

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна»

Высшая школа технологии и энергетики

Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Текст лекций для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:
О. О. Иванов
В. Л. Иванов
В. В. Рысева

Санкт-Петербург
2025

Утверждено
на заседании кафедры АЭиЭ
29.08.2025 г., протокол № 1/25-26

Рецензенты:
А. А. Сафонов, В. В. Королев

Текст лекций соответствует программе и учебному плану дисциплины «Цифровые технологии релейной защиты и автоматики» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника» по профилю «Электротехническое оборудование энергетических комплексов».

В тексте лекций рассматриваются теория, принцип действия, устройство и анализ режимов работы устройств релейной защиты и автоматики. Представлены современные подходы к проектированию и эксплуатации систем релейной защиты, изменения в нормативной базе, а также обзор новых технологий и оборудования, используемого в этой области.

Текст лекций предназначен для подготовки магистров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве текста лекций

**Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.**

Дата подписания к использованию 19.11.2025 г. Рег. № 5288/25

**Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.**

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.....	6
1.1. Повреждения и ненормальные режимы работы энергетических комплексов	6
1.2. Назначение, структура и принципы построения релейной защиты и автоматики. Используемая информация и её обработка в цифровой релейной защите.....	10
РАЗДЕЛ 2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	12
2.1. Устройства релейной защиты и автоматики на микроэлектронной элементной базе.....	12
2.2. Реле защиты, выполняемые на операционных усилителях и интегральных микросхемах	18
РАЗДЕЛ 3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	20
3.1. Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Основные разновидности и классификация измерительных трансформаторов.....	20
3.2. Цифровые измерительные органы релейной защиты и контроль за исправностью цифровых защит	22
РАЗДЕЛ 4. ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ	31
4.1. Максимальные токовые защиты и токовые отсечки. Принцип действия максимальной токовой защиты	31
4.2. Токовая цифровая защита, защита от перегрузки и от междуфазных коротких замыканий. Цифровая токовая отсечка.....	34
РАЗДЕЛ 5. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ	38
5.1. Защита трансформаторов, электрических машин и шин станций и подстанций. Оценка цифровой релейной защиты	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	46
Построение релейной защиты.....	46
Основные элементы цифровой релейной защиты	46
Основы измерительных трансформаторов и цифровых преобразователей в релейной защите.....	47

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭЭС – электроэнергетическая система
АЧР – автоматическая частотная разгрузка
РЗА – релейная защита и автоматика
АОСН – автоматическое ограничение снижения напряжения
АЛАР – автоматика ликвидации асинхронного режима
ЛЭП – линия электропередач
КЗ – короткое замыкание

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии релейной защиты и автоматики играют ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности электрических сетей, промышленных установок и энергетических систем. Общая тенденция к автоматизации управления и мониторинга требует от специалистов глубокой осведомленности о новых методах, приборах и их интеграции в существующие системы.

С внедрением микропроцессорной техники возможным стало применение сложных цифровых способов обработки измеряемых сигналов за достаточно короткие интервалы времени, а также формирование новых оптимальных характеристик срабатывания цифровых реле, что в свою очередь положительным образом повлияло на основные требования к релейной защите. Алгоритмы цифровых устройств релейной защиты также прошли модернизацию, основываясь на широких технических возможностях микропроцессорной техники.

Релейная защита и автоматика – это неотъемлемая часть любой энергетической системы, обеспечивающая защиту оборудования от различных аварийных ситуаций и автоматическое управление процессами. С развитием технологий меняются подходы к проектированию систем защиты, появляются новые релейные устройства и методы, способствующие повышению безопасности, экономичности и эффективности функционирования электрических сетей.

Данное методическое пособие предназначено для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики и автоматизации. В нем представлены современные подходы к проектированию и эксплуатации систем релейной защиты, изменения в нормативной базе, а также обзор новых технологий и оборудования, используемого в этой области.

Пособие включает теоретическую часть с описанием основных принципов работы релейной защиты и автоматики, а также практические рекомендации по их применению. Читатель познакомится с современными методами диагностики и контроля состояния электрических установок, научится анализировать и выбирать оптимальные схемы защиты для различных объектов.

Мы надеемся, что данное пособие станет полезным ресурсом для изучения и применения современных технологий релейной защиты и автоматики, а также будет способствовать повышению квалификации специалистов и студентов в данной области.

РАЗДЕЛ 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

1.1. Повреждения и ненормальные режимы работы энергетических комплексов

Электроэнергетическая система (ЭЭС) – система комплексов электроэнергетики и объектов, принимающих электрическую энергию, и образующая общий режим работы технологических процессов производства, генерации, преобразования, передачи и потребления электроэнергии в условиях оперативного управления.

ЭЭС включает в себя электростанции, генерирующие энергию, и потребителей, соединенные друг с другом электрическими линиями, распределительными устройствами, устройствами повышения и/или понижения (трансформаторы) и преобразования. ЭЭС защищаются при помощи средств противоаварийной защиты и автоматики, таких как автоматическая частотная разгрузка (АЧР), отключающая потребителей при нехватке активной мощности; автоматическое ограничение снижения напряжения (АОЧН), применяемое при дефиците реактивной мощности; системы автоматического ввода резерва (АВР); автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) и делительной защитой.

Причины повреждений энергетических комплексов – самые разнообразные: от разрушения изоляции до ошибок сотрудников энергетических предприятий («человеческий фактор»).

Изоляция часто подвергается повреждениям из-за ее старения, механических воздействий, повреждений опор ЛЭП, влияний природы, перенапряжений, коротких замыканий. К «человеческому фактору» относятся ошибки персонала при переключении линий, а также неправильная последовательность отключения разъединителей и заземление токоведущих частей под напряжением.

Режим короткого замыкания электроустановки – это аварийный режим работы, при котором соединяются две и более точки электрической цепи с разными потенциалами. Это приводит к резкому увеличению тока в местах соединения (например, фаза-ноль или фаза-фаза). Случаются и замыкания между фазой и землей, такое замыкание называется «короткое замыкание на землю». Рисунок 1.1 содержит виды коротких замыканий.

1. Трехфазное замыкание.
2. Двухфазное замыкание.
3. Однофазное замыкание на землю.
4. Однофазное замыкание на землю (Изолированная нейтраль).
5. Двухфазное замыкание на землю.
6. Трехфазное замыкание на землю.

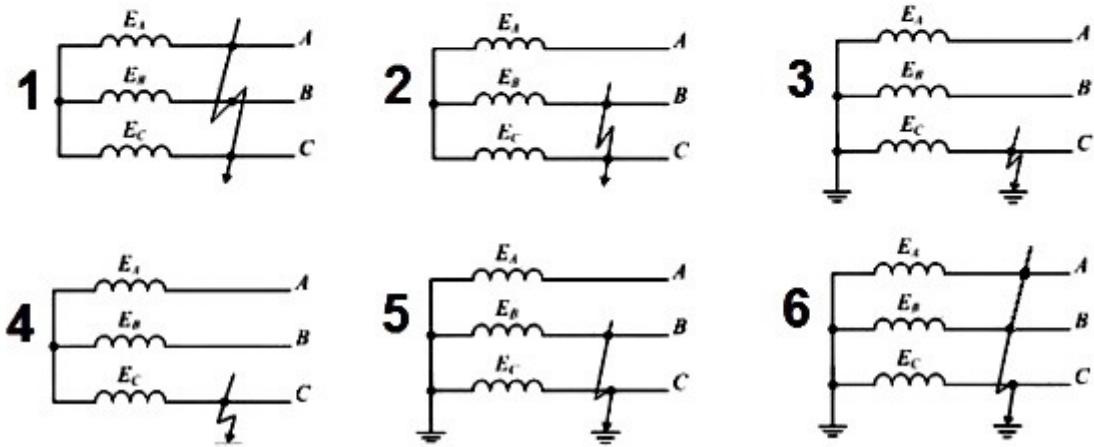


Рисунок 1.1 – Виды коротких замыканий

Симметричное (трехфазное) короткое замыкание возникает, когда все фазы находятся в одинаковых условиях.

Несимметричное короткое замыкание обусловлено разными условиями замыкания фаз, например, двухфазное замыкание на землю. Однофазное замыкание на землю – соединение только одной фазы на землю, двух(трех)фазное (на землю) – замыкание двух(трех) фаз на землю (рис. 1.2).

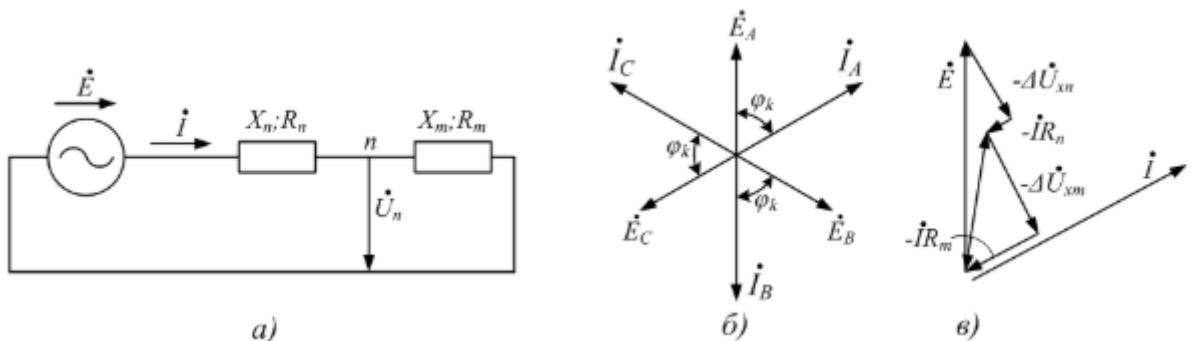


Рисунок 1.2 – Схема замещения и векторные диаграммы:
 а) – расчетная схема; б) – диаграмма токов и напряжений в месте КЗ;
 в) – векторная диаграмма для определения напряжения в промежуточных точках сети

При расчетах коротких замыканий в электроустановках применяют метод симметричных составляющих – способ замены любой несимметричной системы

напряжений, ЭДС или токов на три симметричные системы по принципу наложения. Эти три системы называют системами прямой, нулевой и обратной последовательности. В релейной защите этот метод используется при расчете несимметричных коротких замыканий.

Прямая последовательность – векторы равны по модулю, сдвинуты относительно друг друга на 120 электрических градусов с прямым чередованием фаз.

Обратная последовательность – векторы равны по модулю, сдвинуты относительно друг друга на 120 электрических градусов с обратным чередованием фаз.

Нулевая последовательность – векторы равны по модулю и совпадают по направлению.

Самый опасный вид короткого замыкания – трехфазное короткое замыкание.

Ненормальные режимы работы ЭЭС:

1. Перегрузка оборудования, вызванная увеличением тока сверх номинального значения (наибольший допустимый по условиям нагрева ТВЧ и изоляции ток, при котором оборудование может работать неограниченно длительное время). Если ток, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемой им дополнительной тепловой энергии температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимые значения, что приводит к ускоренному старению изоляции и токоведущих частей.

2. Повышение напряжения возникает вследствие ненормальной работы трансформаторов (генераторов), грозовых и коммутационных перенапряжений на линиях электропередач.

3. Понижение напряжения возникает вследствие нарушения нормального режима работы ЭЭС. Особенно опасно понижение напряжения для электродвигателей, которые для поддержания необходимой величины крутящего момента увеличивают потребление тока, что приводит к их токовой перегрузке и выходу из строя.

4. Неполнофазный режим возникает при обрыве фазы или перегорании предохранителя в питающей сети. В обоих случаях ток резко возрастает, что приводит к перегрузке и перегреву двигателей и выходу их из строя. Отклонение частоты от номинального значения $50\pm0,05$ Гц (внеплановое увеличение нагрузки потребителей приводит к снижению частоты генерации, и наоборот).

5. Качания – режим работы энергосистемы, при котором происходят периодические изменения её параметров (тока и напряжения). Качания возникают при нарушении синхронной работы генераторов электростанций ЭЭС (асинхронный режим), а также при подключении или отключении большой активной нагрузки. Синхронизация ЭЭС – процесс уравнивания частоты вращения и напряжения включаемого генератора с частотой вращения и напряжением работающих генераторов, а также выбор соответствующего момента времени для подачи импульса на включение выключателя генератора.

6. Короткое замыкание между витками одной фазы является типичной неисправностью асинхронных электродвигателей (АД). Этот дефект приводит к увеличению тока фазы, в которой произошло короткое замыкание, и небольшому изменению амплитуды токов в других фазах. Эта неисправность вызывает ухудшение КПД машины из-за увеличения потерь. В результате повышается температура обмотки и состояние изоляции быстро ухудшается. Это, в свою очередь, может привести к возникновению другого короткого замыкания. В то же время, если число короткозамкнутых витков невелико, средний электромагнитный крутящий момент, создаваемый машиной, остается практически неизменным. При этом колебания момента увеличиваются пропорционально величине неисправности. На рисунке 1.3 показаны дефекты обмотки статора из-за межвиткового короткого замыкания в лобовой и пазовой частях.

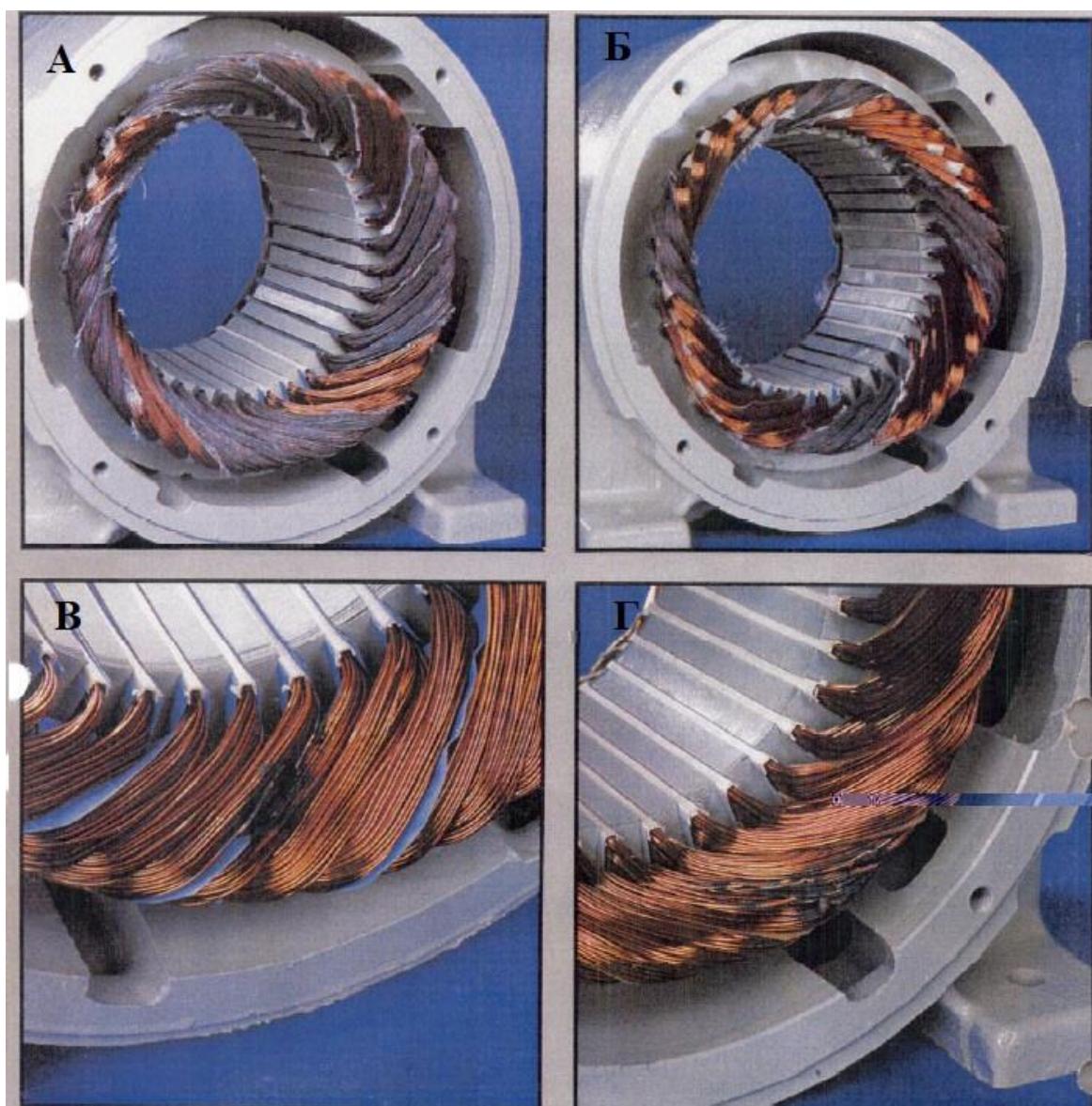


Рисунок 1.3 – Повреждения обмотки асинхронных двигателей

1.2. Назначение, структура и принципы построения релейной защиты и автоматики. Используемая информация и её обработка в цифровой релейной защите

При разработке и эксплуатации любой электрической системы важно учитывать вероятность повреждений и аномальных режимов работы, которые могут вызвать аварии и привести к недостаточной подаче электроэнергии потребителям, ухудшению её качества или повреждению оборудования.

Предотвратить возникновение или развитие аварии часто можно путем быстрого отключения повреждённого элемента. Чтобы обеспечить бесперебойную работу неповреждённой части системы, время отключения повреждённого элемента должно быть коротким и часто составляет доли секунды.

Человек, обслуживающий систему, не в состоянии за такое короткое время обнаружить и устранить неисправность. По этой причине электроустановки оснащаются специальными автоматическими выключателями.

Релейная защита используется для скорейшего отключения элемента электроэнергетической системы.

Если повреждение не угрожает немедленным разрушением защищаемого объекта, не нарушает бесперебойное электроснабжение и не создает угрозы по технике безопасности, то защитные устройства могут реагировать не на отключение, а на сигнал, уведомляющий дежурный персонал о неисправности.

Устройства релейной защиты должны срабатывать как на сигнал, так и на отключение в случае ненормальных режимов работы сети, если такие изменения могут представлять опасность для оборудования.

Используемая информация и её обработка в цифровой релейной защите чаще всего относятся к процессам сбора, анализа и интерпретации данных, необходимых для обеспечения надежной работы электрических систем и защиты оборудования от повреждений. Используемая информация – это данные, получаемые от датчиков и измерительных устройств, установленных в электросистеме. Эти данные могут включать информацию о токах, напряжениях, частотах, температуре и других параметрах, которые важны для оценки состояния системы. Могут использоваться данные о состоянии оборудования, о наличии перегрузок, коротких замыканий или других авариях.

Обработка информации – это то, каким образом устройства цифровой релейной защиты используют алгоритмы и программное обеспечение для анализа собранных данных. Это может включать фильтрацию сигналов, применение математических моделей и алгоритмов для выявления аварий. Крайне важным аспектом обработки информации является принятие решений о необходимости срабатывания защитных устройств. Например, если данные указывают на короткое замыкание, система может быстро отключить повреждённый участок сети, предотвращая дальнейшие повреждения. Обработка информации также включает в себя ведение журналов событий и анализ исторических данных, что позволяет улучшать надежность работы системы и проводить профилактическое обслуживание.

Селективность действия – это способность релейного устройства срабатывать только при повреждении в своей зоне ответственности и не реагировать на внешние повреждения и нагрузки. Селективным считается такое поведение защиты, при котором она отключает лишь повреждённый элемент через его автоматические выключатели, в то время как остальные части системы остаются включенными.

Все устройства релейной защиты делятся на два класса по критерию селективности:

- Имеются РЗ, зона действия которых не выходит за пределы защищаемого объекта. Они выполняются без выдержки времени и называются РЗ с абсолютной селективностью (для измерения или принятия решения об отключении используется дополнительная информация с противоположного конца (или концов) защищаемого объекта).

Защиты с абсолютной селективностью – селективность обеспечивается принципом действия, например, используют все виды дифференциальных защит.

- Другая группа РЗ действует при КЗ как на защищаемом элементе, так и за его пределами. Их селективность обеспечивается подбором выдержек времени. Такие РЗ называют защитами с относительной селективностью.

Чувствительность – это способность устройства релейной защиты реагировать на минимальные значения аварийных параметров. Например, при повреждении на линиях высокого напряжения, работающих в условиях минимальных нагрузок и значительных переходных сопротивлений, токи короткого замыкания могут быть ниже максимальных токов нагрузки. Это ограничивает возможность применения обычных токовых защит и требует перехода к более сложным и затратным видам защиты.

Быстродействие системы защиты заключается в следующем:

- Ускоренное отключение повреждений повышает устойчивость параллельной работы электрических машин в системе и уменьшает риск возникновения серьезных системных аварий.
- Быстрое отключение снижает время работы потребителей при пониженном напряжении, что помогает сохранить работоспособность электродвигателей у потребителей.
- Ускорение отключения сокращает ущерб повреждённого элемента.
- Ввиду указанных причин для линий электропередачи напряжением 500 кВ быстродействие должно составлять не более 20 мс, а для 750 кВ – не более 15 мс.

Надежность – способность электрической сети в любой момент времени обеспечить потребителей электроэнергией в требуемом объеме и заданного качества.

РАЗДЕЛ 2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

2.1. Устройства релейной защиты и автоматики на микроэлектронной элементной базе

Цифровые устройства релейной защиты различного назначения имеют много общего, а их структурные схемы очень похожи и подобны представленной на рисунке 2.1. Центральным узлом цифрового устройства является микропроцессор, который через свои устройства ввода-вывода обменивается информацией с периферийными узлами. С помощью этих дополнительных узлов осуществляется сопряжение микропроцессора с внешней средой: датчиками исходной информации, объектом управления, оператором и т. д.

Следует отметить, что в реальном устройстве релейной защиты может использоваться несколько микропроцессоров, каждый из которых будет занят решением отдельного фрагмента общей задачи с целью обеспечения высокого быстродействия. Например, в сложных устройствах релейной защиты используются 7–10 микропроцессоров, работающих параллельно.

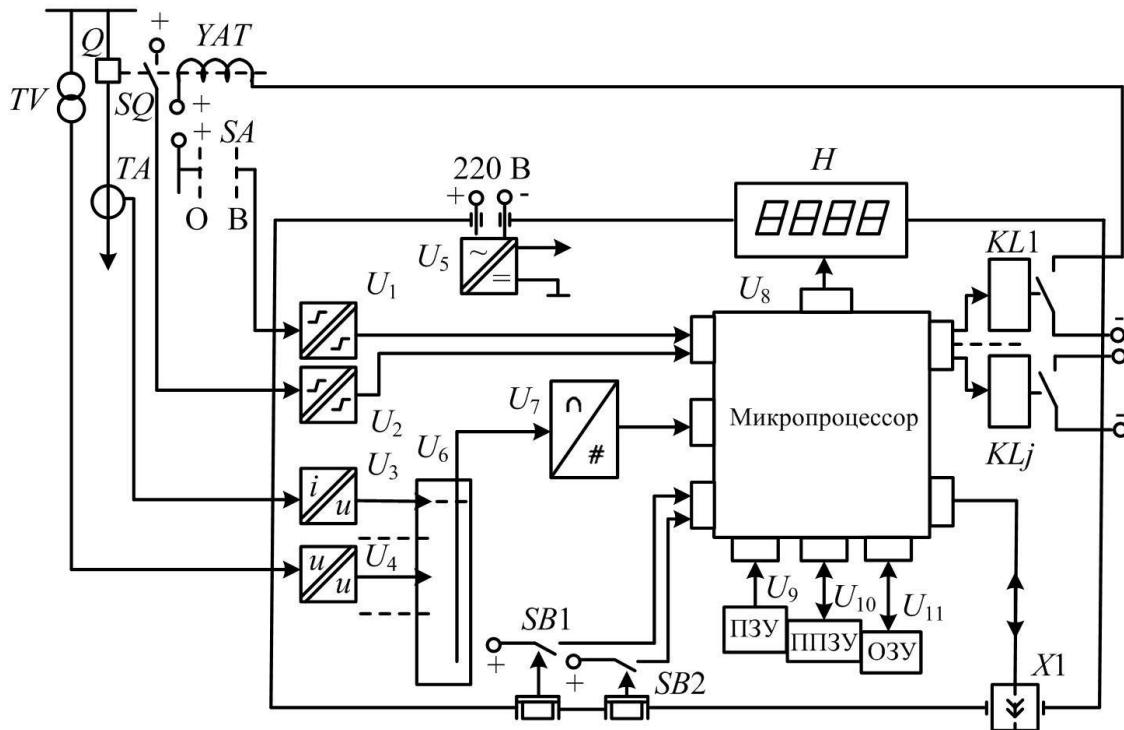


Рисунок 2.1 – Структурная схема цифрового устройства релейной защиты

Непременными узлами цифрового устройства релейной защиты и автоматики являются: входные U1–U4 и выходные KL1–KLj преобразователи сигналов, тракт аналого-цифрового преобразования U6, U7, кнопки управления и ввода информации от оператора SB1, SB2, дисплей Н для отображения информации и блок питания U5. Современные цифровые устройства, как

правило, оснащаются и коммуникационным портом X1 для связи с другими устройствами.

Основные функции вышеперечисленных узлов следующие.

Входные преобразователи обеспечивают гальваническую развязку внешних цепей от внутренних цепей устройства. Одновременно, входные преобразователи осуществляют приведение контролируемых сигналов к единому виду (как правило, к напряжению) и нормированному уровню. Здесь же осуществляется предварительная частотная фильтрация входных сигналов перед их аналого-цифровым преобразованием. Одновременно принимаются меры по защите внутренних элементов устройства от воздействия помех и перенапряжений.

Различают преобразователи аналоговые (U3, U4) и логические (U1, U2) входных сигналов. Первые стремятся выполнить так, чтобы обеспечить линейную (или нелинейную, но с известным законом) передачу контролируемого сигнала во всем диапазоне его изменения. Преобразователи логических сигналов, наоборот, стремятся сделать чувствительными только к узкой области диапазона возможного нахождения контролируемого сигнала. Входные преобразователи аналоговых сигналов. Сигналы, контролируемые устройствами релейной защиты, имеют в общем случае разную физическую природу – токи, напряжения, температура и т. д. Чаще всего устройства релейной защиты работают с сигналами от источников переменного тока и напряжения, с традиционными номинальными уровнями: 1 А, 5 А, 100 В. Такие уровни сигналов обеспечивают необходимую помехозащищенность, но совершенно неприемлемы для обработки в электронных схемах. Использование же датчиков с выходными сигналами, согласованными с требованиями электроники, наталкиваются на необходимость либо резко ограничить длину линий связи, размещая устройства вблизи датчиков информации, либо применять дополнительные меры по их защите от помех, такие как экранирование, что весьма дорого.

При подключении микропроцессорных устройств к традиционным датчикам тока и напряжения требуется приведение их сигналов к единому виду и диапазону изменения, приемлемому для обработки электронными узлами.

Наиболее часто входные согласующие преобразователи цифровых устройств выполняются на базе обычных электромагнитных трансформаторов с ферромагнитным сердечником. Несмотря на то, что такие трансформаторы имеют нелинейные передаточные характеристики, определенный разброс параметров, некоторую нестабильность во времени и при изменении температуры, они все же приемлемы для построения устройств релейной защиты, допускающих работу с погрешностью 2–5 %.

Входные преобразователи дискретных сигналов. Практически во всей современной электронной аппаратуре ввод дискретных сигналов осуществляется преобразователями на основе оптронов.

Малый входной ток оптрана, с одной стороны, является его достоинством, так как приводит к снижению мощности, потребляемой преобразователем, но, с другой стороны, приводит к ряду проблем.

В первую очередь, малый входной ток обуславливает низкую помехозащищенность преобразователя. Чтобы исключить ложную работу устройства микропроцессорного устройства релейной защиты в такой ситуации, на выходе преобразователя устанавливают элемент выдержки времени с фиксированной или регулируемой задержкой в формировании выходного сигнала. Чтобы отстроиться от переходных процессов, обычно достаточно задержки 0,5–3 миллисекунд.

Выходные релейные преобразователи. Воздействие реле на защищаемый объект традиционно осуществляется в виде дискретных сигналов управления. При этом выходные цепи устройства защиты выполняются так, чтобы обеспечить гальваническую развязку коммутируемых цепей как между собой, так и относительно внутренних цепей устройства релейной защиты. Выходные преобразователи должны обладать соответствующей коммутационной способностью и, в общем случае, обеспечивать видимый разрыв коммутируемой цепи.

Несмотря на очевидные достижения в области коммутации высоких потенциалов и сильных токов в цифровых реле, в большинстве случаев по-прежнему используются промежуточные электромагнитные реле. Контактная техника пока еще остается вне конкуренции как единственное устройство, обеспечивающее видимый разрыв в коммутируемой цепи. К тому же это и самое дешевое решение. Как правило, в цифровых устройствах релейной защиты применяются несколько типов малогабаритных реле: с большей коммутационной способностью – для работы непосредственно в цепях управления выключателей, с меньшей – для работы в цепях сигнализации. Мощные реле способны включать цепи с током примерно 5-30 А, но их отключающая способность обычно не превосходит 1 А при напряжении 220 В. Таким образом, схема управления должна предусматривать прерывание тока в цепи электромагнита выключателя его вспомогательным контактом. Отключающая способность сигнальных реле обычно не превышает 0,15 А в цепях постоянного тока напряжением 220 В.

Тракт аналого-цифрового преобразования включает мультиплексор U6 и собственно аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – U7. Мультиплексор – это электронный коммутатор, поочередно подающий контролируемые сигналы на вход АЦП. Применение мультиплексора позволяет использовать один АЦП (как правило, дорогостоящий) для нескольких каналов. В АЦП осуществляется преобразование мгновенного значения входного сигнала в пропорциональное ему цифровое значение. Преобразования выполняются с заданной периодичностью. В последующем в микропроцессоре по этим выборкам из входных сигналов рассчитываются интегральные параметры контролируемых сигналов – их амплитудные или действующие значения.

Блок питания U5 обеспечивает стабилизированным напряжением все узлы рассматриваемого устройства, независимо от возможных изменений напряжения в питающей сети. Блоки питания многих современных устройств релейной защиты могут работать и с сетями переменного и постоянного тока. Как правило, в блоке питания формируется и ряд дополнительных сигналов, исключающих неправильную работу микропроцессора и некоторых других электронных узлов устройства в момент появления и исчезновения напряжения питания.

Практически во всех современных устройствах используются импульсные блоки питания, выполняемые на базе высокочастотных инверторов [13]. Дисплей и клавиатура являются непременными атрибутами любого цифрового устройства, позволяя оператору получить информацию от устройства, изменять режим его работы, вводить новую информацию. Надо отметить, что дисплей Н и клавиатура SB1, SB2 в цифровой релейной защите, как правило, реализуются в максимально упрощенном виде: дисплей – цифробуквенный, одно- (или несколько-) строчный; клавиатура – несколько кнопок.

Для отображения информации в микропроцессорном устройстве релейной защиты используются отдельные светодиодные индикаторы, табло и графические экраны. Совокупность элементов визуального отображения информации называют дисплеем.

Очевидно, что дисплей не должен быть дорогим, так как общение человека с реле происходит крайне редко. Дисплей реле должен обеспечивать быстрое и однозначное представление информации. Наилучшим образом этим требованиям удовлетворяют простые дисплеи в виде светодиодных индикаторов. С другой стороны, цифровое устройство защиты – это устройство, которое способно предоставить оператору очень большой объем информации: текущие значения токов и напряжений электроустановки, их аварийные значения, уставки (в цифровых реле их может быть несколько наборов), состояние входов и выходов управления и т. д. Для оперативного получения такого объема информации требуются, соответственно, и более информативные дисплеи.

В цифровых устройствах релейной защиты используются в основном два способа представления величин – в именованных единицах (вольтах, амперах, градусах и т. д.) и в относительных. Оперативному персоналу удобнее работать с именованными величинами, отражающими реальные значения токов, напряжений и других параметров электроустановки. Это требует занесения дополнительной информации в реле – коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов, а на дисплей необходимо дополнительно выводить размерность отображаемой величины.

Альтернативным решением является представление всех величин в относительных единицах или процентах. Чаще всего за базисные единицы принимают номинальные значения контролируемых величин.

В последнее время применение в устройстве релейной защиты сложного дисплея становится менее актуальным. Современные цифровые реле, как правило, предусматривают подключение к компьютеру, и вся необходимая

информация может в любой удобной форме быть представлена на обычном дисплее компьютера.

Кнопки управления или клавиатура являются неотъемлемыми элементами связи человека с цифровым устройством. С помощью клавиатуры можно изменить режим работы устройства, вызвать на дисплей интересующие параметры и величины, ввести новые уставки и т. д.

Число кнопок, используемых в клавиатурах различных устройств релейной защиты, варьируются от двух до десяти. Чем больше кнопок в клавиатуре, тем удобнее и быстрее можно вводить информацию в устройство. Однако кнопки являются наиболее ненадежными элементами цифровой аппаратуры. Поэтому там, где пользоваться клавиатурой приходится крайне редко, стремятся использовать минимальное число кнопок. Минимальное число кнопок клавиатуры, позволяющее вводить любую информацию, равно двум.

Одним из важнейших узлов цифровых реле являются устройства хранения информации. В настоящее время используются различные типы устройств хранения информации. Сразу же исключим из рассмотрения устройства с использованием электромеханических узлов (например, с записью информации на магнитных дисках) как требующие постоянного ухода и имеющие ограниченный ресурс. В аппаратуре микропроцессорной релейной защиты, рассчитанной на большие сроки эксплуатации с минимальными затратами на обслуживание, должны использоваться узлы без движущихся частей.

В функциональном отношении все статические запоминающие устройства подразделяются на ПЗУ, ОЗУ и ППЗУ. Рассмотрим их подробнее.

Для хранения рабочей программы в устройствах защиты обычно используются постоянные запоминающие устройства – ПЗУ. Отличительной чертой ПЗУ является однократная запись информации. В последующем возможно только считывание записанной информации. Достоинством микросхем ПЗУ является их низкая стоимость и возможность хранения информации при отключении питания.

В последнее время шире начинают применяться перепrogramмируемые устройства памяти. Особенно они важны для устройств защиты, рабочая программа которых должна изменяться в процессе эксплуатации. В настоящее время существуют устройства релейной защиты, в которых нужные функции защиты выбираются из библиотеки стандартных функций самим пользователем. Логическая часть этих устройств релейной защиты создается пользователем из базовых логических функций типа И, ИЛИ, ТРИГГЕР и т. д. Рабочая программа в таких устройствах защиты располагается в перепrogramмируемом постоянном запоминающем устройстве (ППЗУ). ППЗУ является энергонезависимой памятью, т. е. хранимая в ней информация не разрушается в обесточенном состоянии.

Для временного хранения результатов промежуточных вычислений используются оперативные запоминающие устройства (ОЗУ). Запись и считывание данных в ОЗУ осуществляется с максимальной скоростью. Недостатком ОЗУ является разрушение информации при отключении питания.

Порт связи с внешними цифровыми устройствами. Достоинством цифровых устройств релейной защиты является возможность передачи имеющейся информации в другие цифровые системы: АСУ ТП, персональный компьютер и т. д., что позволяет интегрировать различные системы, экономя на каналах связи, затратах на предварительную обработку сигналов и т. п. Коммуникационный порт – необходимый элемент для дистанционной работы с данным устройством.

Интерфейсы микропроцессорных устройств релейной защиты. Под интерфейсом понимается совокупность аппаратных, программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных цифровых устройств, объединенных в систему.

По принципу обмена информацией интерфейсы подразделяются на интерфейсы с параллельной и последовательной передачей данных.

Наиболее быстрый обмен информацией между двумя цифровыми устройствами обеспечивает параллельный интерфейс.

В этом случае по синхронизирующему сигналу (в действительности это может быть последовательность из нескольких сигналов управления) передающее устройство выставляет на шину данных одновременно все разряды передаваемого числа, а приемное устройство его считывает.

Технически более просто выполняется интерфейс с последовательной передачей данных. В этом случае слово данных передается последовательно разряд за разрядом.

Существует достаточно много стандартов на каналы последовательной связи. Стандарты отличаются по скорости обмена, организации и длине линий связи и т. д.

Наиболее известен стандарт RS232, применяемый в IBM совместимых ПК. Стандарт RS232C разработан в 1969 г. Интерфейс обеспечивает дальность связи до 15 м со скоростью до 19 200 бод.

В ряде цифровых реле порт последовательной связи выполнен в стандарте RS485. Интерфейс обеспечивает дальность связи до 1200 м со скоростью до 10 Мбит/с.

Наряду с вышеперечисленными в цифровых устройствах релейной защиты, в общем случае, могут встретиться и другие узлы, например, цифроанalogовые преобразователи при формировании аналоговых сигналов управления и регулирования. Характеристики однотипных узлов в устройствах различных изготовителей оказываются весьма близкими. Причиной этого является необходимость реализации одних и тех же исходных требований, ориентация схемных решений на одни и те же реальные входные сигналы, получаемые от стандартных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, и объективные законы, по которым должна вестись обработка информации.

2.2. Реле защиты, выполняемые на операционных усилителях и интегральных микросхемах

Современное состояние находящихся в эксплуатации устройств РЗА характеризуется наличием трех групп устройств РЗА, отличающихся элементной базой, на которой выполняются данные устройства.

Первая группа, самая многочисленная и давно известная, – традиционные электромеханические реле.

Вторая группа – устройства РЗА с реле, выполненными на интегральных микросхемах.

Третья группа – цифровые устройства РЗА.

Устройства первой группы выполнены на электромеханических реле и существуют с начала XX века. Реле, которые входят в состав этих устройств, реализованы на различных принципах, а именно: электромагнитном, индукционном, магнитоэлектрическом и т. д. Наладка и настройка таких реле трудоемка и требует времени, поскольку в реле имеются врачающиеся диски, барабанчики, пружины, подвижные контакты, которые бывает сложно отрегулировать. К очевидным достоинствам устройств данной группы следует отнести их дешевизну и наглядность схем РЗА.

Вторая группа – устройства РЗА с реле, выполненными на интегральных микросхемах. Они находятся в эксплуатации с 1970-х годов. В основу действия таких реле положен принцип, получивший название «время-импульсный». В данных реле нет подвижных врачающихся элементов. Срабатывание реле определяется величиной напряжения на его выходе U_{AC0} .

Например, у несработавшего реле $U_{AC0} = -13$ В, а при срабатывании реле U_{AC0} изменяется до +13 В.

Одним из основных достоинств устройств РЗА данной группы является наличие встроенного диагностического контроля, что значительно облегчает и сокращает время плановых проверок РЗА. Для проверки исправности работы логической части РЗА достаточно подать напряжения определенной величины, так называемые тесты, в контрольные точки схемы. Подача тестов производится кнопками или ключами, установленными на лицевой панели устройства. Сигнальные лампы «ИСПРАВНОСТЬ» и «НЕИСПРАВНОСТЬ» сигнализируют о состоянии логической части схемы. Наличие ряда тестов позволяет поочередно проверять логические части всех защит в данном устройстве РЗА. Например, I, II, III зоны дистанционной защиты и I, II, III, IV зоны токовой защиты нулевой последовательности в панели ШДЭ-2801 (2801). Тестирование также позволяет выявить неисправные блоки.

Применение время-импульсного принципа в защитах позволяет улучшить показатели устройств РЗА. Так, например, коэффициент возврата k_B у реле серий РСТ и РСН равен 0,9 – 0,95, в то время как аналогичные электромеханические реле имеют $k_B = 0,8 – 0,85$. Реле ДЗТ-21(23), используемое в дифференциальных защитах трансформаторов, позволяет устанавливать ток срабатывания защиты $I_{cz} = 0,3I_{nom}$, а для реле ДЗТ-11 $I_{cz} = (1,4 – 1,5)I_{nom}$.

Ремонт устройств, выполненных на интегральных микросхемах, осуществляется проще. При выходе из строя одного из блоков достаточно снять его с панели и заменить новым. Данная операция не требует никаких монтажных работ.

К основным недостаткам устройств данной группы следует отнести сложность схем и их довольно высокую стоимость по сравнению с устройствами РЗА первой группы.

Третья группа – цифровые устройства РЗА. В настоящее время в системах РЗА установлено сравнительно небольшое число таких комплектов, что обусловлено их высокой стоимостью.

Достиныа цифровых защит очевидны. Это возможность расчета практически любых электрических величин, необходимых для действия устройств, что позволяет сделать их более чувствительными и быстродействующими. Ограничений по сложности работы алгоритмов и их количеству тоже практически нет. Реализация времязависимых защит $t_{cz} = f(I_{cz})$ на цифровых устройствах проста, в то время как для электромеханических реле это сложная задача: существующее реле РТ-80 требует больших трудозатрат по настройке и наладке, а в цифровых защитах предлагается регулировать кривые, такие как $t_{cz} = f(I_{cz})$, по признакам.

В цифровых РЗА также просто решаются вопросы нахождения активных, реактивных и полных сопротивлений. Реле сопротивления используются в дистанционных защитах, защитах генераторов от асинхронных режимов, в устройствах автоматики, ликвидирующих асинхронный режим (АЛАР).

РАЗДЕЛ 3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

3.1. Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Основные разновидности и классификация измерительных трансформаторов

Измерительные трансформаторы тока и напряжения предназначены для уменьшения первичных токов и напряжений до значений, наиболее удобных для подключения измерительных приборов, реле защиты, устройств автоматики. Применение измерительных трансформаторов обеспечивает безопасность работающих, так как цепи высшего и низшего напряжения разделены, а также позволяет унифицировать конструкцию приборов и реле.

Трансформаторы тока классифицируют:

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

Буквенные обозначения:

- Т – трансформатор тока;
- Ф – с фарфоровой изоляцией;
- Н – наружной установки;
- К – каскадный, с конденсаторной изоляцией или катушечный;
- П – проходной;
- О – одновитковый стержневой;
- Ш – одновитковый шинный;
- В – с воздушной изоляцией, встроенный или с водяным охлаждением;
- Л – с литой изоляцией;
- М – маслонаполненный, модернизированный или малогабаритный;
- Р – для релейной защиты;
- Д – для дифференциальной защиты;
- З – для защиты от замыканий на землю.

Технические характеристики трансформаторов тока

Номинальный первичный и вторичный ток трансформаторов тока

Трансформаторы тока характеризуются номинальным первичным током $I_{ном1}$ (стандартная шкала номинальных первичных токов содержит значения от 1 до 40000 А) и номинальным вторичным током $I_{ном2}$, который принят равным 5 или 1 А. Отношение номинального первичного к номинальному вторичному току представляет собой коэффициент трансформации $K_{ТА} = I_{ном1} / I_{ном2}$

Токовая погрешность трансформаторов тока

Трансформаторы тока характеризуются токовой погрешностью $\Delta I = \frac{(I_{2k} - I_1)100}{I_1}$ (в процентах) и угловой погрешностью (в минутах). В зависимости от токовой погрешности измерительные трансформаторы тока разделены на пять классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Наименование класса точности соответствует предельной токовой погрешности трансформатора тока при первичном токе, равном 1 – 1,2 номинального. Для лабораторных измерений предназначены трансформаторы тока класса точности 0,2, для присоединений счетчиков электроэнергии – трансформаторы тока класса 0,5, для присоединения щитовых измерительных приборов – классов 1 и 3.

Нагрузка трансформаторов тока

Нагрузка трансформатора тока – это полное сопротивление внешней цепи Z_2 , выраженное в омах. Сопротивления r_2 и x_2 представляют собой сопротивление приборов, проводов и контактов. Нагрузку трансформатора можно также характеризовать кажущейся мощностью S_2 (ВА). Под номинальной нагрузкой трансформатора тока $Z_{2\text{ном}}$ понимают нагрузку, при которой погрешности не выходят за пределы, установленные для трансформаторов данного класса точности. Значение $Z_{2\text{ном}}$ дается в каталогах.

Электродинамическая стойкость трансформаторов тока

Электродинамическую стойкость трансформаторов тока характеризуют номинальным током динамической стойкости $I_{\text{м.дин}}$ или отношением $k_{\text{м.дин}} = \frac{I_{\text{м.дин}}}{I_{1\text{ном}}} =$. Термическая стойкость определяется номинальным током термической стойкости I_t или отношением $k_t = \frac{I_t}{I_{1\text{ном}}}$ и допустимым временем действия тока термической стойкости t_t .

Конструкции трансформаторов тока

По конструкции различают трансформаторы тока катушечные, одновитковые (типа ТПОЛ), многовитковые с литой изоляцией (типа ТПЛ и ТЛМ). Трансформатор типа ТЛМ предназначен для КРУ и конструктивно совмещен с одним из штепсельных разъемов первичной цепи ячейки. Для больших токов применяют трансформаторы типа ТШЛ и ТПШЛ, у которых роль первичной обмотки выполняет шина. Электродинамическая стойкость таких трансформаторов тока определяется стойкостью шины.

Для ОРУ выпускают трансформаторы типа ТФН в фарфоровом корпусе с бумажно-масляной изоляцией и каскадного типа ТРН. Для релейной защиты имеются специальные конструкции. На выводах масляных баковых выключателей и силовых трансформаторов напряжением 35 кВ и выше устанавливаются встроенные трансформаторы тока. Погрешность их при прочих равных условиях больше, чем у отдельно стоящих трансформаторов.

Технические характеристики измерительных трансформаторов напряжения

Номинальные первичное и вторичное напряжение измерительных трансформаторов напряжения

Трансформаторы напряжения характеризуются номинальными значениями первичного напряжения, вторичного напряжения (обычно 100 В), коэффициента трансформации $K=U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$. В зависимости от погрешности различают следующие классы точности трансформаторов напряжения: 0,2; 0,5; 1; 3.

Нагрузка трансформаторов напряжения

Вторичная нагрузка трансформатора напряжения – это мощность внешней вторичной цепи. Под номинальной вторичной нагрузкой понимают наибольшую нагрузку, при которой погрешность не выходит за допустимые пределы, установленные для трансформаторов данного класса точности.

Конструкции трансформаторов напряжения

В установках напряжением до 18 кВ применяются трехфазные и однофазные трансформаторы, при более высоких напряжениях – только однофазные. При напряжениях до 20 кВ имеется большое число типов трансформаторов напряжения: сухие (НОС), масляные (НОМ, ЗНОМ, НТМИ, НТМК), с литой изоляцией (ЗНОЛ). Следует отличать однофазные двухобмоточные трансформаторы НОМ от однофазных трехобмоточных трансформаторов ЗНОМ. Трансформаторы типов ЗНОМ-15, -20 -24 и ЗНОЛ-06 устанавливаются в комплектных токопроводах мощных генераторов. В установках напряжением 110 кВ и выше применяют трансформаторы напряжения каскадного типа НКФ и емкостные делители напряжения НДЕ.

3.2. Цифровые измерительные органы релейной защиты и контроль за исправностью цифровых защит

По аналогии с электромеханическими и электронными устройствами релейной защиты в цифровых защитах также выделяются измерительные органы. Однако, если в «классической» релейной защите под термином измерительный орган понималось отдельное реле, то в цифровой релейной защите измерительные органы являются виртуальными, так как отдельно конструктивно выделить их из общей конструктивной базы, как правило, не представляется возможным.

Под термином «цифровой измерительный орган» понимается совокупность устройств, осуществляющих преобразование аналоговых сигналов, подведенных к релейной защите, в последовательность чисел и выполняющих операции над указанными числами.

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

Структура цифрового измерительного органа представлена на рисунке 3.1.

Основным элементом цифрового измерительного органа является аналого-цифровой преобразователь, который преобразует непрерывный аналоговый сигнал в последовательность чисел, называемых отсчетами. Процедура преобразования непрерывного сигнала в дискретный называется

дискретизацией сигнала. Каждое число образуется на выходе аналого-цифрового преобразователя через равные промежутки времени, называемые периодом дискретизации.

Аналого-цифровые сигналы от измерительных трансформаторов тока и напряжения, прежде чем пройти процедуру преобразования, должны быть нормированы как по величине, так и по спектру с помощью промежуточных трансформаторов, активных и пассивных аналоговых фильтров. Нормирование связано со схемотехническими особенностями аналого-цифровых преобразователей, а также цифровых фильтров.

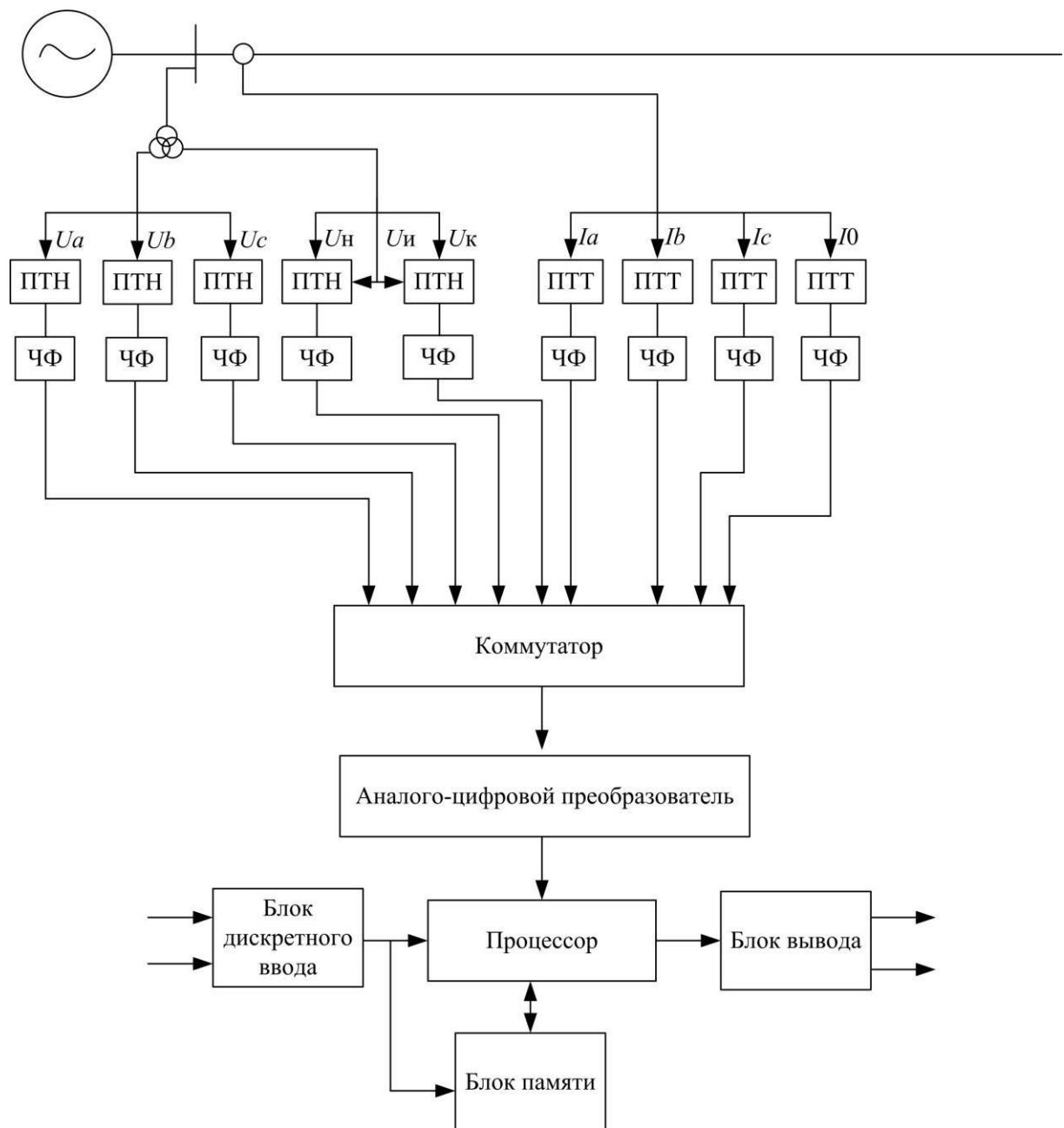


Рисунок 3.1 – Структура цифровых измерительных органов

Как правило, один аналого-цифровой преобразователь осуществляет поочередную выборку мгновенных значений всех аналоговых сигналов с помощью коммутатора (мультиплексора). Коммутатор – ключ, который соединяет общий выход поочередно со всеми имеющимися входами.

Последовательность отсчетов с выхода аналого-цифрового преобразователя поступает в процессор, где с учетом заранее заданного алгоритма, а также текущих условий, задаваемых с помощью устройств ввода дискретной информации, происходит их обработка и на выходе цифрового измерительного органа формируется то или иное управляющее воздействие.

Обобщенная структурная схема цифрового измерительного органа приведена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Обобщенная структурная схема цифрового измерительного органа

Цифровой измерительный орган можно разбить на две части – линейный и нелинейный преобразователи. Линейный преобразователь преобразует входные измеряемые сигналы в последовательности цифровых сигналов. Для этого используются формирователи аналоговых сигналов (например, промежуточные трансформаторы, активные или пассивные аналоговые фильтры и аналого-цифровые преобразователи). Нелинейный преобразователь служит для обеспечения необходимого алгоритма измерения путем обработки цифровых сигналов и содержит цифровой процессор, блоки памяти, интерфейсы входа и выхода для ввода дискретной информации и вывода информации из цифрового измерительного органа.

Структура цифрового измерительного органа во многом условна, так как в зависимости от применяемых способов и средств обработки и ввода сигналов, методов вычислений могут иметься последовательные или параллельные каналы цифровой обработки и соответствующие коммутаторы сигналов, один или несколько взаимосвязанных микропроцессоров для обеспечения функций нескольких цифровых измерительных органов.

Аналого-цифровые преобразователи характеризуются частотой дискретизации, равной обратной величине от периода дискретизации, разрядностью, т. е. количеством разрядов выходного значения аналого-

цифрового преобразователя, представленного в виде двоичного числа, точностью и др.

Частота дискретизации определяется следующим образом:

$$f = \frac{1}{T}$$

где Т – период дискретизации: промежуток времени между отсчетами, образующимися на выходе аналого-цифрового преобразователя.

Как правило, на практике микропроцессорные терминалы в рамках одного канала получают 20 точек на интервале 20 миллисекунд. Таким образом, период дискретизации сигнала одного канала равен 1 миллисекунде, соответственно частота дискретизации сигнала одного канала составляет 1 кГц. При наличии в терминале, например, 11 аналоговых сигналов аналого-цифровой преобразователь должен в течение одной миллисекунды оцифровать мгновенные значения сигналов в 11 каналах. Соответственно, частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя должна быть в 11 раз выше частоты дискретизации сигнала в одном канале. Отсюда получаем значение частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя, равное 11 кГц. Современные аналого-цифровые преобразователи могут работать с частотами порядка мегагерц.

Разрядность аналого-цифрового преобразователя определяет его разрешение, т. е. минимальное изменение величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано данным аналого-цифровым преобразователем.

Разрядность аналого-цифрового преобразователя характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе. Например, двоичный восьми разрядный аналого-цифрового преобразователя способен выдать 256 дискретных значений (0...255), поскольку $2^8 = 256$.

Имеется несколько источников погрешности аналого-цифрового преобразователя. Ошибки квантования и нелинейности присущи любому аналого-цифровому преобразованию. Кроме того, существуют так называемые апертурные ошибки, которые являются следствием дрожания фронта тактового генератора, они проявляются при преобразовании сигнала в целом (а не одного отсчёта).

Ошибки квантования являются следствием ограниченного разрешения аналого-цифрового преобразователя. Этот недостаток не может быть устранён ни в одном типе аналого-цифрового преобразования. Ошибки, связанные с нелинейностью, являются следствием физического несовершенства аналого-цифровых преобразователей. Это приводит к тому, что передаточная характеристика преобразователя отличается от линейной.

В идеальном случае аналого-цифровой преобразователь преобразует отсчеты через равные промежутки времени, однако, в реальности время взятия отсчета подвержено флуктуациям. Следовательно, возникают погрешности оцифровки сигнала, которая носит название апертурной погрешности.

Поскольку аналого-цифровые преобразователи не могут произвести аналого-цифровое преобразование мгновенно, входное аналоговое значение должно удерживаться постоянным, по крайней мере, от начала до конца процесса преобразования. Данная задача решается путём использования специальной схемы на входе аналого-цифрового преобразователя – устройства выборки-хранения (рис. 3.3).

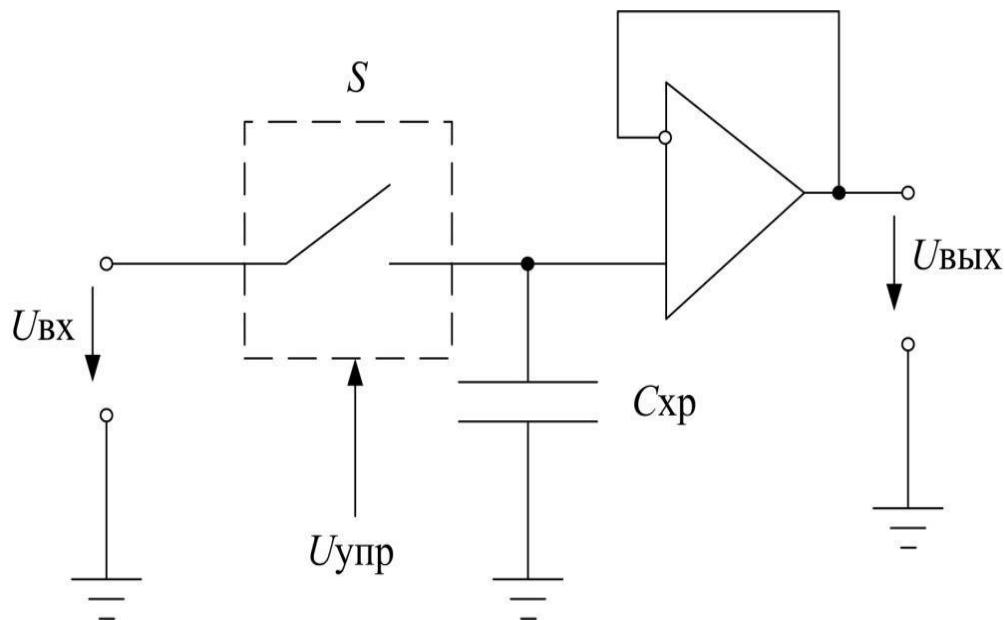


Рисунок 3.3 – Устройство выборки хранения сигнала

Рассмотрим подробнее устройство некоторых видов аналого-цифровых преобразователей, представленных на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Некоторые виды аналого-цифровых преобразователей

Параллельный аналого-цифровой преобразователь

На рисунке 3.5 представлена структурная схема трёхразрядного параллельного аналого-цифрового преобразователя.

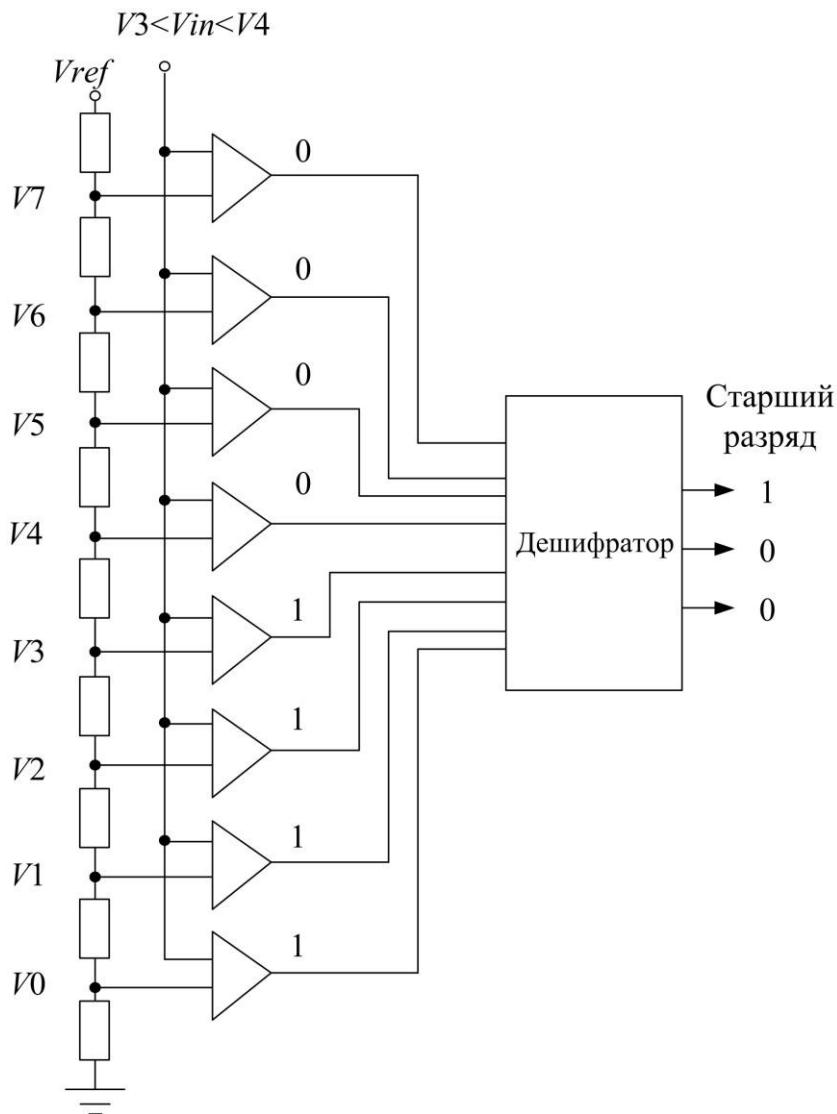


Рисунок 3.5 – Структурная схема трёхразрядного параллельного аналого-цифрового преобразователя

Используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением. Такое опорное напряжение для каждого компаратора формируется на встроенном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда, и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным:

$$\frac{V_{REF}}{2^n},$$

где V_{REF} – величина опорного напряжения; n – число разрядов аналого-цифрового преобразователя.

Таким образом, величина каждого уровня k определяется по формуле:

$$V_{REF} \frac{2k - 1}{2^{n+1}}.$$

Далее дешифратор подсчитывает количество сработавших компараторов и представляет их число в двоичном коде. В таблице 3.1 представлены значения на выходе дешифратора при различном количестве сработавших компараторов для трёхразрядного аналого-цифрового преобразователя.

Данный тип аналого-цифрового преобразователя является быстродействующим, однако из-за наличия большого числа компараторов они достаточно сложны, имеют большое энергопотребление и высокую стоимость.

Таблица 3.1 – Значения на выходе дешифратора при различном количестве сработавших компараторов для трёхразрядного аналого-цифрового преобразователя.

Номер комбинации	Входы								Выходы		
	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	2	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
6	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
7	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
8	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Параллельно-последовательный аналого-цифровой преобразователь
Структурная схема преобразователя представлена на рисунке 3.6.

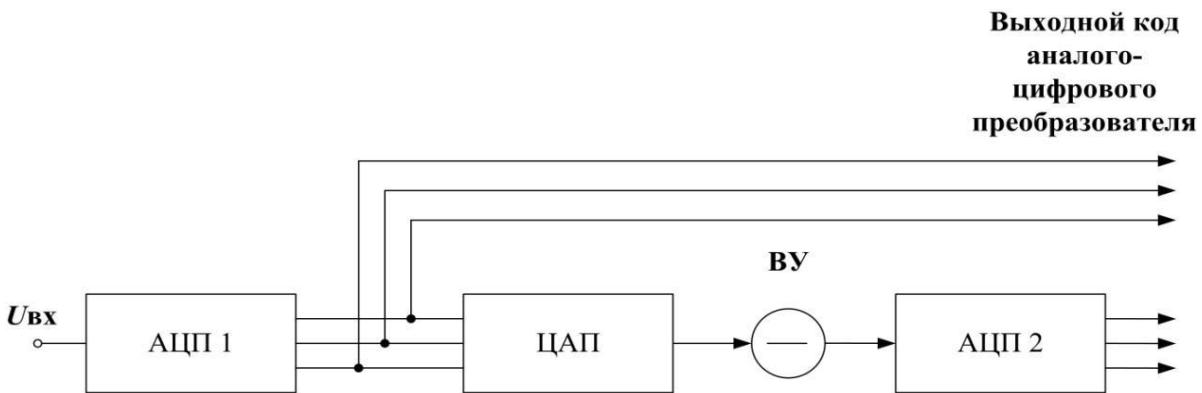


Рисунок 3.6 – Структурная схема параллельно-последовательного аналого-цифрового преобразователя

Параллельно-последовательный аналого-цифровой преобразователь работает в несколько тактов. В первом такте аналого-цифровой преобразователь 1 (согласно рис. 3.6 – АЦП1) преобразует старшие разряды входного напряжения $U_{\text{вх}}$ в цифровой код (разряды $2^3 \dots 2^5$). Во втором такте они преобразуются с помощью ЦАП в напряжение, которое вычитается из входного сигнала в вычитающем устройстве ВУ. В третьем такте АЦП2 преобразует полученную разность в код младших разрядов входного напряжения $U_{\text{вх}}$.

Такие преобразователи характеризуются меньшим быстродействием по сравнению с параллельными, но имеют большую разрядность и меньшее число компараторов. Количество каскадов в таких АЦП может быть увеличено, поэтому они часто называются конвейерными (многокаскадными).

Аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения

Структурная схема преобразователя представлена на рисунке 3.7.

В основе аналого-цифрового преобразователя данного типа лежит специальный регистр последовательного приближения. В начале цикла преобразования все выходы этого регистра устанавливаются в логический 0, за исключением первого (старшего) разряда. Это формирует на выходе внутреннего цифро-аналогового преобразователя сигнал, значение которого равно половине входного диапазона аналого-цифрового преобразователя. А выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе цифро-анalogового преобразователя и измеряемым входным напряжением. Если входное напряжение меньше опорного уровня (сигнала с выхода цифро-аналогового преобразователя), то старший разряд аналого-цифрового преобразователя становится равным нулю, а следующий за ним разряд становится равным единице. Далее снова происходит сравнение измеряемого сигнала с новым опорным напряжением. Процесс сравнения и изменения опорного напряжения повторяется до тех пор, пока не будут сформированы все разряды аналого-цифрового преобразователя.

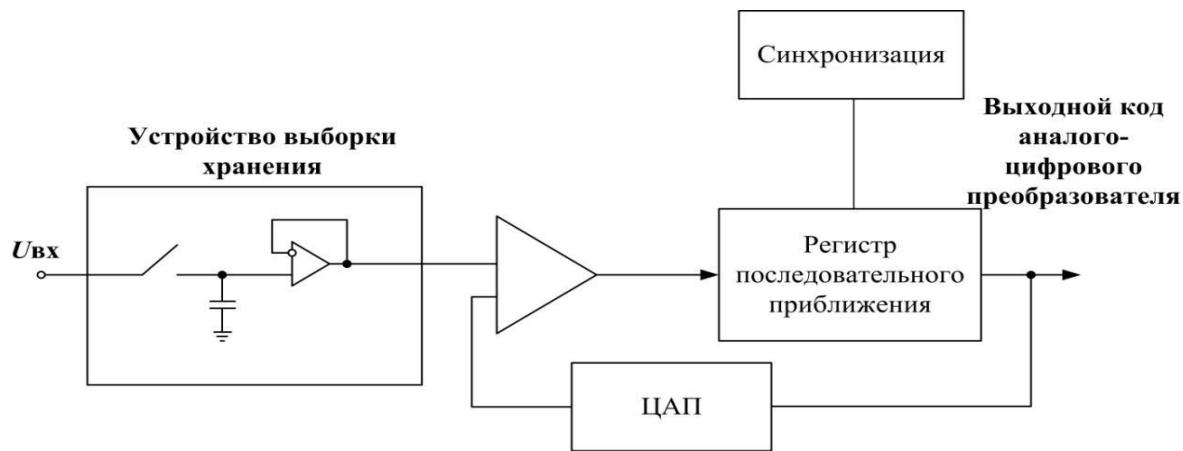


Рисунок 3.7 – Структурная схема аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения

На рисунке 3.8 представлен пример преобразования сигнала с помощью восьмиразрядного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения.

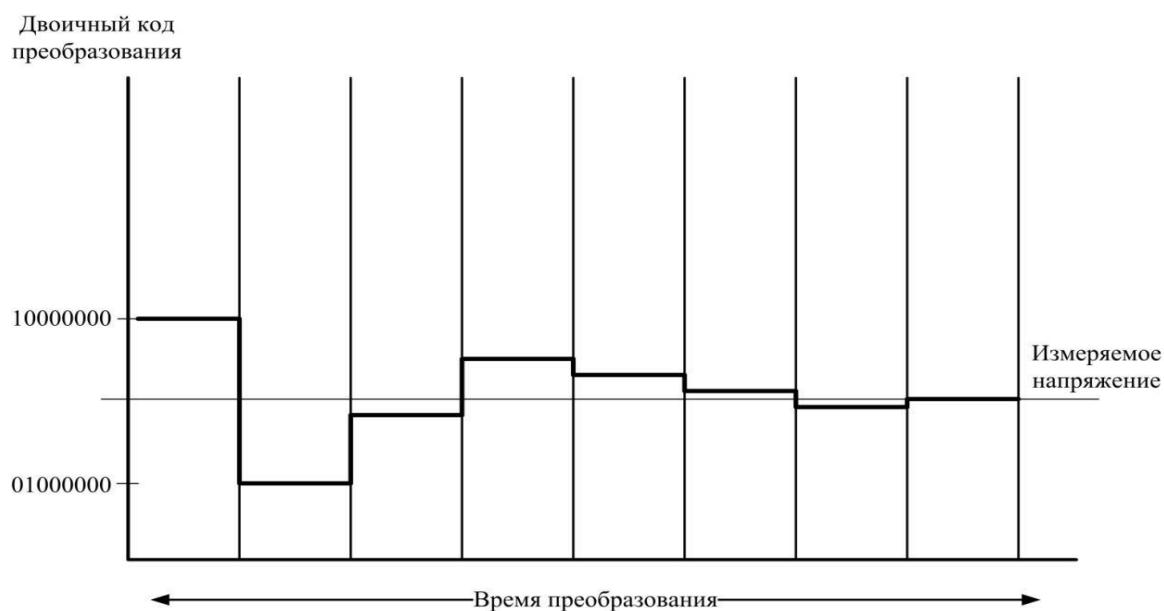


Рисунок 3.8 – Пример преобразования аналогового сигнала восьмиразрядным аналого-цифровым преобразователем последовательного приближения

Аналого-цифровые преобразователи последовательного приближения считаются медленными, однако в настоящее время выпускаются преобразователи с частотой дискретизации 500 кГц (AD7676), 1 МГц (AD7655), 5 МГц (AD7960), что вполне достаточно для оцифровки сигналов одиннадцати каналов с интервалом между отсчетами в 1 миллисекунду.

РАЗДЕЛ 4. ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ

4.1. Максимальные токовые защиты и токовые отсечки.

Принцип действия максимальной токовой защиты

Принцип действия максимальной токовой защиты (МТЗ) основан на использовании реле. Оно устанавливается в начале линии, то есть со стороны генератора либо трансформатора питающей подстанции. Если возникает короткое замыкание, ток в сети увеличивается. При превышении уставки на защищаемой линии сначала срабатывает датчик тока, а за ним с определенной задержкой срабатывает реле времени. При этом выключатель переводится в положение «выключено».

Важно, что:

- отключение происходит не на начальной стадии возрастания тока, а с небольшой задержкой – это необходимо для предотвращения ложных срабатываний, а длительность задержки определяется таким образом, чтобы возрастание тока не повредило защищаемой цепи;
- отключается только зона с поврежденным участком, а не вся сеть;
- после ликвидации причины, вызвавшей размыкание контактов, реле автоматически переводится в исходное положение.

Это простая и эффективная схема, которая предотвращает серьезные повреждения линий электропередач, жил кабелей и шин на подстанциях и устройствах-потребителях, например, на мощных электродвигателях и других электроустановках.

Важная характеристика токовой защиты – селективность, позволяющая избирательно реагировать на разные ситуации. Этим термином обозначают подбор устройств в одной системе, благодаря которому при возникновении короткого замыкания (КЗ) отключение выполняется одним автоматом, который расположен ближе всего к месту, где оно возникло. МТЗ участка, который находится ближе всего к источнику питания, действует с большей выдержкой времени. Величина, на которую отличается выдержка от того же параметра следующего устройства МТЗ, – это ступень селективности.

Отличие от токовой отсечки

Токовая отсечка – еще один метод защиты линий от коротких замыканий. Он выполняет ту же функция, что и токовая защита – отключает линию при перегрузке. Но у него есть важное отличие: в отличие от МТЗ, токовая отсечка при возникновении КЗ отключает напряжение практически мгновенно. Она не предусматривает задержки по времени.

Ключевые достоинства токовой отсечки – простота и надежность. Она позволяет мгновенно обесточить защищаемую цепь в критической ситуации и применяется, в частности, в бытовых электросетях: могут применяться плавкие предохранители или пакетные автоматы. Однако у этого типа защиты есть серьезный недостаток: она срабатывает даже при незначительном по времени

превышении допустимых параметров. Чтобы возобновить подачу электроэнергии, нужно:

- устранить причину отключения;
- включить автомат или заменить предохранитель – для этого потребуется участие человека.

На этот минус можно не обращать внимания, если речь идет о бытовой электросети. Однако при защите разветвленных линий электропередач он будет критичным, поэтому применяется не токовая отсечка, а МТЗ.

Примеры использования защиты

МТЗ позволяет решать следующие задачи:

- защиту электросетей и кратковременных перегрузок;
- локализацию и обезвреживание межфазных коротких замыканий;
- обесточивание трансформаторов тока при возникновении аварийных ситуаций;
- дополнительную защиту при запуске мощного электрооборудования.

Один из бесспорных плюсов защиты максимальной токовой – эффективность при пуске двигателей. В этом случае особенно важна задержка по времени. Дело в том, что на старте происходит существенное увеличение пусковых токов, и защита может отреагировать на это, как на аварийную ситуацию. Но принцип работы МТЗ, как говорилось выше, подразумевает некоторую задержку срабатывания. За счет этого защитное устройство игнорирует кратковременное превышение допустимых параметров тока, причиной которого является пуск или самозапуск электродвигателей. Показатели тока приближаются к норме, причины для аварийного отключения исчезают, поэтому ложного срабатывания не происходит.

Выбор тока срабатывания защиты

Надежность и стабильность работы МТЗ во многом зависят от того, насколько точно настроены параметры тока срабатывания. Реле должно обесточивать цепь в аварийной ситуации, но при этом важно, чтобы на него не влияли параметры тока нагрузки, а также кратковременные всплески, вызванные, например, пуском двигателей.

Среднее значение тока, на которое должно реагировать реле, определяется в соответствии со следующим принципом: минимальный первичный ток, при котором срабатывает защита, должен быть больше предельного значения тока нагрузки.

Ток возврата реле в исходное положение определяется таким образом, чтобы его было достаточно для повторного замыкания контактов. Для этого коэффициент надежности нужно умножить на коэффициент самозапуска и на величину максимального рабочего тока.

Также вводится коэффициент возврата, который рассчитывается следующим образом: ток возврата делится на минимальный первичный ток. Это нужно, чтобы максимально сблизить токи возврата и срабатывания. В идеале коэффициент возврата должен равняться 1. Но на практике добиться этого не получается, поэтому значение будет немного меньше единицы.

Чем выше коэффициент возврата, тем более чувствительной будет защита. Важно, чтобы она была достаточно эффективной, но при этом не вызывала частые неоправданные отключения.

Виды МТЗ

Есть несколько видов максимальной токовой защиты. Выбор между ними определяется условиями, которые необходимо создать для бесперебойной работы электрооборудования.

МТЗ с независимой от тока выдержкой времени. Вне зависимости от перегрузки выдержка времени не меняется, а при определении установки периода, достаточного для активации реле, учитывают ступени селективности.

МТЗ с зависимой от тока выдержкой времени. В этом случае длительность выдержки зависит от величины тока и нескольких других параметров, причем зависимость не является линейной. При расчете обычно ориентируются на принцип «чем больше сила тока, тем быстрее производится отключение». МТЗ этого типа обеспечивает гибкое реагирование на аварийные ситуации и используется в цепях, где возможны опасные перегрузки.

МТЗ с ограниченно зависимой от тока выдержкой времени. Такая защита предполагает две ступени защиты – зависимую и независимую. Она эффективно реагирует как на малое превышение, так и на большой критичный ток.

МТЗ с блокировкой минимального напряжения. Этот вид защиты оптimalен, если нужно предотвратить отключение при пусковых токах. Уставка задается на падение напряжения, реле не будет реагировать на кратковременные резкие скачки тока в сети.

Примеры схем максимальной токовой защиты

Достоинства и недостатки максимальной токовой защиты заметно проявляются при использовании разных схем. В зависимости от того, какую задачу требуется решить, используют двух- и трехфазные схемы МТЗ.

Двухфазная схема может строиться на одном или двух реле. Она используется в тех случаях, когда необходимость в токовой защите есть только при межфазных коротких замыканиях.

Двухфазная схема МТЗ с одним реле

Ее основное достоинство – экономичность. Недостатками являются:

- низкая надежность – МТЗ не будет работать, если единственное реле выйдет из строя;
- меньшая чувствительность по сравнению с системами, в которых используются два реле.

Двухфазная схема МТЗ с двумя реле

Это более экономичный по сравнению с трехфазными схемами вариант. Он обеспечивает защиту от всех межфазных КЗ на линии. Основной минус – более низкая по сравнению с трехфазной схемой чувствительность. Ее можно повысить, если использовать не два, а три реле.

Трехфазная схема МТЗ

Такие системы особенно надежны. Они реагируют на однофазные и межфазные КЗ и могут использоваться в сетях с глухозаземленной нейтралью.

МТЗ – не единственный вид защиты электрических цепей. Бесперебойная работа электросетей обеспечивается за счет использования комплексной защиты, в состав которой также могут входить автоматическая частотная разгрузка, дифференциально-фазная защита и другие решения.

4.2. Токовая цифровая защита, защита от перегрузки и от междуфазных коротких замыканий. Цифровая токовая отсечка

Рассмотрим способ реализации ДЗШ на базе микропроцессорного шкафа ШЭ2607 061 ООО «НПП ЭКРА».

Шкаф ШЭ2607 061 содержит:

- дифференциальный токовый орган с тормозной характеристикой, состоящий из пускового органа (ПО) и избирательных органов первой (ИО1) и второй систем шин (ИО2);
- чувствительный токовый орган (ЧТО);
- реле минимального напряжения, реагирующего на понижение междуфазных напряжений $U_{AB<} \text{ и } U_{BC<}$ для первой и второй систем шин;
- реле максимального напряжения, реагирующего на повышение напряжения $U_{2>}$ для первой и второй систем шин;
- реле контроля исправности токовых цепей, контролирующих исправность дифференциальных цепей ПО, ИО1 и ИО2;
- три индивидуальных комплекта УРОВ для шиносоединительного выключателя (ШСВ) и двух секционных выключателей (СВ1 и СВ2);
- логику «очувствления» ДЗШ;
- логику опробования;
- цепи пуска УРОВ;
- цепи запрета АПВ; – цепи отключения.

Защита выполнена пофазной и содержит пусковой орган (ПО), действующий при КЗ на любой из систем шин, а также избирательные органы первой (ИО1) и второй (ИО2) систем шин, определяющие поврежденную систему шин. Сигнал на отключение поврежденной системы шин появляется только при срабатывании пускового и избирательного органов поврежденной фазы/фаз.

Пусковые органы через промежуточные (входные) датчики тока подключены к измерительным трансформаторам тока всех присоединений обеих систем шин, за исключением трансформаторов тока ШСВ.

Избирательные органы первой (ИО1) и второй (ИО2) систем шин с помощью тех же промежуточных трансформаторов тока подключены к

основным трансформаторам тока присоединений соответственно первой и второй систем шин, включая трансформаторы тока ШСВ.

При срабатывании ПО и ИО1 (ИО2) сигналы отключения действуют на выходные реле, формирующие команды отключения первой (второй) СШ. Для всех присоединений есть возможность их вывода, например, при выводе присоединения в ремонт, при этом программно отключаются выходные цепи.

Структурная схема блока входных токовых цепей ДЗШ приведена на рисунке 4.1.

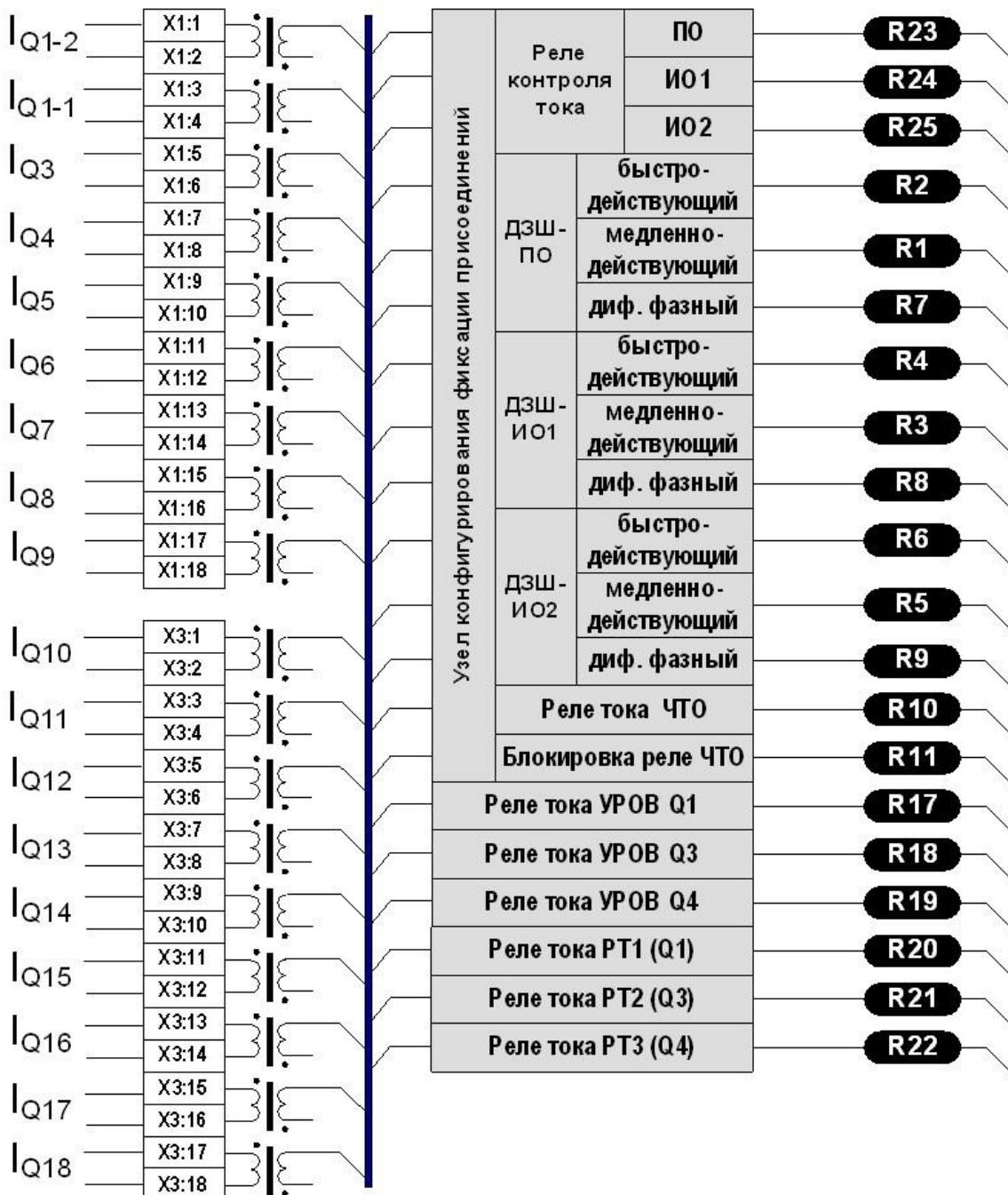


Рисунок 4.1 – Блок входных токовых цепей

На 18 токовых входов терминала подаются фазные токи I_Q всех 17 присоединений защищаемых шин. Фазные токи используются для реализации алгоритма реле ДЗШ-ПО, ДЗШ-ИО1, ДЗШ-ИО2, реле ЧТО, реле тока УРОВ ШСВ, УРОВ СВ1, УРОВ СВ2, реле контроля исправности токовых цепей ПО, ИО1 и ИО2, а также реле тока РТ1, РТ2, РТ3.

Блок входных токовых цепей содержит входные промежуточные датчики тока на каждом защищаемом присоединении.

Первые два входа I_{Q1-2} и I_{Q1-1} рассчитаны на подключение к цепям ТТ шиносоединительного выключателя $Q1$ и попадают только в зону действия избирательных органов (не пускового органа).

Третий и четвертый входы I_{Q3} и I_{Q4} рассчитаны на подключение к ТТ секционных выключателей $Q3$ и $Q4$ и попадают в зону действия как ПО, так и соответствующего ИО.

Пятый вход I_{Q5} рассчитан на подключение к ОВ $Q5$, который в зависимости от положения оперативного переключателя на двери шкафа может быть подключен к ИО1, ИО2 или выведен из работы.

Семнадцатый и восемнадцатый входы I_{Q17} и I_{Q18} могут быть подключены к ИО1, ИО2 или выведены из работы в зависимости от положения переключателей на двери шкафа.

Оставшиеся входы $Q6 \dots Q16$ могут быть подключены к ИО1, ИО2 или выведены из работы в зависимости от положения программных ключей, устанавливаемых программно в терминалах ДЗШ.

По токовым цепям шкаф является проходным. В каждый комплект шкафа через испытательные блоки $SG1-SG18$ заводятся фазные токи I_A , I_B , I_C от измерительных ТТ 17 защищаемых присоединений (рис. 8.2).

К каждому датчику тока подводится отдельный ток присоединения. Такое решение имеет как преимущества, так и недостаток. Преимущества:

1) есть возможность вычислить программно ток торможения. При соединении токов присоединений в дифференциальную цепь вне терминала в качестве тормозного тока берется ток наиболее мощного присоединения, что не всегда является лучшим решением;

2) в терминале есть информация о всех токах, а не только о дифференциальном. Их можно просматривать и осциллографировать.

К недостатку следует отнести большие расходы на прокладку кабеля к каждому присоединению.

От ТН, установленного на защищаемых шинах, к терминалу подводятся два междуфазных напряжения U_{AB} и U_{BC} от каждой СШ (рис. 4.2). Данные напряжения используются для реализации алгоритмов реле минимального напряжения $U_{AB<}$, $U_{BC<}$ и максимального напряжения обратной последовательности $U_{2>}$ для каждой СШ.

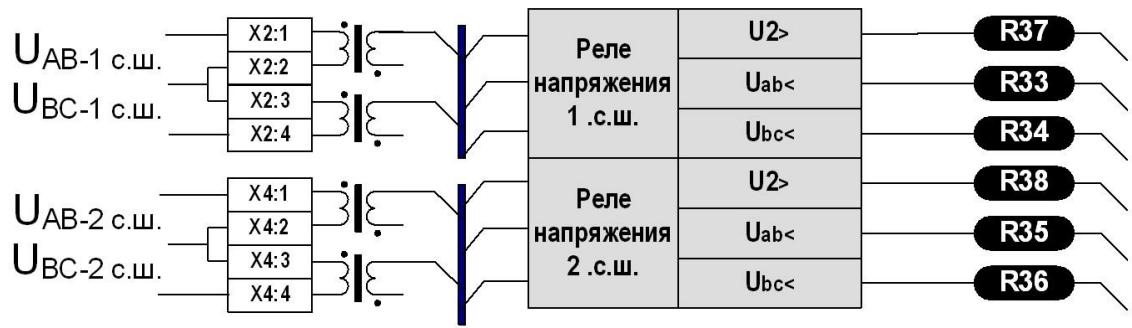


Рисунок 4.2 – Блок входных цепей напряжения

ДЗШ состоит из нескольких функциональных частей:

- формиратореля дифференциального и тормозного сигналов (ФДТС);
- дифференциального органа с торможением;
- быстродействующего органа;
- медленнодействующего органа;
- дифференциально-фазного органа.

РАЗДЕЛ 5. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

5.1. Защита трансформаторов, электрических машин и шин станций и подстанций. Оценка цифровой релейной защиты

Для сборных шин 110 кВ и выше электростанций и подстанций отдельные устройства релейной защиты должны быть предусмотрены:

1) для двух систем шин (двойная система шин, полуторная схема и др.) и одиночной секционированной системы шин;

2) для одиночной несекционированной системы шин, если отключение повреждений на шинах действием защит присоединенных элементов недопустимо по условиям, которые аналогичны приведенным в 3.2.108, или если на линиях, питающих рассматриваемые шины, имеются ответвления.

Для сборных шин 35 кВ электростанций и подстанций отдельные устройства релейной защиты должны быть предусмотрены:

- по условиям, приведенным в 3.2.108;
- для двух систем или секций шин, если при использовании для их разделения защиты, установленной на шиносоединительном (секционном) выключателе, или защит, установленных на элементах, которые питают данные шины, не удовлетворяются требования надежности питания потребителей (с учетом возможностей, обеспечиваемых устройствами АПВ и АВР).

В качестве защиты сборных шин электростанций и подстанций 35 кВ и выше следует предусматривать, как правило, дифференциальную токовую защиту без выдержки времени, охватывающую все элементы, которые присоединены к системе или секции шин. Защита должна осуществляться с применением специальных реле тока, отстроенных от переходных и установившихся токов небаланса (например, реле, включенных через насыщающиеся трансформаторы тока, реле с торможением). При присоединении трансформатора (автотрансформатора) 330 кВ и выше более чем через один выключатель рекомендуется предусматривать дифференциальную токовую защиту ошиновки.

Для двойной системы шин электростанций и подстанций 35 кВ и выше с одним выключателем на присоединенный элемент дифференциальная защита должна быть предусмотрена в исполнении для фиксированного распределения элементов. В защите шин 110 кВ и выше следует предусматривать возможность изменения фиксации при переводе присоединения с одной системы шин на другую на рядах зажимов.

Дифференциальная защита, указанная в 3.2.121 и 3.2.122, должна быть выполнена с устройством контроля исправности вторичных цепей задействованных трансформаторов тока, действующим с выдержкой времени на вывод защиты из работы и на сигнал.

Для секционированных шин 6-10 кВ электростанций должна быть предусмотрена двухступенчатая неполная дифференциальная защита, первая

ступень которой выполнена в виде токовой отсечки по току и напряжению или дистанционной защиты, а вторая – в виде максимальной токовой защиты. Защита должна действовать на отключение питающих элементов и трансформатора собственных нужд.

Если при указанном выполнении второй ступени защиты не обеспечивается требуемая чувствительность при КЗ в конце питаемых реактированных линий (нагрузка на шинах генераторного напряжения большая, выключатели питаемых линий установлены за реакторами), следует выполнять ее в виде отдельных комплектов максимальных токовых защит с пуском или без пуска напряжения, устанавливаемых в цепях реакторов; действие этих комплектов на отключение питающих элементов должно контролироваться дополнительным устройством, срабатывающим при возникновении КЗ. При этом на секционном выключателе должна быть предусмотрена защита (предназначенная для ликвидации повреждений между реактором и выключателем), вводимая в действие при отключении этого выключателя.

При выделении части питающих элементов на резервную систему шин должна быть предусмотрена неполная дифференциальная защита шин в исполнении для фиксированного распределения элементов.

Если возможны частые режимы работы с разделением питающих элементов на разные системы шин, допускается предусматривать отдельные дистанционные защиты, устанавливаемые на всех питающих элементах, кроме генераторов.

Для секционированных шин 6-10 кВ электростанций с генераторами мощностью 12 МВт и менее допускается не предусматривать специальную защиту; при этом ликвидация КЗ на шинах должна осуществляться действием максимальных токовых защит генераторов.

Специальные устройства релейной защиты для одиночной секционированной и двойной систем шин 6-10 кВ понижающих подстанций, как правило, не следует предусматривать, а ликвидация КЗ на шинах должна осуществляться действием защит трансформаторов от внешних КЗ и защит, установленных на секционном или шиносоединительном выключателе. В целях повышения чувствительности и ускорения действия защиты шин мощных подстанций допускается применять защиту, включенную на сумму токов питающих элементов. При наличии реакторов на линиях, отходящих от шин подстанций, допускается защиту шин выполнять по аналогии с защитой шин электростанций.

При наличии трансформаторов тока, встроенных в выключатели, для дифференциальной защиты шин и для защит присоединений, отходящих от этих шин, должны быть использованы трансформаторы тока, размещенные с разных сторон выключателя, чтобы повреждения в выключателе входили в зоны действия этих защит.

Если выключатели не имеют встроенных трансформаторов тока, то в целях экономии следует предусматривать выносные трансформаторы тока только с

одной стороны выключателя и устанавливать их по возможности так, чтобы выключатели входили в зону действия дифференциальной защиты шин.

При этом в защите двойной системы шин с фиксированным распределением элементов должно быть предусмотрено использование двух сердечников трансформаторов тока в цепи шиноединительного выключателя.

При применении отдельных дистанционных защит в качестве защиты шин трансформаторы тока этих защит в цепи секционного выключателя должны быть установлены между секцией шин и реактором.

Защиту шин следует выполнять так, чтобы при опробовании поврежденной системы или секции шин обеспечивалось селективное отключение системы (секции) без выдержки времени.

На обходном выключателе 110 кВ и выше при наличии шиноединительного (секционного) выключателя должны быть предусмотрены защиты (используемые при проверке и ремонте защиты, выключателя и трансформаторов тока любого из элементов, присоединенных к шинам);

- трехступенчатая дистанционная защита и токовая отсечка от многофазных КЗ;
- четырехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности от замыкания на землю.
- При этом на шиноединительном (секционном) выключателе должны быть предусмотрены защиты (используемые для разделения систем или секций шин при отсутствии УРОВ или выведении его или защиты шин из действия, а также для повышения эффективности дальнего резервирования):
- двухступенчатая токовая защита от многофазных КЗ;
- трехступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю.

Допускается установка более сложных защит на шиноединительном (секционном) выключателе, если это требуется для повышения эффективности дальнего резервирования.

На шиноединительном (секционном) выключателе 110 кВ и выше, предназначенному и для выполнения функции обходного выключателя, должны быть предусмотрены те же защиты, что на обходном и шиноединительном (секционном) выключателях при их раздельном исполнении.

Рекомендуется предусматривать перевод основных быстродействующих защит линий 110 кВ и выше на обходной выключатель.

На шиноединительном (секционном) выключателе 3-35 кВ должна быть предусмотрена двухступенчатая токовая защита от многофазных КЗ.

Отдельную панель защиты, предназначенную специально для использования вместо выводимой на проверку защиты линии, следует предусматривать при схемах электрических соединений, в которых отсутствует обходной выключатель (например, четырехугольник, полуторная схема и т. п.);

такую отдельную панель защиты следует предусматривать для линий 220 кВ, не имеющих отдельной основной защиты; для линий 330-500 кВ.

Допускается предусматривать отдельную панель защиты для линий 110 кВ, не имеющих отдельной основной защиты, при схемах электрических соединений «мостик» с выключателями в цепях линий и «многоугольник», если при проверке защиты линии ликвидировать повреждения на ней в соответствии с предъявляемыми требованиями более простыми средствами технически невозможно.

Токовая защита обратной последовательности предназначена для защиты генератора от внешних несимметричных коротких замыканий и перегрузок.

Задача содержит фильтр тока обратной последовательности, орган с интегральной зависимостью характеристики выдержки времени, два органа (возможно наличие только одного органа) с независимой от тока выдержкой времени (отсечки) и сигнальный орган, также имеющий независимую выдержку времени. Кроме того, имеется пусковой орган для интегрального органа.

Интегральный орган предназначен для защиты генератора от перегрузки током обратной последовательности, а отсечки – для использования в качестве резервной защиты от несимметричных коротких замыканий, более чувствительная отсечка I – для дальнего резервирования, а более грубая отсечка II – для ближнего резервирования.

Функционально-логическая схема защиты представлена на рисунке 5.1.

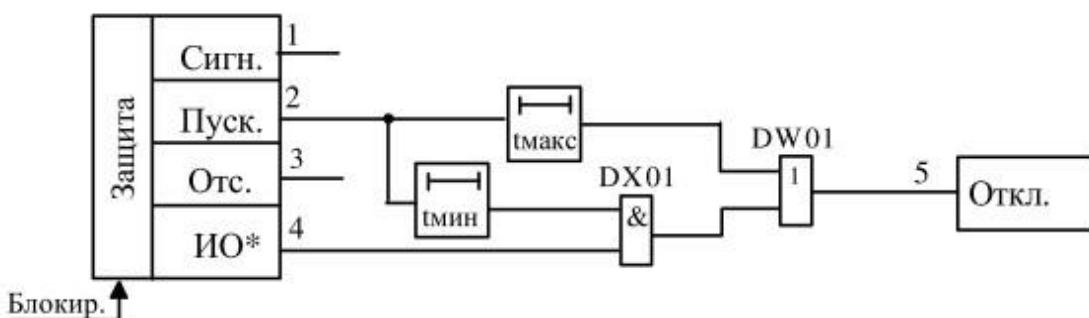


Рисунок 5.1 – Функционально-логическая схема защиты обратной последовательности

Интегральный орган имеет характеристику выдержки времени, соответствующую выражению:

$$t = A \cdot I_{22} = A \cdot \left(\frac{I_2}{I_{\text{ном}}} \right),$$

где А – допустимая длительность тока обратной последовательности в обмотке статора, равного номинальному току [59]; I_{22} – относительное значение тока обратной последовательности (отношение $\frac{I_2}{I_{\text{ном}}}$).

Характеристика, описываемая вышеуказанным выражением, представлена на рисунке 5.2.

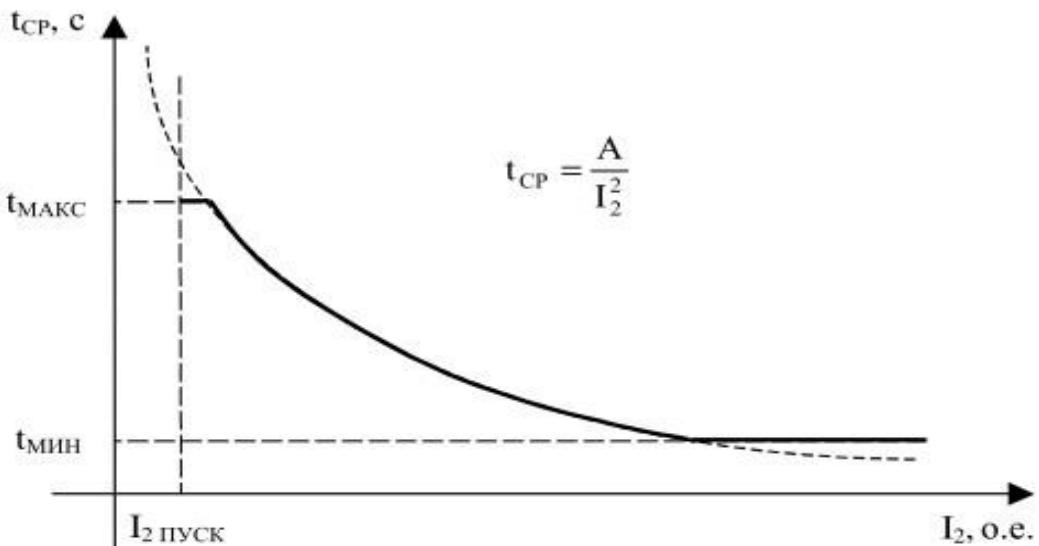


Рисунок 5.2 – Характеристика срабатывания интегрального органа

При появлении перегрузки генератора током обратной последовательности срабатывает пусковой орган и запускается интегральный орган. Если перегрузка присутствует в течение времени, достаточного для действия интегрального органа, произойдет отключение генератора. Если перегрузка пропадает через некоторое время, недостаточное для действия интегрального органа на отключение, и появляется вновь, защита будет действовать на отключение генератора с учетом его нагрева в предыдущую перегрузку, а также с учетом охлаждения генератора при отсутствии перегрузки.

Таким образом, при повторной перегрузке через небольшой интервал времени интегральный орган сработает с меньшей выдержкой времени, чем после полного охлаждения генератора. Если интегральный орган подействует на отключение генератора, то импульс отключения с выходных реле токовой защиты обратной последовательности будет снят через время равное времени полного охлаждения ротора генератора.

Максимальное и минимальное допустимое время существования перегрузки дополнительно ограничивается уставками t_{min} и t_{max} (рис. 5.2).

Защита от повышения напряжения

Защита выполняется на реле напряжения максимального действия. По цепям напряжения защита подключается к трансформатору напряжения, установленному со стороны линейных выводов генератора.

Защита не имеет выдержки времени ($C_{раб_t} = 0$ на рисунке 5.3) и может действовать только на холостом ходу генератора (на гашение поля). При работе генератора на нагрузку она автоматически выводится из действия с помощью трёхфазных токовых реле, размыкающих свой контакты при появлении тока и устанавливаемых для использования в схемах УРОВ с целью контроля тока в выключателях.

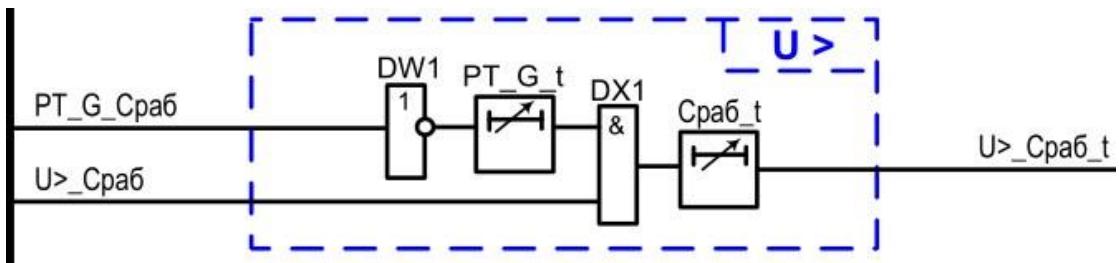


Рисунок 5.3 – Функционально-логическая схема защиты от повышения напряжения генератора.

При переходе генератора блока в режим холостого хода защита автоматически вводится в действие с выдержкой времени около 3 с (PT_G_t на рисунке 5.3), перекрывающей длительность кратковременного повышения напряжения на генераторе при его отключении от сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии релейной защиты и автоматики, основанные на микропроцессорных решениях и цифровых алгоритмах, становятся основой для построения надёжных, безопасных и эффективных энергосистем. Их внедрение не только повышает точность и скорость реагирования на аварийные ситуации, но и открывает новые возможности для оптимизации управления энергетическими объектами. Развитие этих технологий требует от специалистов постоянного обновления знаний и навыков, что делает актуальным создание методических материалов, объединяющих теорию, практику и анализ последних тенденций.

Данный текст лекций систематизирует ключевые аспекты проектирования, эксплуатации и модернизации систем релейной защиты, уделяя особое внимание интеграции новых устройств в существующую инфраструктуру. Теоретические основы, дополненные практическими рекомендациями, примерами расчётов и обзором нормативных требований, позволяют читателю не только освоить принципы работы современных систем, но и развить навыки их адаптации к конкретным условиям. Особый акцент сделан на методах диагностики, анализе данных и выборе оптимальных решений, что критически важно для минимизации рисков в энергетике.

Материалы лекций ориентированы на формирование компетенций, необходимых для работы в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли. Они призваны помочь студентам, инженерам и исследователям глубже понять взаимосвязь технологий, стандартов и практических задач.

Успешное внедрение инноваций в релейную защиту и автоматику возможно только при условии непрерывного обучения и обмена опытом. Надеемся, что это пособие станет надёжным ориентиром в мире современных технологий, способствуя повышению квалификации специалистов и укреплению безопасности энергетических систем будущего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шацков, Ю. Л. Векторные диаграммы в релейной защите и автоматике / Ю.Л. Шацков, С. В. Каргин. – М.: Энергопрогресс, 2008. – 80 с.
2. Коковин, В. Е. Фильтры симметричных составляющих в релейной защите / В. Е. Коковин. – М.: Энергия, 1968. – 88 с.
3. Линт, Г. Э. Симметричные составляющие в релейной защите / Г. Э. Линт. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 160 с.
4. Елфимов, В. М. Векторные диаграммы в релейной защите / В. М. Ефимов. – М.: Энергия, 1967. – 72 с.
5. Мусаэлян, Э. С. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций / Э. С. Мусаэлян. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 384 с.
6. Шабад, М. А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетная проверки. Конспект лекций / М. А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – 64 с.
7. Вавин, В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи / В. Н. Вавин. – М.: Энергия, 1977. – 104 с.
8. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов В. А. Семёнов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
9. Гуртовец, А. Л. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики / А. Л. Гуртовец // Новости электротехники. – 2009. – № 5(59).
10. Ураксеев, М. А. Современные измерительные трансформаторы / М. А. Ураксеев, А. Л. Хотеев // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. – 2012. – № 3(19).
11. Прохоров, А. М. Физика. Большой энциклопедический словарь / А. М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1998. – 952 с.
12. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
13. Шмурьев, В. Я. Цифровые реле защиты / В. Я. Шмурьев. – М.: Энергопрогресс, 1999. – 56 с.
14. Оппенгейм, А. В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
15. Никитин, А. А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле / А. А. Никитин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 240 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
Построение релейной защиты

1. Что включает в себя электроэнергетическая система (ЭЭС) и каковы её основные компоненты?
2. Назовите основные средства противоаварийной защиты, применяемые в ЭЭС, и объясните назначение автоматической частотной разгрузки (АЧР) и автоматического ограничения снижения напряжения (АОСН).
3. Каковы основные причины повреждения изоляции в энергосистемах и как «человеческий фактор» влияет на возникновение аварий?
4. Чем отличается симметричное короткое замыкание от несимметричного? Приведите примеры каждого типа.
5. Для чего используется метод симметричных составляющих при расчёте коротких замыканий? Опишите принцип его работы.
6. Какие последствия для электрооборудования возникают при длительной перегрузке или неполнофазном режиме работы?
7. Почему трёхфазное короткое замыкание считается наиболее опасным? Объясните с точки зрения параметров системы.
8. Как межвитковое короткое замыкание в асинхронном двигателе влияет на его работу и почему эту неисправность трудно обнаружить на ранней стадии?
9. Что такое селективность релейной защиты? Сравните защиты с абсолютной и относительной селективностью.
10. Какие требования предъявляются к быстродействию релейной защиты для линий электропередачи высокого напряжения (500 кВ и 750 кВ)? Объясните, как быстрое отключение повреждений повышает устойчивость энергосистемы.

Основные элементы цифровой релейной защиты

1. Какие основные компоненты входят в структурную схему цифрового устройства релейной защиты (согласно рисунку 2.1) и какую функцию выполняет микропроцессор?
2. Почему в сложных устройствах релейной защиты используется несколько микропроцессоров? Как это влияет на быстродействие системы?
3. Чем отличаются входные преобразователи аналоговых и логических сигналов? Какие проблемы возникают при работе с сигналами от традиционных датчиков тока и напряжения?
4. Для чего в цифровых устройствах РЗА применяются мультиплексор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП)? Как происходит обработка сигналов в тракте АЦП?
5. Почему в выходных преобразователях цифровых устройств до сих пор используются электромагнитные реле? Каковы их преимущества и ограничения?

6. Какие типы памяти применяются в цифровых устройствах РЗА и чем отличаются ПЗУ, ОЗУ и ППЗУ? Почему ППЗУ стало важным для современных реле?
7. Сравните интерфейсы RS232 и RS485. В чем их ключевые различия по скорости, дальности связи и области применения в РЗА?
8. Какие три группы устройств РЗА выделяются по элементной базе? Назовите их основные достоинства и недостатки.
9. Как работает «время-импульсный принцип» в устройствах РЗА на интегральных микросхемах? Почему он улучшает коэффициент возврата по сравнению с электромеханическими реле?
10. Какие преимущества цифровых РЗА позволяют реализовывать сложные алгоритмы защиты, например, для расчета сопротивлений или ликвидации асинхронных режимов?

Основы измерительных трансформаторов и цифровых преобразователей в релейной защите

1. Как классифицируются трансформаторы тока по конструкции и роду установки? Назовите примеры обозначений (например, ТФН, ТШЛ).
2. Чем отличается класс точности 0,5 трансформатора тока от класса 3?
3. Где применяются трансформаторы каждого из этих классов? Что характеризуют электродинамическая и термическая стойкость трансформаторов тока?
4. Каковы основные различия между трансформаторами тока и напряжения по номинальным параметрам (например, вторичные токи/напряжения) и принципу подключения к сети?
5. Опишите структуру цифрового измерительного органа. Какую роль играет мультиплексор в аналого-цифровом преобразователе?
6. Какие источники погрешностей существуют в аналого-цифровых преобразователях? Как апертурная погрешность влияет на точность измерений?
7. Сравните параллельный и последовательно-параллельный АЦП по быстродействию, сложности конструкции и области применения в РЗА.
8. Объясните принцип работы аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения. Чем обусловлено его умеренное быстродействие?
9. Для чего в цифровых измерительных органах применяется устройство выборки-хранения? Как оно влияет на точность преобразования сигналов?
10. Как использование цифровых измерительных органов улучшает точность и гибкость релейной защиты по сравнению с аналоговыми системами? Приведите примеры алгоритмов, реализуемых в цифровых органах.

Максимальные токовые защиты и токовые отсечки. Токовая цифровая защита, защита от перегрузки и от междуфазных коротких замыканий.

Цифровая токовая отсечка

1. Объясните, почему в максимальной токовой защите (МТЗ) используется задержка срабатывания реле времени? Какие проблемы решает эта задержка?
2. Что означает термин «селективность» в контексте МТЗ? Как обеспечивается селективность (принцип ступенчатой выдержки времени)?
3. В чем заключается основное отличие принципа действия токовой отсечки от максимальной токовой защиты (МТЗ)? Почему это отличие критично для применения в разветвленных сетях?
4. Почему МТЗ более эффективна, чем токовая отсечка, для защиты цепей с мощными электродвигателями при их пуске? Какой принцип МТЗ этому способствует?
5. Каков основной принцип выбора тока срабатывания (уставки) реле МТЗ? Почему важно, чтобы минимальный ток срабатывания превышал максимальный рабочий ток нагрузки?
6. Что такое коэффициент возврата реле в МТЗ? Как его значение влияет на чувствительность и надежность защиты? Почему он всегда меньше 1?
7. Какие существуют основные виды МТЗ в зависимости от характера выдержки времени (независимая, зависимая, ограниченно зависимая)? В чем их ключевые различия и области применения?
8. Назовите основные функциональные органы (блоки), входящие в состав дифференциальной защиты шин (ДЗШ) на базе шкафа ШЭ2607. Какова их основная задача (например, ПО, ИО1, ИО2, ЧТО)?
9. Как цифровая дифференциальная защита шин определяет именно ту систему шин, на которой произошло КЗ? Какие органы (ПО, ИО1, ИО2) и как взаимодействуют для этого?
- 10.Какие преимущества предоставляет реализация ДЗШ с индивидуальными входными датчиками тока для каждого присоединения (по сравнению со схемой, где дифференциальный ток формируется аналогово вне терминала)? Какой главный недостаток у такого подхода?

Особенности защиты основного оборудования энергосистем

1. При каких условиях (напряжение, схема) для сборных шин электростанций и подстанций обязательно предусматривается отдельное устройство релейной защиты?
2. Какой тип защиты является основным для сборных шин 35 кВ и выше? Какие ключевые требования предъявляются к этой защите (выдержка времени, отстройка от небаланса)?

3. Как выполняется двухступенчатая неполная дифференциальная защита для секционированных шин 6-10 кВ электростанций? Что входит в первую и вторую ступени, и на что они действуют?
4. Что означает «исполнение для фиксированного распределения элементов» в дифференциальной защите двойной системы шин? Как решается проблема перевода присоединений между системами шин в защите шин 110 кВ и выше?
5. Почему в дифференциальной защите шин обязательно требуется устройство контроля исправности вторичных цепей ТТ? Каковы его действия?
6. Какие защиты обязательно должны быть предусмотрены на обходном выключателе 110 кВ и выше? Укажите типы защит от разных видов КЗ, и для чего они предназначены.
7. Какие защиты устанавливаются на шиносоединительном (секционном) выключателе 110 кВ и выше и для каких целей они используются (помимо своего основного назначения)?
8. Как работает токовая защита обратной последовательности генератора? Опишите назначение интегрального органа, отсечек (I и II) и принцип учета «истории» перегрузки (нагрева/охлаждения).
9. Как реализована защита генератора от повышения напряжения? Почему она действует только на холостом ходу и как обеспечивается ее автоматическое введение/выведение при изменении режима работы генератора?
10. Исходя из описаний защиты шин и генераторов, какие преимущества цифровой релейной защиты можно выделить по сравнению с традиционными аналоговыми схемами?