации и принятия решения. После завершения этого этапа начинается второй цикл опроса аналоговых входов. Такой подход к обработке аналоговой информации получил название «квантование» или «дискретизация» аналогового сигнала. Ниже этот подход будет рассмотрен подробнее.

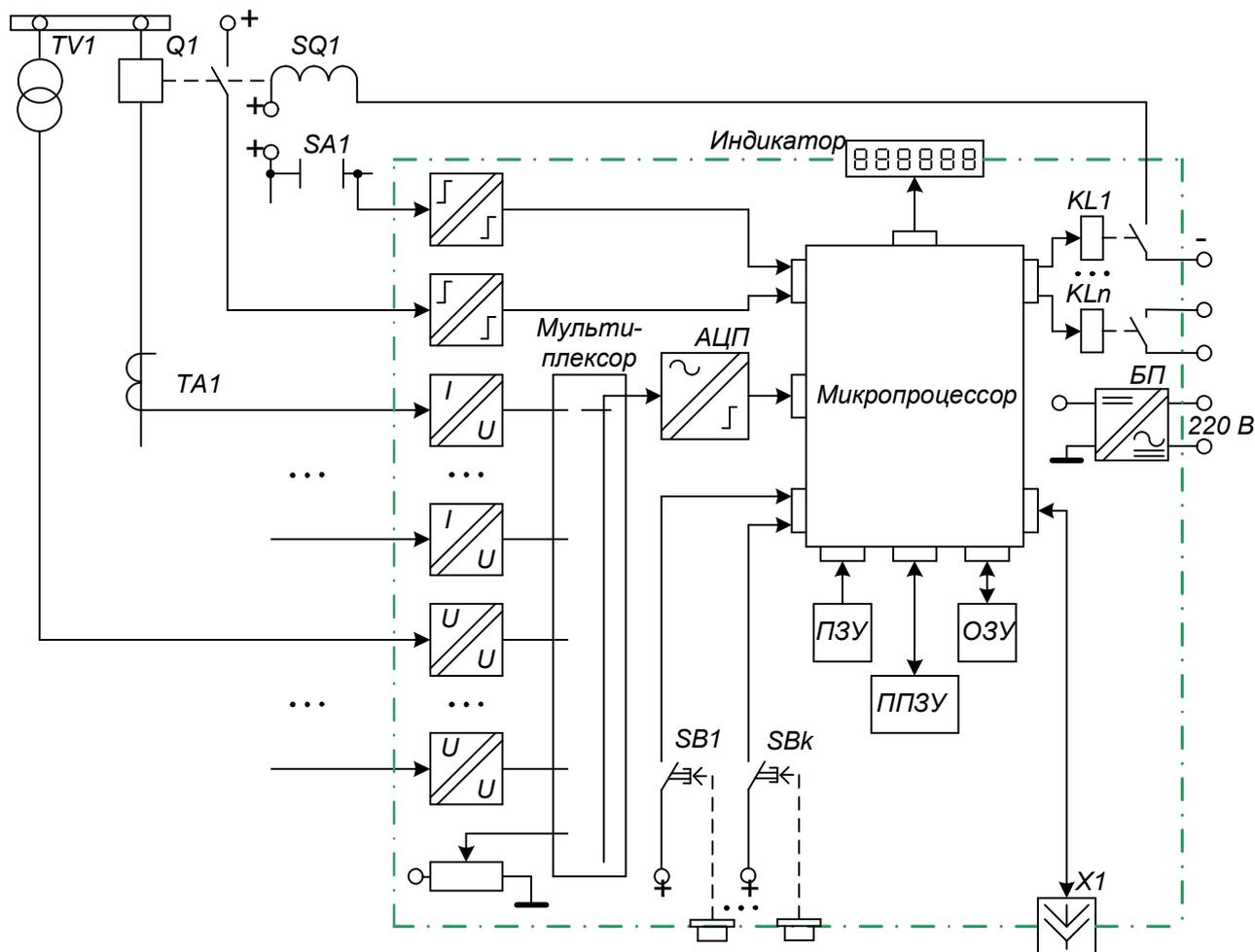


Рис. 2. Структурная схема цифрового устройства релейной защиты [2]

Дискретные входы 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 [1].

*Дискретные выходы* – выходные реле 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 [1].

### **1.3. Цифровая дискретизация аналоговых сигналов**

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 цифровых измерительных органов (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 устройств релейной защиты (УРЗ) объекта или группы УРЗ. Быстродействие современных МП и возможности их структуры в части решения в процессе реального времени различных легко перепрограммируемых задач позволяет 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. 3.

Аналоговые сигналы от  $TA$  и  $TV$  преобразуются промежуточными трансформаторами напряжения и тока  $ПТН$ ,  $ПТТ$ , фильтрами низких частот и подводятся к коммутирующему блоку  $K$ , обеспечивающему поочередно выборку мгновенных значений величин с выходов отдельных фильтров и их

запоминание на время, необходимое для правильной работы АЦП. В результате входные 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 АЦП и цифровой сигнал на выходе АЦП, вводимый в вычислительное устройство ВУ, осуществляющее цифровую обработку сигналов.

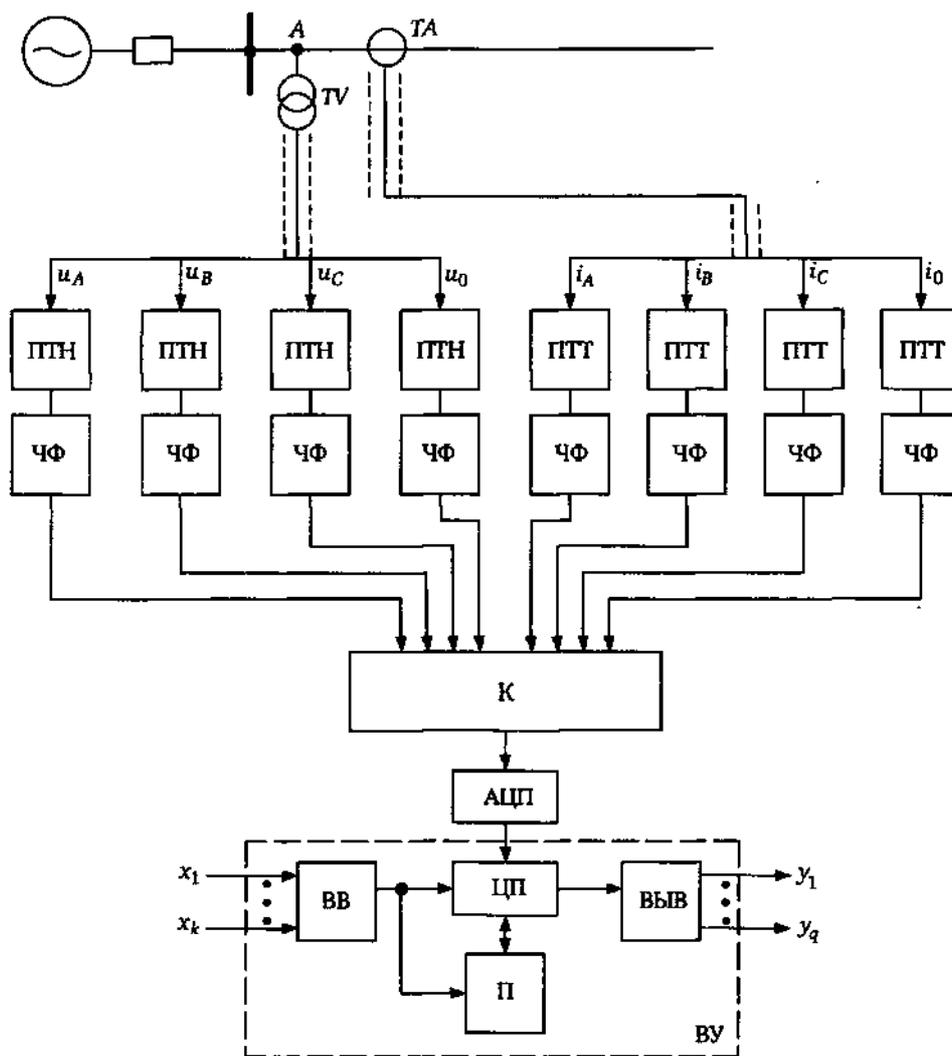


Рис. 3. Структурная схема ЦРЗ [1]:

$TA$  – 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.

На основе текущей цифровой информации о входных сигналах напряжения и тока и входных логических сигналах  $x_1 - x_k$  вычислительное устройство ВУ вырабатывает необходимые решения, характеризуемые

выходными сигналами  $y_1 - y_q$ . Процесс цифровой обработки сигналов показан на рис. 4.

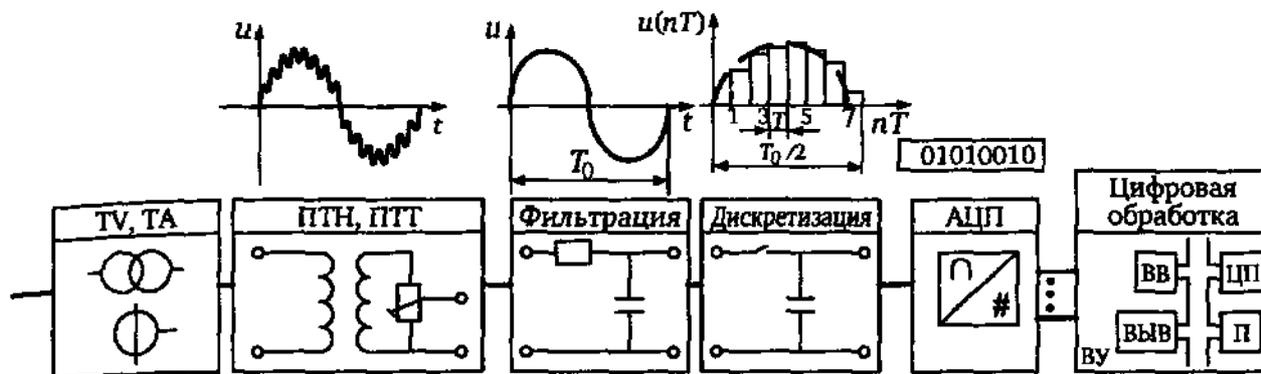


Рис. 4. Цифровая обработка сигналов в ЦРЗ [1]

Цифровая дискретизация сигналов с определенным периодом дискретизации  $T$  (рис. 4) 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. 5,а) и значительно меньше искажена при меньшем периоде дискретизации  $T = T_2$  (рис. 5,б).

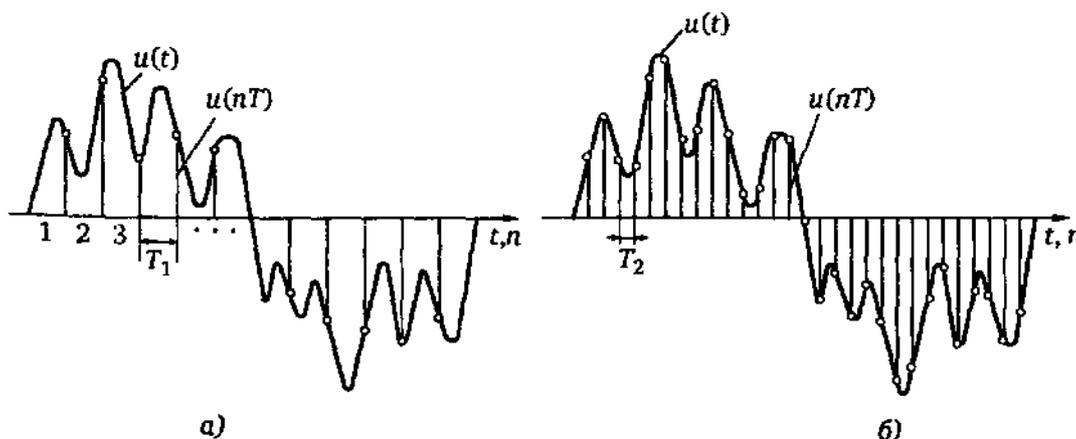


Рис. 5. Дискретизация аналогового сигнала [1].

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, т.е.  $T < 0,5f_c$ . Здесь  $f_c = \omega_c/2\pi$  – верхняя граница существенного диапазона частот обрабатываемого аналогового сигнала.

#### 1.4. Особенности функционирования ТТ в динамических режимах и режимах насыщения [1]

С учетом нелинейности характеристики намагничивания сердечника ТТ, неискаженная передача первичного тока может осуществляться лишь в случае, если индукции в сердечнике ТТ не превышает индукции насыщения  $B_s$  (рис. 6).

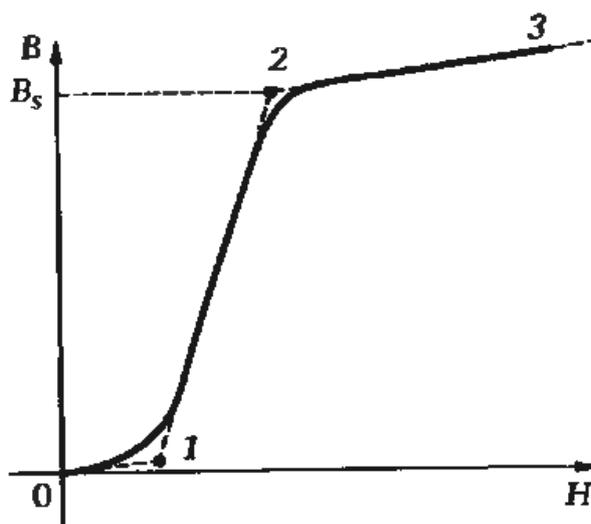


Рис. 6. Характеристика намагничивания сердечника трансформатора [1].

Если принять для упрощения ветвь намагничивания чисто индуктивной, а сопротивления вторичной ветви ( $R_2$ ,  $R_H$ ) активными, то справедливо соотношение

$$u_2 = w_2 S \frac{dB}{dt} = i_2 (R_2 + R_H), \quad (1)$$

где  $S$  – сечение сердечника;  $u_2$  — напряжение в ветви намагничивания.

Индукция  $B$  в сердечнике ТТ определяется из выражения (1):

$$B = \frac{R_2 + R_H}{w_2 S} \int i_2 dt, \quad (2)$$

т.е. индукция растет пропорционально площади, охватываемой кривой тока  $i_2$ .

При синусоидальных токах, соответствующих установившимся режимам ЭС, границы токов  $I'_{\max}$ , характеризующиеся предельными кратностями токов,

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. 7 показан симметричный установившийся режим глубокого насыщения ТТ при активной нагрузке.

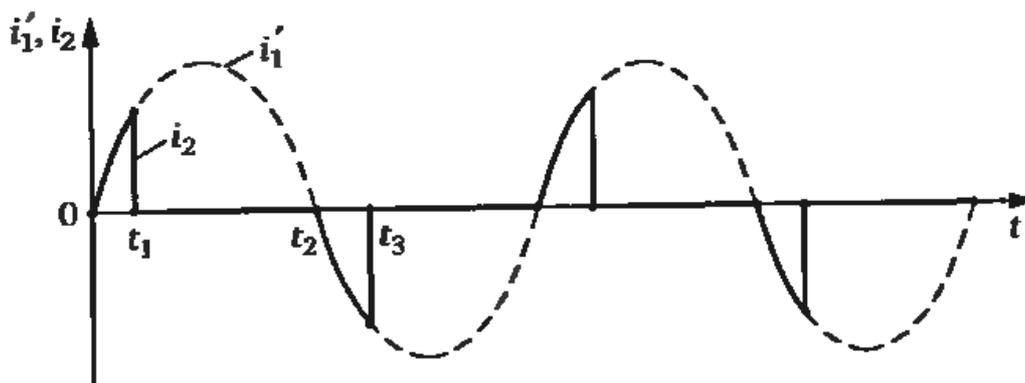


Рис. 7. Симметричный режим насыщенного ТТ в режиме выше предельной кратности тока [1]

В момент  $t_1$  индукция  $B$  достигает значения индукции насыщения  $B_s$ , и в идеальном случае индукция  $B$  дальше не изменяется, что с учетом (1) соответствует  $u_2 = 0$ , т.е. ток  $i_2$  в нагрузке отсутствует. Изменение индукции начинает происходить 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 обладает сравнительно большой индуктивностью и имеет достаточно малое сопротивление для медленно изменяющихся

апериодических составляющих. 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. 8 [1].

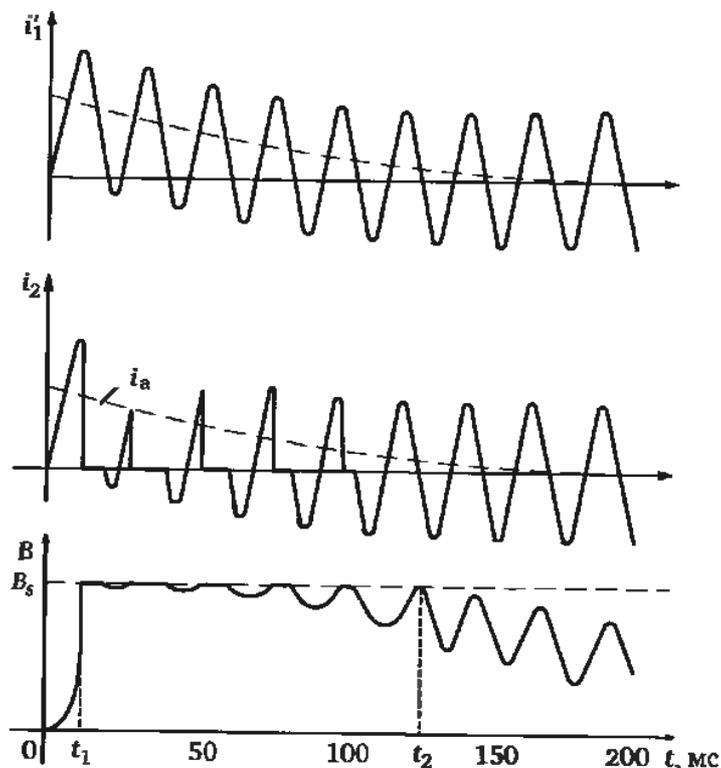


Рис.8. Несимметричный режим насыщенного ТТ при наличии апериодической составляющей  $i_a$  в первичном токе [1]

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  $i_2$ .

### 1.5. Емкостные трансформаторы напряжения [1]

Для сетей высоких напряжений во многих случаях используются емкостные трансформаторы напряжения (ЕТН) на основе емкостных делителей напряжения (рис. 9,а). Эти трансформаторы содержат емкостный делитель напряжения  $C1; C2$ , дроссель  $D$ , компенсирующий емкостные сопротивления делителя, понижающий трансформатор  $T$ .

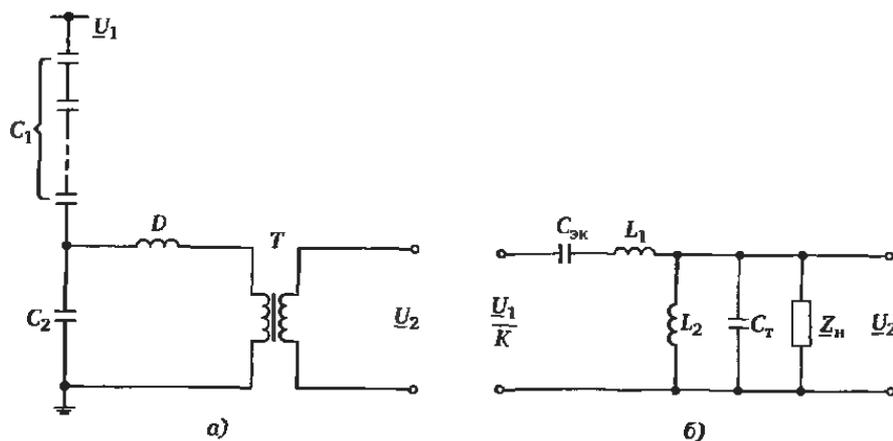


Рис.9. Емкостный трансформатор напряжения (а) и его схема замещения (б) [1].

Упрощенная схема замещения ЕТН, где  $C_T$  – межвитковая емкость трансформатора  $T$  (рис. 9,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 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. 10). Они на некоторое время существенно искажают измеряемый сигнал и должны учитываться при проектировании быстродействующих УРЗ.

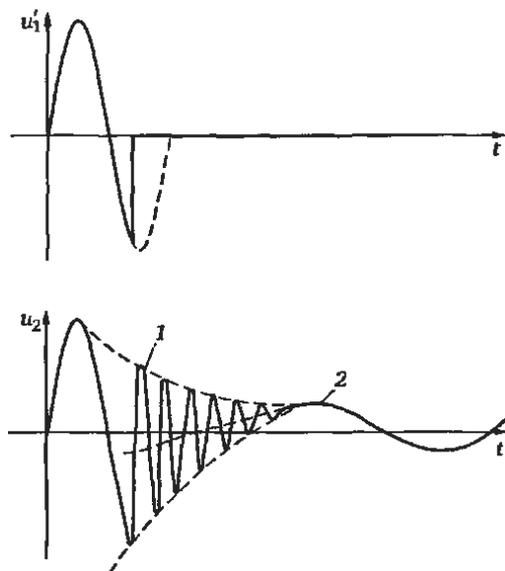


Рис.10. Первичное  $u_1'$  и вторичное  $u_2$  напряжения ЕТН при сбросе напряжения до нуля:  
 1,2—затухающие высокочастотная и низкочастотная составляющие собственных колебаний в ЕТН

## 2. ТОКОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЗАЩИТЫ [1]

### 2.1. Построение ступени МТЗ с независимой выдержкой времени [1]

На рис. 11 приведена упрощенная схема ступени максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени  $T$  (при включении элемента выдержки времени 5) или же с зависимой от тока выдержкой времени (при включении элемента зависимой от тока выдержки времени 6).

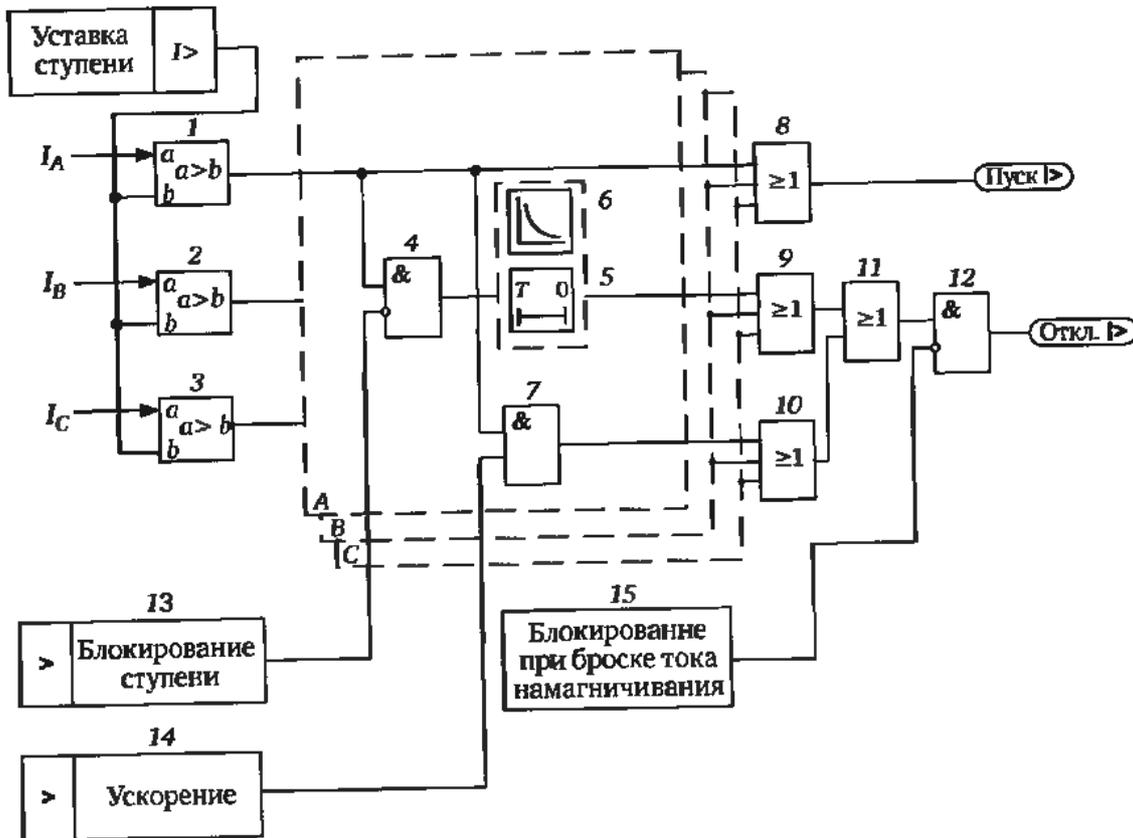


Рис.11. Упрощенная схема максимальной токовой защиты с независимой (элемент 5) или с зависимой (элемент 6) выдержкой времени [1].

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 запускается 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.

## 2.2. Блокирование МТЗ при броске намагничивающего тока силового трансформатора [1]

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. 12,а для случая включения трансформатора  $T$  и рис. 12,б, когда при КЗ  $K$  на отходящем присоединении напряжение падает, а потом при отключении выключателя  $Q2$  снова восстанавливается до номинального.

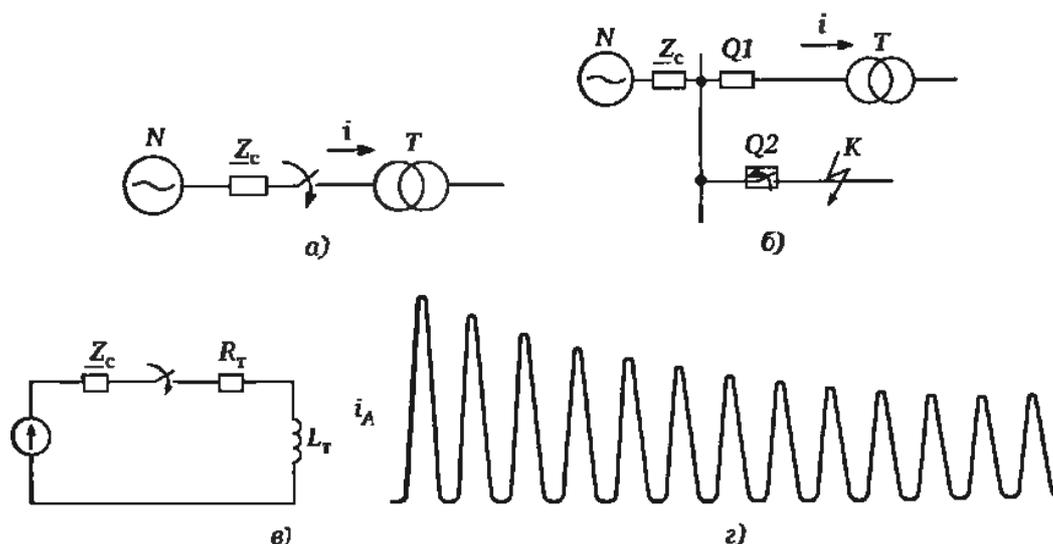


Рис.12. Насыщение силового трансформатора при коммутациях [1].

Процесс включения трансформатора поясняет упрощенная схема замещения рис. 12,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. 6) происходит его насыщение и искажение формы кривой тока (рис. 12,г). В форме кривой тока преобладают четные гармоники, в основном вторая. Токи, протекающие в первые моменты после включения, ограничиваются в основном эквивалентным сопротивлением системы  $Z_c$  (рис. 12,в) и могут достигать многократных значений по отношению к номинальному току  $I_{НОМ}$  трансформатора (до  $10I_{НОМ}$ ). Подобная картина возникает и при отключении КЗ на отходящем присоединении (рис. 12,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. 12,г). 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  $k_{БЛ} = I_{2f}/I$ , где  $I_{2f}$  – амплитуда составляющей тока второй гармоники;  $I$  – амплитуда составляющей тока основной частоты. Данный принцип реализации пояснен на рис. 13 при контроле токов фазы А [1].

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  $k_{БЛ}$  задается

блоком 3. Компаратор 4 обеспечивает выявления режима включения трансформатора по условию  $I_{2f}/I \geq k_{БЛ}$ .

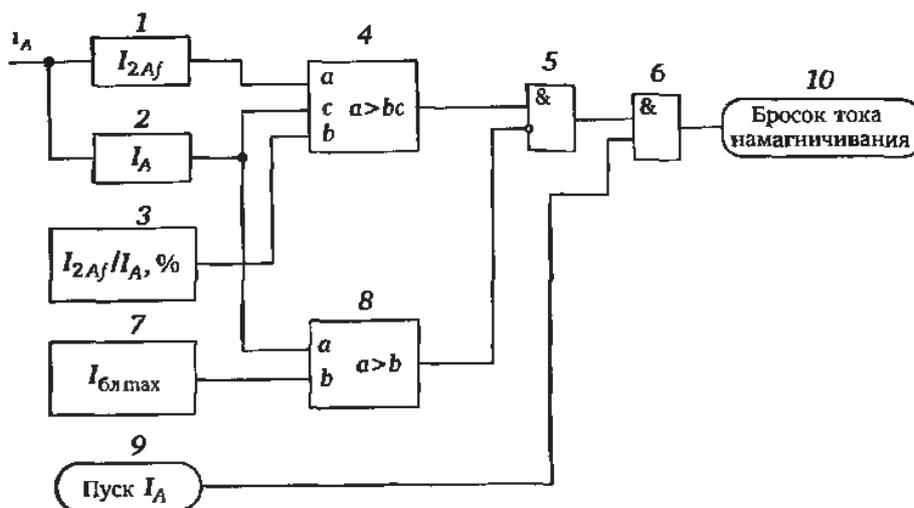


Рис.13. Выявление броска тока намагничивания [1]

Для повышения надежности функционирования при токах  $I_A$ , больших, чем максимально возможный бросок тока намагничивания, используется параметр  $I_{БЛ.мах}$  (блок 7) и компаратор 8. Это обеспечивает сигнал «Бросок тока намагничивания» и последующее блокирование только в диапазоне токов  $I_A < I_{БЛ.мах}$ . 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. 11, блок 12).

### 2.3. Использование пусковых и блокирующих сигналов в МТЗ [1]

Имеющиеся в цифровых МТЗ сигналы пуска отдельных ступеней и входы для их блокирования (см. рис. 11), позволяют в определенных случаях исключить такой существенный недостаток МТЗ как необходимость для обеспечения селективности увеличения выдержек резервных ступеней защит и расширяют возможности других эффективных решений. В качестве примера, ниже рассматривается два распространенных случая [1].

**Обеспечение защиты сборных шин в радиальных сетях.** На рис. 14 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. 14 показан принцип обеспечения защиты шин  $A$ , основанный на том, что в

данной радиальной сети при КЗ в начале любой линии, например  $K1$ ; ток КЗ измеряется как защитой  $S1$  питающего конца, так и защитой  $S2$  поврежденной линии.

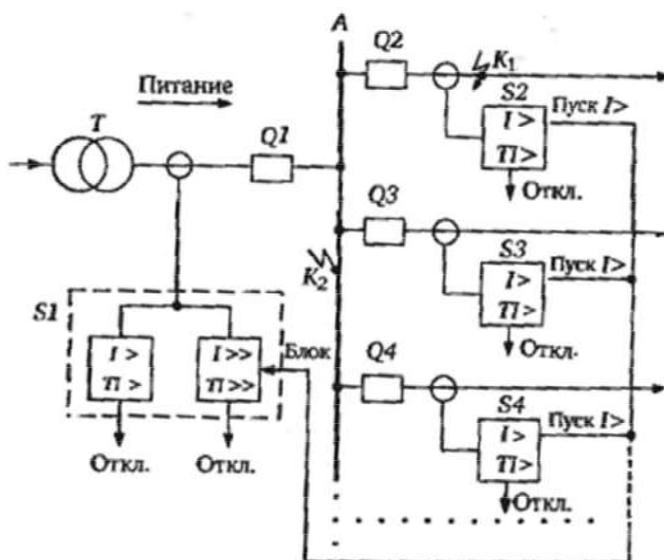


Рис. 14. Использование блокирующих сигналов МТЗ для защиты сборных шин [1].

Пусковые выходы МТЗ (см. рис. 11, сообщение «Пуск  $I >$ ») всех отходящих линий объединены и подаются на блокирующий вход быстродействующей ступени  $I >>$  защиты  $S1$  питающей линии (рис. 11, блок 13). В результате, при КЗ  $K1$  в начале отходящей линии появляется сигнал «Пуск  $I >$ », блокирующий отключение питающей линии быстродействующей ступенью, а отключение производится защитой  $S2$  отходящей линии.

При КЗ  $K2$  на шинах  $A$  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. 15, где МТЗ  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$  с зависимой выдержкой времени имеют одинаковые уставки по току  $I_p$  и времени отключения.

При КЗ  $K1$  пусковые сигналы без выдержки времени защит  $S3$  и  $S2$  блокируют соответственно тракты отключения защит  $S2$ ,  $S1$  и КЗ отключается

защитой  $S3$ . При КЗ  $K2$  защита  $S3$  не запускается ввиду отсутствия тока, а пуск от защиты  $S2$  блокирует защиту  $S1$ . Отключение КЗ обеспечивается защитой  $S2$ .

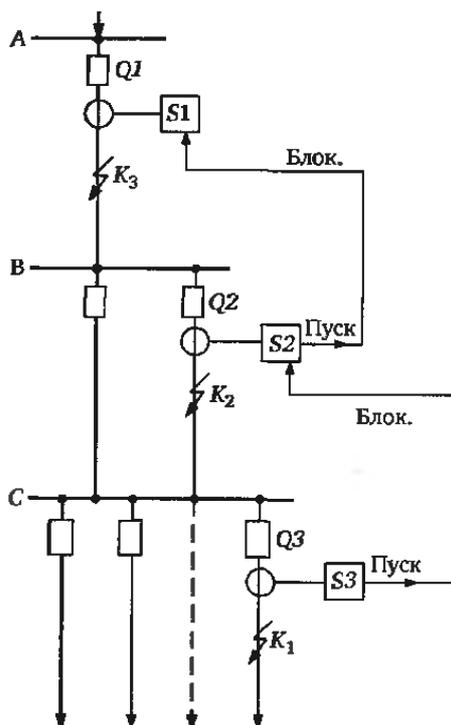


Рис. 15. Использование блокирующих сигналов МТЗ в защите радиальных линий [1].

При КЗ  $K3$  запускается и действует на отключение только защита  $S1$ . Таким образом, все защиты имеют одинаковые временные характеристики, и не требуется разнесения их выдержек времени для обеспечения селективности. Команда блокировки 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.

## 2.4. Токовая защита обратной последовательности [1]

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. 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 [1].

Так же как и МТЗ, токовая защита обратной последовательности может выполняться со ступенчатой или с зависимой от тока выдержкой времени. На рис. 16,а приведен вариант реализации защиты на основе трех ступеней, две из которых имеют независимые от тока  $I_2$  выдержки времени  $TI_2 >$  и  $TI_2 >>$  (блоки 9 и 10).

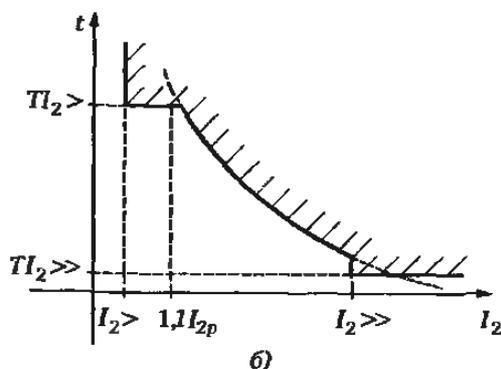
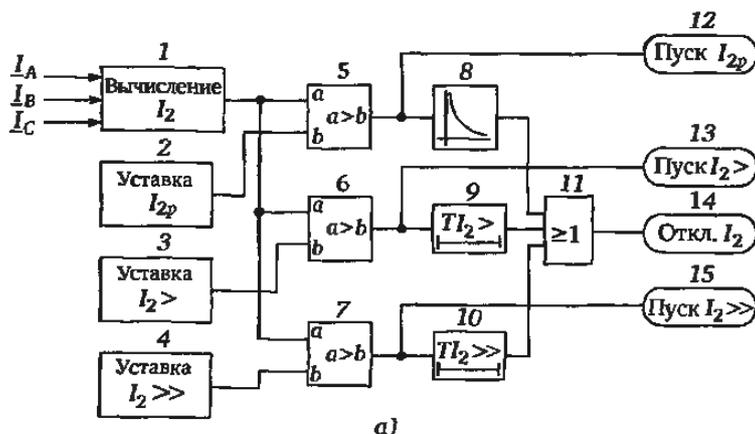


Рис. 16. Токовая защита обратной последовательности: а – структура; б – комбинированная характеристика [1].

Характеристики ступени с зависимой от тока  $I_2$  выдержкой времени обеспечивает блок 8. Текущие вычисляемые цифровые 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. 16,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

$$t = \frac{K}{(I_2/I_{НОМ})^2}, \quad (3)$$

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. 16,б, причем значение  $I_2 >$  должно соответствовать длительно допустимому току  $I_{2.ДОП.}$  несимметрии, при превышении которого запускается зависимая характеристика (3). При этом время возврата должно учитывать охлаждение машины и в простейшем случае определяется соотношением:

$$t_B = \frac{K}{(I_{2.ДОП.}/I_{НОМ})^2}, \quad (4)$$

где  $I_{2.ДОП.}$  – длительно допустимый ток обратной последовательности. Таким образом, возврат в исходное состояние происходит при условии  $I_2 < I_{2.ДОП.}$  через время  $t_B$ .

### 3. ЦИФРОВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ [1]

#### 3.1. Дифференциальные защиты на основе непосредственного сравнения токов [1]

Под дифференциальными защитами с непосредственным сравнением токов понимаются защиты объектов (например, коротких линий, трансформаторов, генераторов, двигателей, реакторов), выполняемые на основе дифференциальной схемы соединения выходов трансформаторов токов на отдельных концах объекта.

На рис. 17 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  $K1$ , охваченной измерительными трансформаторами тока  $TA1, TA2$ .

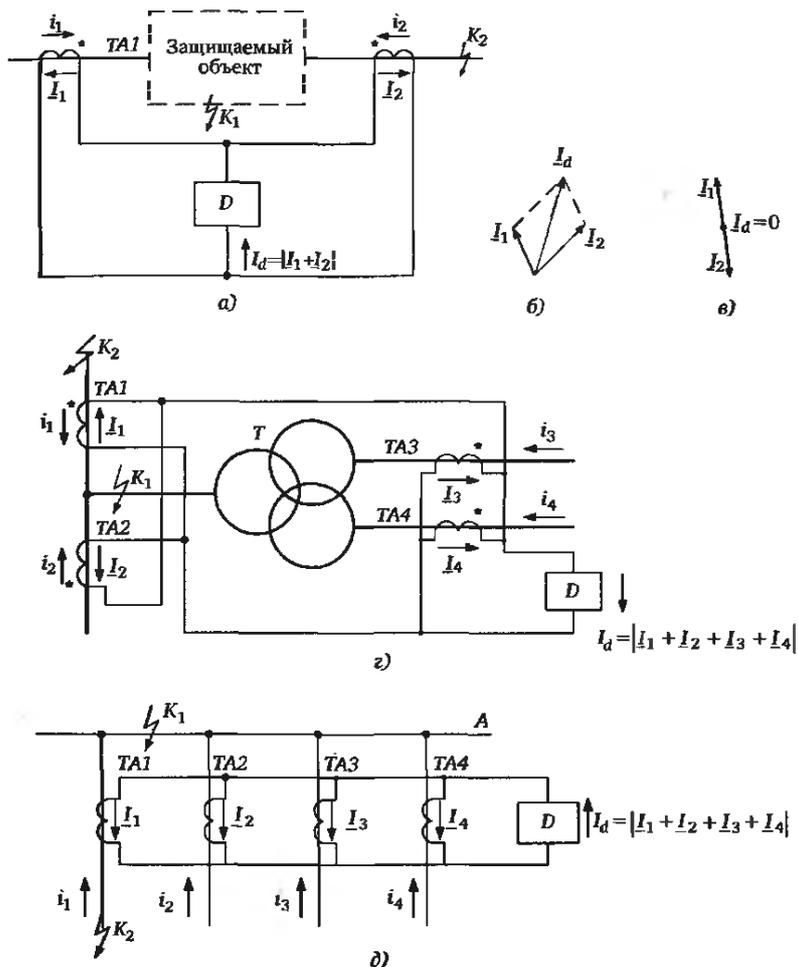


Рис. 17. Принцип действия дифференциальной защиты отдельных объектов: а – защита объекта с двумя группами трансформаторов тока; б, в – диаграммы токов при внутреннем КЗ  $K1$  и внешнем  $K2$ ; г – защита трехобмоточного трансформатора; д – защита сборных шин [1].

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  $K1$ , 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  $K2$ , охватываемой дифференциальной защитой (внешнее КЗ), геометрическая сумма токов (рис. 17, 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. 17, 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. Можно выделить два основных фактора, связанных со свойствами силовых трансформаторов и измерительных трансформаторов 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. разд. 1.4).

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. разд. 1.4). Этот ток (см. рис. 12, г) затухает медленно, 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. 12,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.

### 3.2. Дифференциальные защиты с использованием торможения сравнимыми токами [1]

Из сравниваемых токов по концам объекта  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_n$  - рис. 18, формируется дифференциальный ток  $\dot{I}_d = \sum \dot{I}_i$  с абсолютным значением  $I_d = \left| \sum \dot{I}_i \right|$  и тормозной ток  $I_S$ , равный сумме абсолютных значений сравниваемых токов  $I_S = \sum |\dot{I}_i|$ . В блоке сравнения БС производится сравнение дифференциального и тормозного токов.

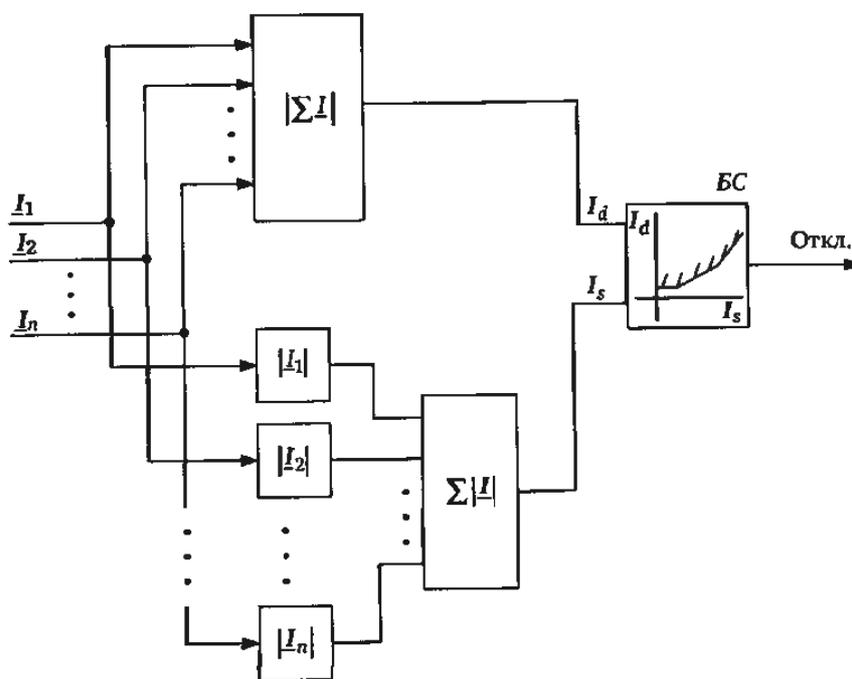


Рис. 18. Структура алгоритма торможения сравнимыми токами [1].

В простейшем случае условие срабатывания (появление отключающего сигнала на выходе БО при коэффициенте торможения  $k < 1$  описывается соотношениями

$$I_d \geq kI_S, \quad I_d \geq I_{d,\text{уст.}}, \quad (5)$$

а для многоконцевого объекта

$$|\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n| \geq k(|\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + \dots + |\dot{I}_n|), \quad I_d \geq I_{d,\text{уст.}}, \quad (6)$$

где  $I_{d,\text{уст.}}$  – начальный порог срабатывания дифференциальной защиты.

Свойства защиты удобно анализировать, используя плоскость  $I_d, I_S$ . Условию (5) соответствует характеристика срабатывания  $I$  на рис. 19 (область срабатывания заштрихована).

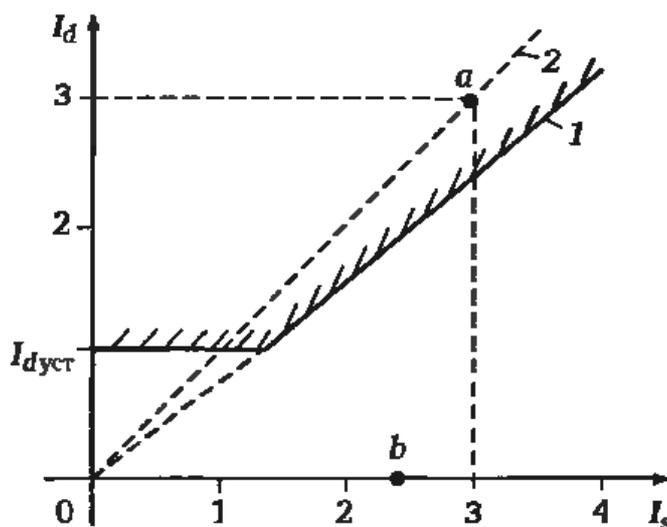


Рис. 19. Тормозная характеристика срабатывания дифференциальной защиты [1].

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  $I$ ). В качестве примера рассмотрим соотношение между  $I_d$  и  $I_S$  для двухконцевого объекта с токами внутреннего КЗ  $I_{K1} = 1$ ;  $I_{K2} = 2$  (относительные значения), совпадающими по фазе, и токами внешнего КЗ  $I'_{K1} = -I'_{K2} = 1, 2$ , противоположными по фазе. В этом случае при КЗ в зоне

$$I_d = I_{K1} + I_{K2} = 3;$$

$$I_S = I_{K1} + I_{K2} = 3.$$

При внешнем КЗ

$$I_d = I'_{K1} - I'_{K2} = 0;$$

$$I_S = I'_{K1} + I'_{K2} = 1, 2 + 1, 2 = 2, 4.$$

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. 19). При совпадении фаз токов при внутреннем КЗ рабочая точка всегда лежит на данной прямой, так как в этом случае справедливо соотношение

$$I_d = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n| = I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_S.$$

При внешнем КЗ в идеальном случае  $I_d = 0$ , и рабочая точка  $b$  с координатами  $(2, 4; 0)$  лежит в области несрабатывания на оси абсцисс. Таким образом, характеристика срабатывания дифференциальной защиты с торможением (см. рис. 19) по алгоритму (5) для обеспечения надежного срабатывания всегда должна располагаться ниже прямой с наклоном  $45^\circ$  ( $k < 1$ ).

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. 19). 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 показатели чувствительности дифференциальной защиты можно улучшить путем изменения наклона тормозной характеристики в зависимости от диапазона нахождения тормозного тока (рис. 20).

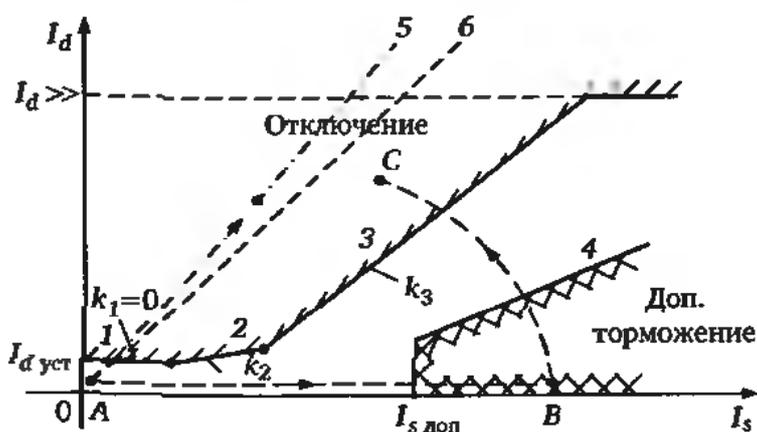


Рис. 20. Комбинированная тормозная характеристика дифференциальной защиты с областью дополнительного торможения [1].

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 уставка  $I_{d.уст.}$  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. 20) 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. 20 [1]). 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 достаточно мал, и рабочая точка перемещается от точки  $A$  в нагрузочном режиме к точке  $B$ , находящейся вблизи оси абсцисс (см. рис. 20). 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).

**Блокирование при включении трансформаторов.** Включение силового трансформатора может сопровождаться большим током намагничивания, вызывающим насыщение трансформатора, и соответственно искажение формы тока подключаемой стороны (см. рис. 12). 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 защиты 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. 20), действующая при больших токах независимо от значений постоянной составляющей и высших гармонических в дифференциальном токе.

### 3.3. Основные функциональные блоки дифференциальной защиты [1]

Основные функциональные блоки варианта цифровой дифференциальной защиты показаны на рис. 21 для одной фазы [1]. В блоке 1 цифровой обработки сигналов (токов по концам защищаемого объекта) происходит формирование цифровых значений дифференциального тока  $I_d$  и тормозного тока  $I_S$

$$I_d = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n|; \quad I_S = |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + \dots + |\dot{I}_n|.$$

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.

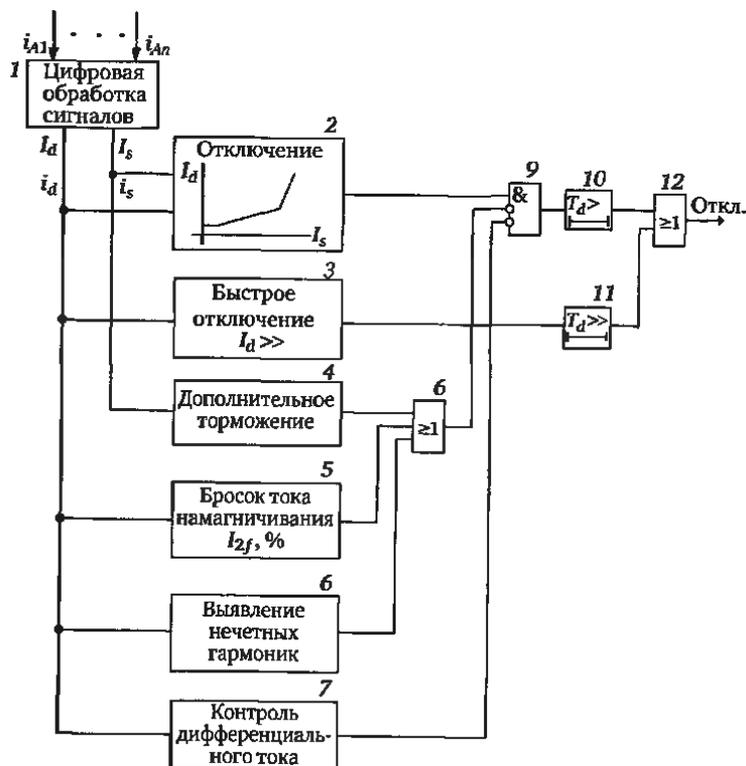


Рис. 21. Основные функциональные элементы дифференциальной защиты [1].

Блок 2 формирует основную характеристику отключения  $I_d = f(I_s)$  (рис. 19 и 20), 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. 20) 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. 21).

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. 20). 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 заблокировать 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  $I_{d.n}$  меньше начального порога срабатывания  $I_{d.уст.}$ . Контролируемое при этом возрастание тока небаланса  $I_{d.n}$  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.

### 3.4. Особенности выполнения цифровых дифференциальных защит трансформаторов [1]

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 У/Д-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 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. 22 [1].

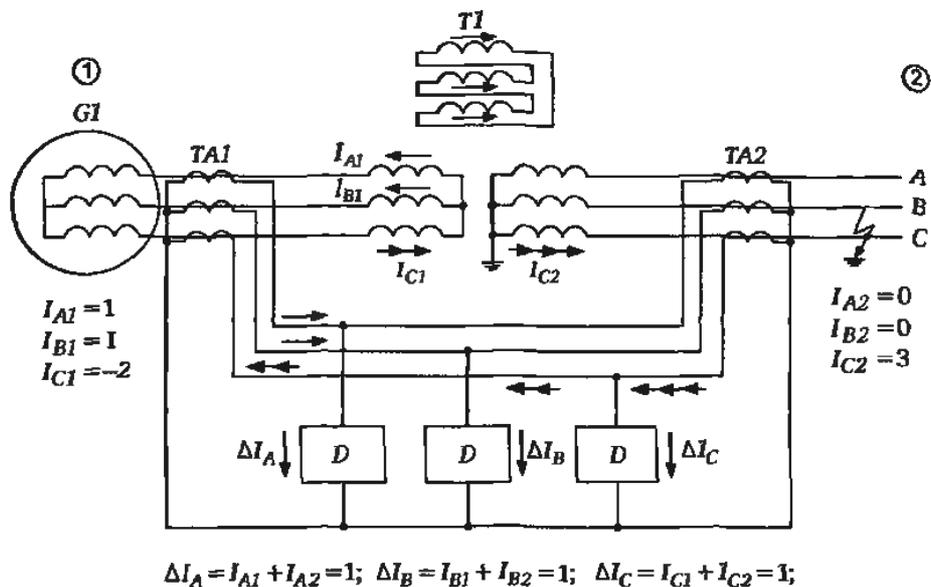


Рис. 22. Токораспределение в дифференциальной цепи без компенсации токов нулевой последовательности при внешнем однофазном КЗ [1].

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 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  $I$  трансформатора ввиду отсутствия заземления нейтрали. Указанные токи замыкаются в обмотке трансформатора, соединенной в треугольник. Токи в плечах дифференциальной защиты на стороне  $I$   $I_{A1} = 1$ ,  $I_{B1} = 1$ ,  $I_{C1} = -2$  образуют систему, не содержащую нулевой последовательности. Как видно из рис. 22, в результате несоответствия фазных токов на первичной и вторичной стороне трансформатора при внешних однофазных КЗ в каждом фазном измерительном элементе  $D$  возникает дифференциальный ток  $\Delta I = 1$ , т.е. необходимый баланс токов при внешних КЗ нарушается.

Устранение влияния указанных факторов в цифровых дифференциальных защитах путем использования программных средств поясняет рис. 23 [1]. Перед сравнением измеряемые вторичные токи по обеим сторонам умножаются на

соответствующие корректирующие действительные коэффициенты  $k_{ном.}$ , генерируемые блоками корректировки номинальных токов «Корр.  $I_{ном.}$ ».

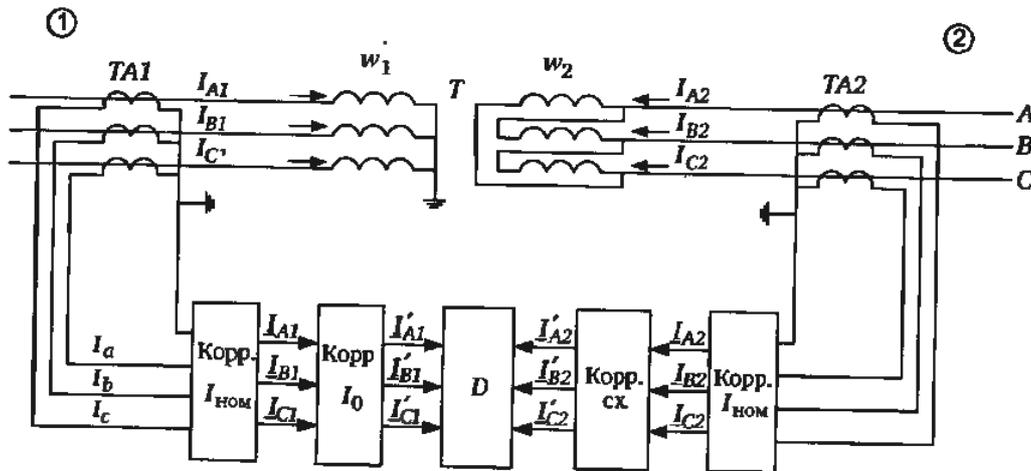


Рис. 23. Цифровая корректировка измеряемых фазных токов в дифференциальной защите [1].

При этом для каждой из сторон трансформатора коэффициенты  $k_{ном.1}$  и  $k_{ном.2}$  соответственно равны:

$$k_{ном.1} = \frac{I_{ном.ТА1}}{I_{ном.Тw1}}; \quad k_{ном.2} = \frac{I_{ном.ТА2}}{I_{ном.Тw2}}.$$

где  $I_{ном.ТА1}$ ,  $I_{ном.ТА2}$  – номинальные первичные токи измерительных трансформаторов тока на отдельных сторонах силового трансформатора;

$I_{ном.Тw1}$ ,  $I_{ном.Тw2}$  – номинальные первичные токи по отдельным сторонам силового трансформатора

$$I_{ном.Тw1} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.1}}; \quad I_{ном.Тw2} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.2}}.$$

В результате с использованием вводимых в защиту параметров  $I_{ном.ТА1}$ ,  $I_{ном.ТА2}$ ,  $S_{ном.}$ ,  $U_{ном.1}$ ,  $U_{ном.2}$  устраняется составляющая небаланса, вызываемая неодинаковостью номинальных токов силового и измерительных трансформаторов.

Блок «Корр.  $I_0$ » обеспечивает устранение описанного выше (рис. 22) 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

$$\dot{i}_0 = \frac{1}{3}(\dot{i}_{A1} + \dot{i}_{B1} + \dot{i}_{C1})$$

и вычитает их из фазных токов  $\dot{I}_{A1}$ ,  $\dot{I}_{B1}$ ,  $\dot{I}_{C1}$ , т.е.

$$\dot{I}'_{A1} = \dot{I}_{A1} - \dot{I}_0; \quad \dot{I}'_{B1} = \dot{I}_{B1} - \dot{I}_0; \quad \dot{I}'_{C1} = \dot{I}_{C1} - \dot{I}_0.$$

После указанного преобразования небаланс токов, обусловленный протеканием токов нулевой последовательности, устраняется. В частности, для случая однофазного КЗ (см. рис. 22) имеем  $\dot{I}_0 = \dot{I}_{C2} / 3 = 1$  и скорректированные значения токов на стороне с заземленной нейтралью равны:

$$\dot{I}'_{A1} = 0 - 1 = -1; \quad \dot{I}'_{B1} = 0 - 1 = -1; \quad \dot{I}'_{C1} = 3 - 1 = 2.$$

Таким образом после корректировки имеем:

$$\dot{I}_{A1} = -\dot{I}'_{A1}; \quad \dot{I}_{B1} = -\dot{I}'_{B1}; \quad \dot{I}_{C1} = -\dot{I}'_{C1}.$$

и дифференциальные токи небаланса в фазах

$$\Delta I_A = \Delta I_B = \Delta I_C = 0.$$

Блок «Корр. сх.» на рис. 23 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, и все необходимые преобразования токов осуществляются программным путем без вмешательства пользователя.

## 4. ДИСТАНЦИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЗАЩИТЫ [1]

### 4.1. Дистанционный принцип в защите линий электропередачи [1]

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  $\dot{Z} = \dot{U} / \dot{I}$  во многих случаях пропорционально расстоянию (дистанции) между местом установки защиты и местом КЗ.

На рис. 24,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.

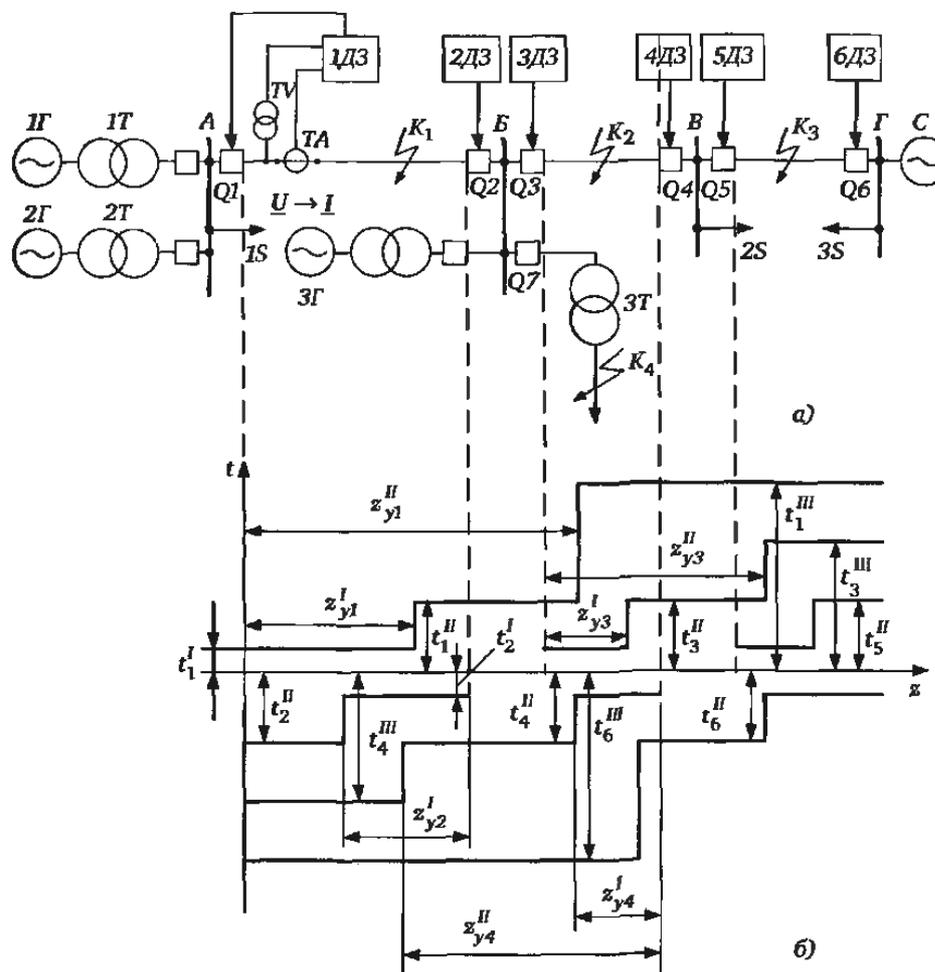


Рис. 24. Согласование уставок и характеристик выдержки времени ДЗ [1].

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. 24,а) необходимо, чтобы при КЗ на участке АБ были отключены только

выключатели  $Q1, Q2$ , что устраняет питание места повреждения (точки  $K1$ ), 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. 24. На каждый выключатель воздействует дистанционная защита, реагирующая на соотношения между напряжениями  $\dot{U}$  и токами  $\dot{I}$  в той точке ЭС, где она установлена. Эти сигналы подводятся к ДЗ от измерительных трансформаторов напряжения  $ТН$  и измерительных трансформаторов тока  $ТА$  (на рис. 24,а показаны только для  $1ДЗ$ ). Свойства ДЗ описываются различными характеристиками, одной из которых является характеристика выдержки времени  $t = f(\dot{Z})$ , определяющая зависимость времени срабатывания ДЗ от сопротивления  $\dot{Z} = \dot{U} / \dot{I}$ , измеряемого защитой. Так как  $\dot{Z} = ze^{j\varphi}$  – комплексный параметр, то полностью зависимость  $t = f(\dot{Z})$  не может быть отображена в плоскости. Для отображения этой зависимости в плоскости используют характеристики  $t = f(z)$ , где  $z = |\dot{Z}|$  при  $\varphi = \arg \dot{Z} = const$ .

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 – рис. 25.

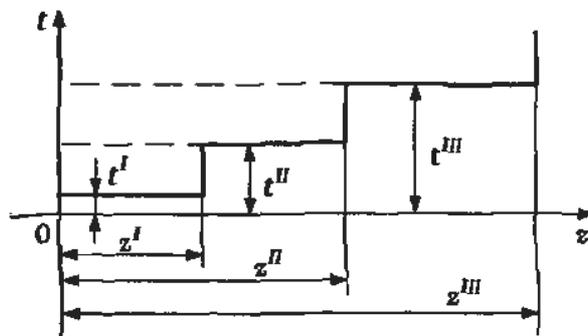


Рис. 25. Характеристика выдержки времени ДЗ [1].

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.

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.

## 4.2. Сопротивления на входах ДЗ в режимах без коротких замыканий [1]

Эквивалентная схема ЭС в симметричном режиме представлена на рис. 26, где  $\dot{E}_1$ ,  $\dot{E}_2$  и  $\dot{Z}_1$ ,  $\dot{Z}_2$  – эквивалентные ЭДС и сопротивления системы с двусторонним питанием, приведенные к точке 1, включая и участки ЭС с протяженными ВЛ

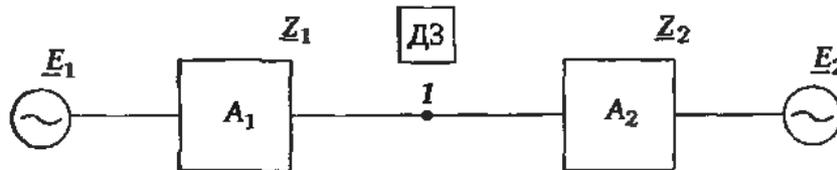


Рис. 26. К анализу ДЗ в нагрузочных режимах ЭС[1].

В симметричном нагрузочном режиме ток  $\dot{I}_H$ , напряжение  $\dot{U}_H$  и входное сопротивление  $\dot{Z}_H$  на входе ДЗ определяются соотношениями:

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}; \quad \dot{U}_H = \frac{\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}, \quad (7)$$

$$\dot{Z}_H = \frac{\dot{U}_H}{\dot{I}_H} = \frac{\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2} = \frac{\dot{Z}_2 + \dot{q} \dot{Z}_1}{1 - \dot{q}}; \quad \dot{q} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \quad (8)$$

Найдем области, в которых располагается сопротивление  $\dot{Z}_H$  на входе ДЗ в нагрузочном режиме с учетом ограничений, определяемых тем, что соотношение ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  по модулю не выходит за пределы

$$q_1 \leq |\dot{q}| \leq q_2; \quad (9)$$

где  $q_1 < 1$ ;  $q_2 > 1$ . Другое ограничение определяется тем, что из условия устойчивости ЭС угол  $\varphi = \arg \dot{q}$  не выходит за пределы

$$\alpha_1 \leq \arg \dot{q} \leq \alpha_2; \quad (10)$$

где  $\alpha_1 > -90^\circ$ ,  $\alpha_2 < 90^\circ$ .

Преобразуем (8) к виду

$$\dot{q} = \frac{\dot{Z}_H - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_H + \dot{Z}_1}; \quad (11)$$

Условие  $q_1 \leq |\dot{q}|$  с учетом (11) примет вид

$$\frac{1}{q_1} \cdot \left| \frac{\dot{Z}_H - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_H + \dot{Z}_1} \right| \geq 1; \quad (12)$$

Выражение (12), если оставить в нем только знак равенства, определяет при  $q_1 \neq 1$  в плоскости  $\dot{Z}$  окружность, параметры которой равны

$$\dot{Z}_0 = \frac{k^2 \dot{a} - \dot{b}}{k^2 - 1} = \frac{\dot{Z}_2 + q_1^2 \dot{Z}_1}{1 - q_1^2}; \quad R_0 = \frac{k |\dot{a} - \dot{b}|}{|k^2 - 1|} = \frac{|\dot{Z}_2 + \dot{Z}_1| q_1}{|1 - q_1^2|} \quad (13)$$

Неравенство (12) определяет область нагрузочного режима в плоскости  $\dot{Z}_H$ , граничной линией которой является окружность. Для того чтобы определить, находится ли данная область внутри или вне окружности, подставим значение  $\dot{Z}_H = \infty$ , находящееся всегда вне окружности, в неравенство (12). В данном случае  $\dot{Z}_H = \infty$  удовлетворяет условию (12), так как это соответствует  $1/q_1 > 1$ , что и имеет место при  $q_1 < 1$ . Таким образом, условие (12) определяет область в плоскости  $\dot{Z}_H$ , находящуюся вне окружности с параметрами  $\dot{Z}_0$ ,  $R_0$ , по выражению (13). При  $q_1 = 1$  следует, что область нагрузочного режима есть полуплоскость, разделяемая прямой, относительно которой точки  $\dot{a} = \dot{Z}_2$  и  $\dot{b} = -\dot{Z}_1$  являются симметричными. При этом область находится в той же полуплоскости, что и точка  $-\dot{Z}_1$ , так как при подстановке в (12)  $\dot{Z}_H = -\dot{Z}_1$  имеем  $\infty > 1$ , т. е. условие (12) выполняется.

На рис. 27 для ЭС с параметрами  $\dot{Z}_1 = 20e^{j80^\circ}$  Ом;  $\dot{Z}_2 = 30e^{j60^\circ}$  Ом эта область построена для  $q_1 \geq 0,8$  – заштрихованная область вне дуги окружности  $l$  с параметрами, определяемыми из (13):

$$\dot{Z}_0 = \frac{30e^{j60^\circ} + 0,8^2 20e^{j80^\circ}}{1 - 0,8^2} \approx 117,1e^{j66^\circ} \text{ Ом};$$

$$R_0 = \frac{0,8 |30e^{j60^\circ} + 20e^{j80^\circ}|}{1 - 0,8^2} = 109 \text{ Ом.}$$

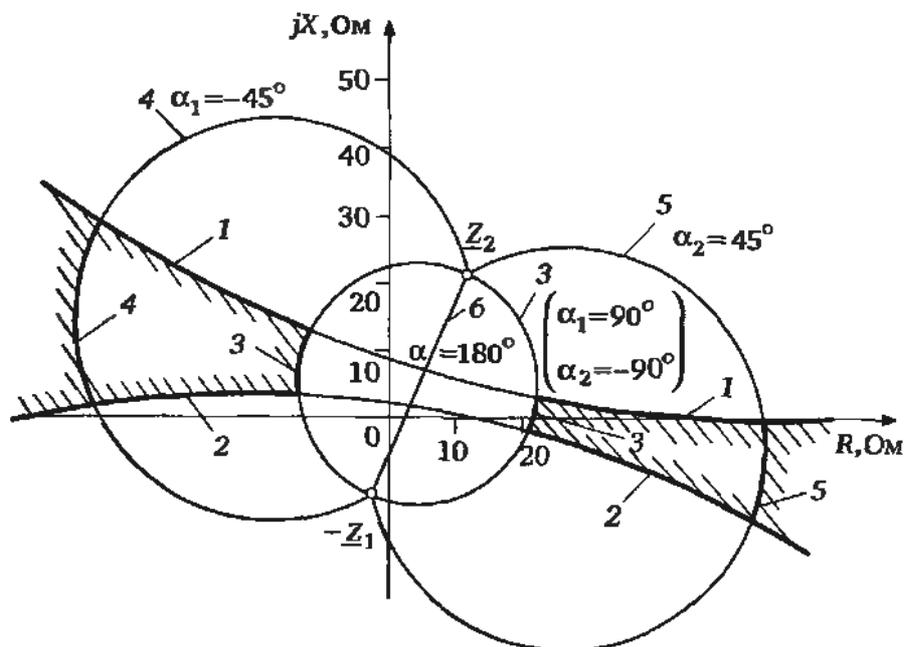


Рис. 27. Области расположения входного сопротивления ДЗ в нагрузочных режимах [1].

Результирующие области нагрузочных режимов определяются как общие для условий (9) и (10). На рис. 27 заштрихованная область между линиями 1 и 2 соответствует условию (9) 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  $\dot{Z}_H$  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.

#### 4.3. Характеристики срабатывания дистанционных органов и определяющие их факторы [1]

Областью срабатывания ДО называется область в плоскости одного из входных сопротивлений  $\dot{Z}$ , соответствующая срабатыванию ДО при нахождении в ней контролируемого параметра  $\dot{Z}_p = \dot{U}_p / \dot{I}_p$ .

Характеристикой срабатывания (ХС) ДО называется граничная линия в плоскости  $\dot{Z}$ , 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. 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. 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.

***Различие токов в месте установки ДЗ и в месте КЗ для ДО резервных ступеней.*** Указанные области обусловлены наличием подпитки места повреждения токами от различных источников и расхождением эквивалентных ЭДС по фазе. С учетом этого необходимо соответствующее расширение ХС для обеспечения охвата области входного сопротивления при КЗ в зоне резервирования.

***Изменение областей срабатывания в зависимости от вида повреждения.*** Входное сопротивление не всегда 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  $\dot{U}_P = \dot{U}_A$ ,  $\dot{I}_P = \dot{I}_A - \dot{I}_B$  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.

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 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 большая 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  $\dot{U}_p$ ,  $\dot{I}_p$ , 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 [1].** При любых скачкообразных возмущениях (КЗ, коммутациях) в ЭС возникают переходные процессы, которые на определенное время искажают входные сигналы  $\dot{U}_p$ ,  $\dot{I}_p$ . Это приводит к неправильным

действиям ДО (замедлениям при КЗ в зонах действия или излишним срабатываниям) и нарушениям 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.

С учетом рассмотренных факторов определяются требования к характеристикам срабатывания отдельных ступеней ДЗ. Основные требования к ХС первой ступени рассмотрим на примере ДО с четырехугольной ХС (рис. 26,а).

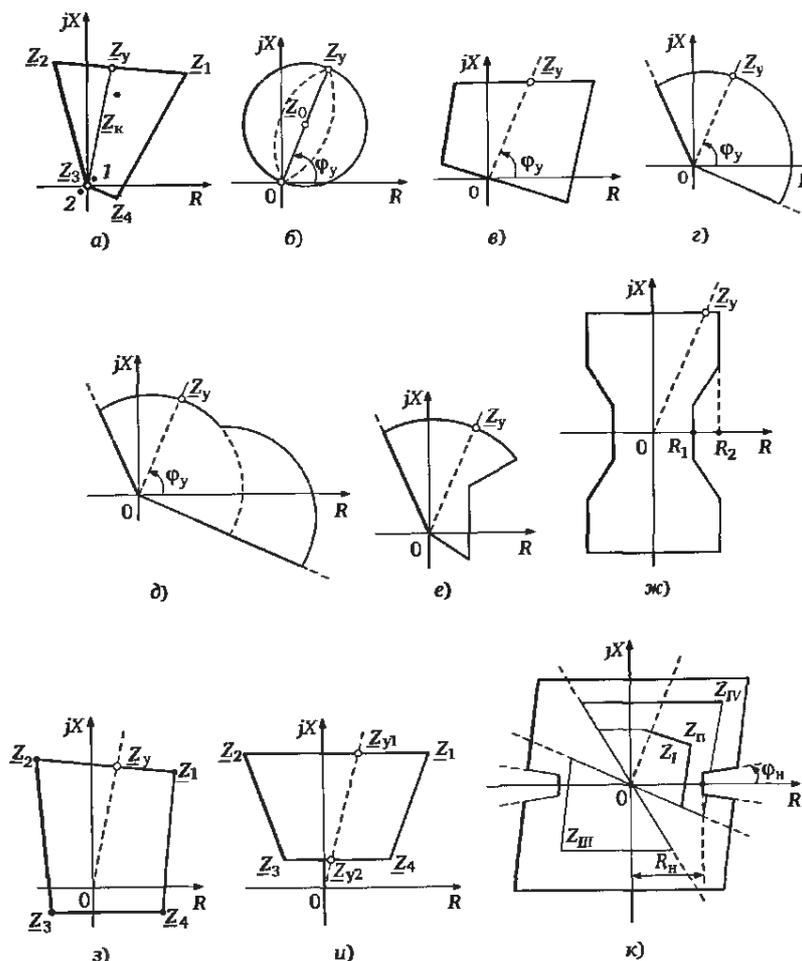


Рис. 28. Виды характеристик срабатывания ДО [1].

Ограничение сверху определяется уставкой ДО  $\dot{Z}_y$ , а также вершинами  $\dot{Z}_1$ ,  $\dot{Z}_2$ , выбираемыми на расстоянии от  $\dot{Z}_y$  с целью охвата дуговых повреждений и обеспечения надежности и быстроты срабатывания с учетом различных влияющих факторов. Небольшой наклон верхней стороны обеспечивает повышение селективности при внешних дуговых повреждениях.

Ограничение справа выбирается на определенном расстоянии от характеристики короткозамкнутой линии с целью охвата дуговых повреждений. Сопротивление дуги  $R_D$  нелинейно и с приближением места КЗ к источнику питания значение  $R_D$  падает. Поэтому правая сторона ХС  $\dot{Z}_1 \dot{Z}_4$ , (рис. 26,*a*) 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  $\dot{Z}_K$  удалена от стороны  $\dot{Z}_2 \dot{Z}_3$ , 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  $\dot{Z}_3 \dot{Z}_4$  характеристики в IV квадранте плоскости  $\dot{Z}$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить надежное срабатывание при близких повреждениях через переходное сопротивление, когда входное сопротивление располагается вблизи активной оси.

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. 26,*a*) и надежно не срабатывать при повреждениях «за спиной» (точка 2). Точки 1 и 2 располагаются близко к точке  $\dot{Z} = 0$  и характеризуются снижением практически до нуля напряжения  $\dot{U}_P$ . Токи при КЗ в точках 1 и 2 протекают в противоположных направлениях. Для четкой фиксации КЗ в этих точках необходимо принятие специальных мер – введение поляризирующих цепей от других фаз, контуров памяти.

Четырехугольная характеристика (рис. 26,*a*) 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. 26,*б–е*). При этом возможны как повышение чувствительности к переходным сопротивлением при КЗ, например, для защит кабельных линий (рис. 26,*г,д*), так и в необходимых случаях дополнительные меры по отстройке от нагрузки защит протяженных ВЛ (рис. 26,*е*).

В отличие от ХС первой ступени, характеристика второй ступени должна перекрывать 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. 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  $\dot{Z}$  (рис. 26,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, что обуславливает необходимость охвата значительных областей плоскости  $\dot{Z}$  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, исключаящее (рис. 26,и) или сужающее (рис. 26,е) с целью отстройки от нагрузки области в нижней части ХС, но расширяющее области в конце зоны действия.

Смещение ХС вверх (рис. 26, и) обеспечивает отстройку от нагрузочных режимов при сохранении чувствительности к удаленным повреждениям.

На рис. 26,к иллюстрируются возможности использования направленных в прямом направлении ( $\dot{Z}_I$ ,  $\dot{Z}_{II}$ ), в обратном направлении ( $\dot{Z}_{III}$ ) и ненаправленных ( $\dot{Z}_{IV}$ ) ступеней дистанционной защиты [1]. При этом величины  $\varphi_H$  и  $R_H$  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.

#### **4.4. Обеспечение правильного функционирования дистанционных защит в условиях качаний и асинхронного хода в ЭС [1]**

Режимы качаний и асинхронного хода в ЭС характеризуются возможностью нахождения входного сопротивления ДЗ в областях комплексной плоскости сопротивлений, расположенных внутри характеристик срабатывания ДО. Без принятия специальных мер это 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 устройства блокировки при качаниях (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).

#### 4.4.1. Элементы реализации УБК с пуском ДЗ при КЗ [1]

Структура, поясняющая взаимодействие УБК группы I с различными ступенями ДЗ приведена на рис. 27,а.

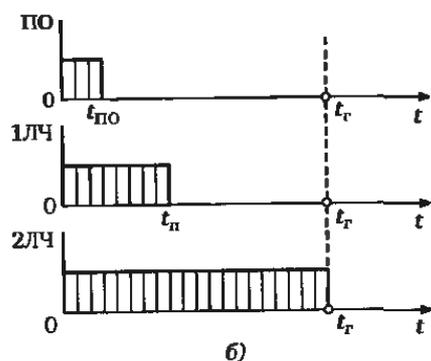
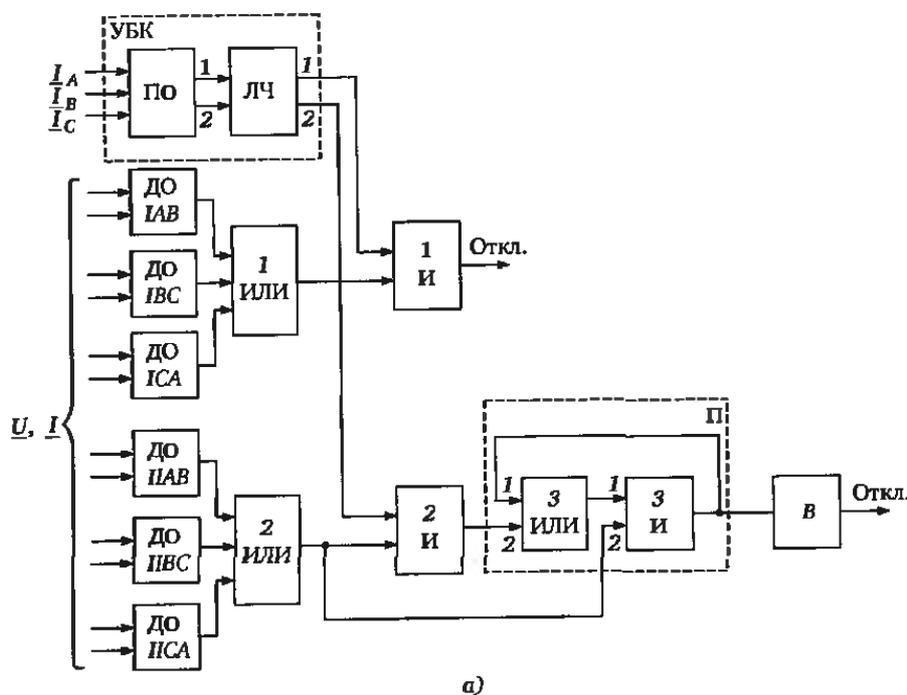


Рис. 29. Взаимодействие УБК с отдельными ступенями ДЗ при наличии пускового органа [1].

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. 27,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  $I$   $УБК$  возникал импульс пуска быстродействующих ступеней заданной длительности  $t_{II}$ , достаточный для срабатывания  $ДО$  и отключения повреждения. В необходимых случаях учитывается возможность действия быстродействующей ступени каскадно (после отключения повреждения с противоположной стороны ВЛ), и соответственно увеличивается значение  $t_{II}$ .

После истечения времени  $t_{II}$  разрешающий сигнал на выходе  $ЛЧ$  исчезает и действие ступени  $I$  блокируется схемой  $II$  даже при повторном запуске  $ПО$  в течение времени приведения в состояние готовности  $t_{Г}$ , после чего схема  $УБК$  возвращается в исходное состояние и обеспечивается готовность  $ДЗ$  к отключению через время  $t_{Г}$ . Возможны варианты выполнения  $УБК$ , когда время  $t_{Г}$  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  $t_{II}$  с последующим их выводом на заданное время  $t_{Г}$  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  $t_{II}$  невелики, и входное сопротивление не успеет войти в зону действия  $ДО$  за время  $t_{II}$ , после чего быстродействующая ступень блокируется схемой  $II$ . Формируемый  $УБК$  сигнал  $t_{II}$  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. 27,а, действующих с выдержкой времени, так как блокирование через время  $t_{II}$  препятствует действию на отключение элемента времени ступени  $B$ , если время  $t_{II}$  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  $t_{Г}$ , достаточное для действия ступени ДЗ с наибольшей выдержкой времени.

В необходимых случаях время  $t_{Г}$  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 следствием 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. 27,а) блока памяти П (выполнен на элементах 3ИЛИ, 3И). Наличие блока П обеспечивает подхват разрешающего импульса с выхода 2 ЛЧ и после истечения времени  $t_{Г}$ , если к указанному времени ДО медленно действующих ступеней остались в сработавшем 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 3И. Указанное эффективно, в частности, при повторно следующих запусках УБК в течение времени, меньшего  $t_{Г}$ , когда к началу повторного повреждения в зоне элемент выдержки времени в УБК, обеспечивающий время  $t_{Г}$ , 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 дистанционной 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.

## **5. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЙ [3, 10]**

### **5.1. Микропроцессорная автоматика повторного включения [10]**

Автоматика трехфазного повторного включения реализуется терминалами автоматики управления выключателем (АУВ) в виде шкафа типа ШЭ2710 511, защит и АУВ типа «БРЕСЛЕР ШЛ 2606», дифференциально-фазной защиты «БРЕСЛЕР ШЛ2604.11» и направленной высокочастотной защиты типа БМРЗ-НВЧ, которые выполняют:

- несинхронное АПВ с включением выключателя отключаемой линии электропередачи с одной стороны с контролем отсутствия напряжения (ТАПВ-ОН), а с другой – с контролем наличия симметричного напряжения (ТАПВ-НСН);

- ускоренное повторное включение (УТАПВ) с временем действия от 0,05 с, осуществляемое при фиксировании первого срабатывания быстродействующей автоматики защитного отключения линии электропередачи: дифференциально-фазной и фильтровой направленной мощности обратной последовательности высокочастотных защит, дистанционной и токовой направленной нулевой последовательности с высокочастотными сигналами ускорения их действия;

- АПВ с контролем наличия симметричных и синхронных напряжений с обеих сторон отключенного выключателя и с синхронизацией (ТАПВС).

Микропроцессорный комплекс ТАПВ обладает не только традиционными (пуск по цепи несоответствия, недействие при включении выключателя ключом управления на КЗ и др.), но и специфическими свойствами. Микропроцессорная автоматика (ТАПВ-М) осуществляет оценку тяжести КЗ, отключаемого релейной защитой: при близких КЗ автоматически изменяется очередность повторного включения выключателей линий электропередачи. Первым включается более удаленный выключатель. Таким образом, облегчается работа и существенно снижается износ выключателей. Ускорение действия защит повторно включаемого выключателя при УТАПВ и ТАПВ-ОН снижает тяжесть возмущающего воздействия на электроэнергетическую систему при устойчивых КЗ.

Автоматический ввод в самостоятельное действие избирателей поврежденных фаз ОАПВ снижает время отключения КЗ на землю. При неуспешном повторном включении выключателя ТАПВ-М выдает соответствующую информацию в противоаварийную автоматику

предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и его действие запрещается сигналами АПНУ. Осуществляется самодиагностика и выдается информация о неисправностях.

Действие НАПВ обеспечивается программной логической схемой на рис 30.

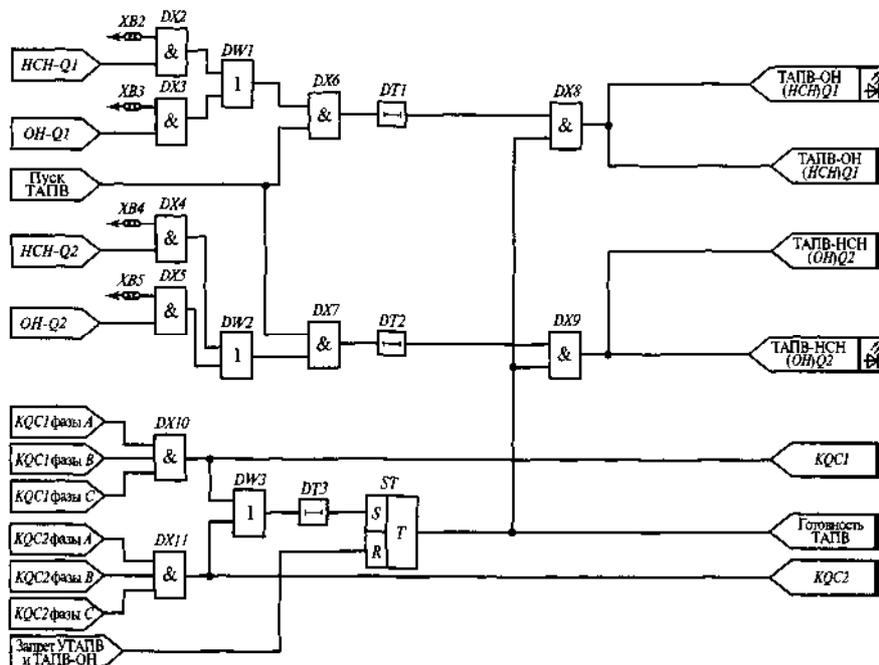


Рис. 30. Логическая схема реализации несинхронного ТАПВ [10].

В зависимости от того, ближе к первому  $Q1$  или второму  $Q2$  выключателям произошло КЗ, определяется последовательность их повторного включения: переключаются программные накладки  $XB2$ – $XB5$ . Если, например, КЗ произошло ближе к  $Q2$ , то программные накладки  $XB3$  (в ТАПВ  $Q1$ ) и  $XB4$  (в ТАПВ  $Q2$ ) автоматически размыкаются: логические единицы на входах  $DX9$  и  $DX10$ , а накладки  $XB2$  и  $XB5$  остаются замкнутыми: логические нули на входах  $DX3$  и  $DX4$ . Программными элементами  $DX9$ ,  $DX6$ ,  $DX14$  (И),  $DW1$  (ИЛИ) при наличии единичных сигналов «Пуск ТАПВ» и «Готовность ТАПВ» формируются сигнал ТАПВ-ОН  $Q1$  и воздействие ТАПВ-ОН на его включение. Второй выключатель  $Q2$  включается воздействием ТАПВ-НСН, формируемым операциями  $DX4$ ,  $DX7$ ,  $DX9$ ,  $DW2$ , и выдается сигнал ТАПВ-НСН  $Q2$ .

## 5.2. Функционирование и развитие микропроцессорной автоматики предотвращения нарушения устойчивости [10]

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости начала развиваться со времени сооружения первых протяженных и сильно нагруженных линий электропередачи сверхвысокого напряжения, связывавших мощные волжские ГЭС с ОЭС Центра, когда возникала необходимость

обеспечения динамической и статической устойчивости противоаварийным автоматическим управлением.

Отдельные релейно-контактные устройства АПНУ, обеспечивающие устойчивость параллельной работы электрических станций, были слабо связаны между собой, и их действие, по существу, не координировалось. С появлением мини-ЭВМ М6000, СМ-1 и СМ-2 были созданы централизованные системы АПНУ электроэнергетических систем с управляющим вычислительным комплексом (УВК) на диспетчерских пунктах (ДП) с координацией функционирования устройств АПНУ станционного уровня. Централизованные системы АПНУ с очень широким арсеналом технических средств обеспечения и относительно медленно действующими мини-ЭВМ по мере объединения ЭЭС и создания ЕЭС страны исчерпали свои технические возможности по обеспечению устойчивости электроэнергетических систем.

Разработка микропроцессорного управляющего вычислительного комплекса автоматики предотвращения нарушения устойчивости (УВК АПНУ) ведется в Сибирском ЗАО «Институт автоматизации электроэнергетических систем» (ИАЭС). В 2003 г. введены в эксплуатацию УВК АПНУ в Таймырэнерго и в ОЭС Сибири: УВК установлен на подстанции «Итатская 1150» и контролирует западную и центральную части ОЭС от подстанции «Барнаульская» до Красноярской ГЭС.

Управляющий вычислительный комплекс выполнен на зарубежной микропроцессорной технике фирм Octagon Systems и других. Его общая структура для необходимой надежности функционирования состоит из двух взаиморезервируемых комплектов следующих основных аналого-дискретно-цифровых и микропроцессорных модулей:

- ввода/вывода аналоговых сигналов информации о текущем (доаварийном) режиме (действующих значениях напряжений на шинах электростанций к подстанций, токах нагрузки, перетоках активной и реактивной мощности по линиям электропередачи);
- ввода аналоговых сигналов информации об активной и реактивной мощности синхронных генераторов;
- ввода/вывода дискретных сигналов о состоянии синхронных генераторов и линий электропередачи и пусковых органов;
- сопряжения с устройствами телеизмерения и телесигнализации ТИ-ТС;
- концентратора местной вычислительной сети;
- микропроцессорной платы (с интегрированной сетевой картой связи с АСУ);
- вывода ПУВ;
- вывода информации о функционировании УВК;

– источника бесперебойного питания.

Программное обеспечение состоит из управляющей и информационной частей. Управляющая часть обеспечивает функционирование микропроцессора и осуществляет ввод данных текущего режима, расчет и выбор (дозирование), запоминание и вывод (по сигналам пусковых органов) ПУВ. Информационная часть функционирует на основе ПЭВМ и предназначена для отображения параметров текущего режима и реализуемых противоаварийных воздействий на ее экране.

Программы управляющей части делятся на две группы: системные и технологические. Системная группа обеспечивает функционирование технологической группы и производит:

- запуск и перезапуск микропроцессорных модулей;
- само- и взаимодиагностику двух указанных комплектов;
- управление базой данных;
- рассылку сообщений от УВК;
- протоколирование его функционирования и другие, главным образом, сервисные функции.

Технологическая группа программы обеспечивает выполнение основных функций по противоаварийному управлению:

- ввод в микропроцессор аналоговой и дискретной информации;
- дозирование противоаварийных управляющих воздействий;
- дозирование ПУВ;
- запоминание ПУВ и их вывод по сигналам пусковых органов.

Дозирование противоаварийных управляющих воздействий производится двумя способами:

- с использованием полной математической модели контролируемой части ОЭС по данным текущего режима и доаварийной ее схеме;
- выбором заранее определенных наборов для пусковых органов в зависимости от доаварийной схемы и значений параметров текущего режима, если математическая модель неполная или недостаточно данных текущего режима.

Информационная часть программного обеспечения производит выдачу информации о состоянии схемы, режимных параметрах, дозированных ПУВ и функционировании УВК в целом и передачу ее в АСУ ОЭС. С появлением быстродействующих промышленных микропроцессоров и микроЭВМ начали развиваться многоуровневые иерархические системы АПНУ, рассредоточенные по ОЭС и ЕЭС, с параллельными процессами вычислений, отличающиеся надежностью действия и соответствием вырабатываемых дозированных противоаварийных управляющих воздействий тяжести возмущающих

воздействий и их достаточностью для сохранения устойчивости функционирования ЕЭС при усложнившихся и утяжелившихся предаварийных и аварийных ситуациях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Шмурьев В.Я. Цифровые реле защиты. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 1 (4)) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 1999. – 56 с.
3. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов / Под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2000. – 504 с.
4. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты./ В.В. Михайлов, Е.В. Кириевский, Е.М. Ульяницкий и др.; / Под ред. В.П. Морозкина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.
5. Овчаренко Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика линий электропередачи ВН и СВН. Часть 1. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 4 (100)) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 52 с.
6. Международный стандарт IEC 50 (448) Защита энергетических систем. Женева, 1995.
7. Новые 8-разрядные микроконтроллеры Silicon Laboratories с RTC-модулем. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kit-e.ru/articles/micro/2006\\_8\\_110.php](http://www.kit-e.ru/articles/micro/2006_8_110.php) (дата обращения 24.12.2014).
8. Требования по выполнению условий электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики / Методические указания / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 10 (82)) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – 64 с.;
9. Решение актуальных для российской электроэнергетики задач по организации каналов технологической связи. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.uni-eng.ru/services/kanaly-rza-i-pa> (дата обращения 24.12.2014).
10. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. пособие для вузов / А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 336 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Принципы построения релейной защиты	6
1.1. Назначение релейной защиты	6
1.2. Структура РЗ и используемая информация	8
1.3. Цифровая дискретизация аналоговых сигналов	11
1.4. Особенности функционирования ТТ в динамических режимах и режимах насыщения	14
1.5. Емкостные трансформаторы напряжения	16
2. Токовые цифровые защиты	18
2.1. Построение ступени МТЗ с независимой выдержкой времени	18
2.2. Блокирование МТЗ при броске намагничивающего тока силового трансформатора	19
2.3. Использование пусковых и блокирующих сигналов в МТЗ	21
2.4. Токовая защита обратной последовательности	23
3. Цифровые дифференциальные защиты	26
3.1. Дифференциальные защиты на основе непосредственного сравнения токов	26
3.2. Дифференциальные защиты с использованием торможения сравниваемыми токами	28
3.3. Основные функциональные блоки дифференциальной защиты	32
3.4. Особенности выполнения цифровых дифференциальных защит трансформаторов	35
4. Дистанционные цифровые защиты	39
4.1. Дистанционный принцип в защите линий электропередачи	39
4.2. Сопротивления на входах ДЗ в режимах без коротких замыканий	41
4.3. Характеристики срабатывания дистанционных органов и определяющие их факторы	43
4.4. Обеспечение правильного функционирования дистанционных защит в условиях качаний и асинхронного хода в ЭС	49
5. Микропроцессорная противоаварийная автоматика линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений	53
5.1. Микропроцессорная автоматика повторного включения	53

5.2. Функционирование и развитие микропроцессорной автоматики предотвращения нарушения устойчивости	54
Библиографический список	58

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

**Козлов Александр Николаевич,**  
*доцент кафедры энергетики АмГУ, канд. техн. наук;*

**Микропроцессорные средства управления: учебное пособие**

---

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 3,60. Заказ 633.