

# Разработка типовых решений и профилей информационной модели релейной защиты и сетевой автоматики (СИМ). Применение модели для сопровождения жизненного цикла устройств защиты и автоматики

**А.А. Горчаков**, руководитель научно-методического отдела ООО «ИЦ «ЭПА»

**Д.К. Доминевский**, начальник отдела РЗ и ПА ООО «ИЦ «ЭПА»

**И.Г. Ганджаев**, старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

**А.С. Лифшиц**, к.т.н., старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

**А.Ю. Мурзин**, к.т.н., доцент кафедры электрических систем, декан, ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

С развитием технологий, повышением уровня автоматизации и внедрением новых типов современного оборудования растут требования к уровню подготовки эксплуатирующего персонала и затраты на обслуживание. Для надёжного функционирования любого предприятия задача организации качественного технического обслуживания (ТО) с использованием новых цифровых технологий выходит на первый план. Оборудование, средства измерения, системы автоматизации – всё это активы предприятия, имеющие свой жизненный цикл. Другой важной задачей является контроль жизненного цикла активов.



**Д**ля правильной и эффективной организации работ по обслуживанию технологических систем и оборудования важно иметь оперативную и достоверную информацию о состоянии активов. Для небольшого предприятия обычно это не является фундаментальной проблемой, но если речь идёт о крупном генерирующем объекте, сетевой компании, промышленном предприятии с несколькими филиалами, то вопрос учёта активов и оценка их состояния превращается в отдельную задачу.

В условиях, когда на рынке представлено множество производителей оборудования, проектных и наладочных организаций, контролировать весь жизненный цикл активов возможно только с использованием специализированных программных комплексов. Системы автоматизации в части управления активами создавались и ранее. Многолетний опыт внедрения подобных систем показывает, что наряду с успешным решением отдельных частных задач с ростом количества активов и самих автоматизированных систем часто наблюдается обратный эффект — затраты предприятия на обслуживание информационных систем становятся соизмеримы с затратами на обслуживание активов, при этом качество обслуживания не повышается или повышается незначительно. Основные причины в следующем:

- автоматизируется только часть задач управления активами;

- внедрение информационных систем многие годы велось разрозненно, в результате системы, как правило, функционируют изолированно друг от друга;
- нет единых правил описания активов, нет единой базы, информация в различных информационных системах структурирована по-разному;
- не определены единые правила взаимодействия между информационными системами, в результате чего затруднён обмен информацией между ними, наблюдается дублирование информации, отсутствует синхронизация.

Для успешного решения задачи управления активами можно сформулировать следующие основные требования для информационной системы управления активами предприятия:

- система должна реализовывать задачи управления активами на всём жизненном

**КОГДА НА РЫНКЕ ПРЕДСТАВЛЕНО МНОЖЕСТВО ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ, ПРОЕКТНЫХ И НАЛАДОЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, КОНТРОЛИРОВАТЬ ВЕСЬ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ АКТИВОВ ВОЗМОЖНО ТОЛЬКО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ.**

цикле, начиная с этапа проектирования и заканчивая выводом из эксплуатации;

- для описания активов, построения баз данных должна применяться единая система классификации и кодирования на базе CIM (Common Information Model);
- наличие различных механизмов взаимодействия с другими информационными системами для исключения дублирования основных функций и обеспечения однократного ввода информации;
- обеспечение функций прямого взаимодействия с активами для реализации автоматического сбора и анализа диагностической и аварийной информации;
- наличие в системе встроенных средств для построения масштабируемой распределённой иерархической структуры с одновременным обеспечением требований информационной безопасности.

В ПАО «Россети» функционирует программно-технический комплекс «Эксплуатация» (далее — ПТК «Эксплуатация»), разработанный в рамках НИОКР ПАО «Россети» «Разработка системы автоматической диагностики и повышения эффективности обслуживания устройств РЗА, АСУ ТП и средств измерений ПС». Комплекс базируется на программной информационной платформе NPT Platform производства ГК Энергопром-Автоматизация.

В настоящий момент находится в промышленной эксплу-



атации и выполняет автоматизацию процессов непрерывного, периодического и ситуационного мониторинга на основе данных об устройствах, а также собираемых на уровне ПС сигналов и осциллограмм.

С 2021 г. ГК «Энергопром-Автоматизация» в составе консорциума с «Россети Научно-технический центр» и ООО «АВАСОФТ» ведётся разработка типовых решений и профилей информационной модели релейной защиты и сетевой автоматики (CIM) для обеспечения перехода на обслуживание по техническому состоянию и своевременному выявлению неисправности устройств. Эта

работа также выполняется в рамках НИОКР ПАО «Россети» и расширяет функционал ПТК «Эксплуатация», добавляя в него ряд расчётных модулей, предназначенных для систематизации таких задач как расчёт уставок РЗА, анализ функционирования РЗА, а также оценка состояния РЗА для перехода к обслуживанию оборудования РЗА по фактическому состоянию.

В статье будут рассмотрены подсистемы ПТК «Эксплуатация», которые используются при сопровождении этапов жизненного цикла устройств РЗА (рис. 1).

Подсистемы ПТК «Эксплуатация» объединены в общую информационную сеть. Результаты, полученные при работе одной подсистемы, используются для работы других подсистем. При таком тесном взаимодействии подсистем ПТК «Эксплуатация» выстраивает чёткие цепочки взаимозависящих событий. Например, добавленное в реестр оборудования ПТК «Эксплуатация» устройство РЗА содержит набор функций РЗА, работает подсистема хранения уставок для этих функций. Подсистема расчёта уставок заполняет этот бланк уставок, взаимодействует с подсистемой хранения уставок, и, одновременно с этим, использует данные от подсистем поиска расчётных режимов и расчёта токов короткого замыкания (ТКЗ), которым в свою очередь требуются данные CIM электрической сети. Подсистемы оценки состояния и анализа работы устройства РЗА используют данные подсистемы хранения уставок и ведения технологических нарушений. Результатом работы последних будет формирование задания на проведение ТО по состоянию устройства РЗА.



Рисунок 1. Структурная схема жизненного цикла устройств РЗА с привязкой каждого этапа к подсистемам ПТК «Эксплуатация»

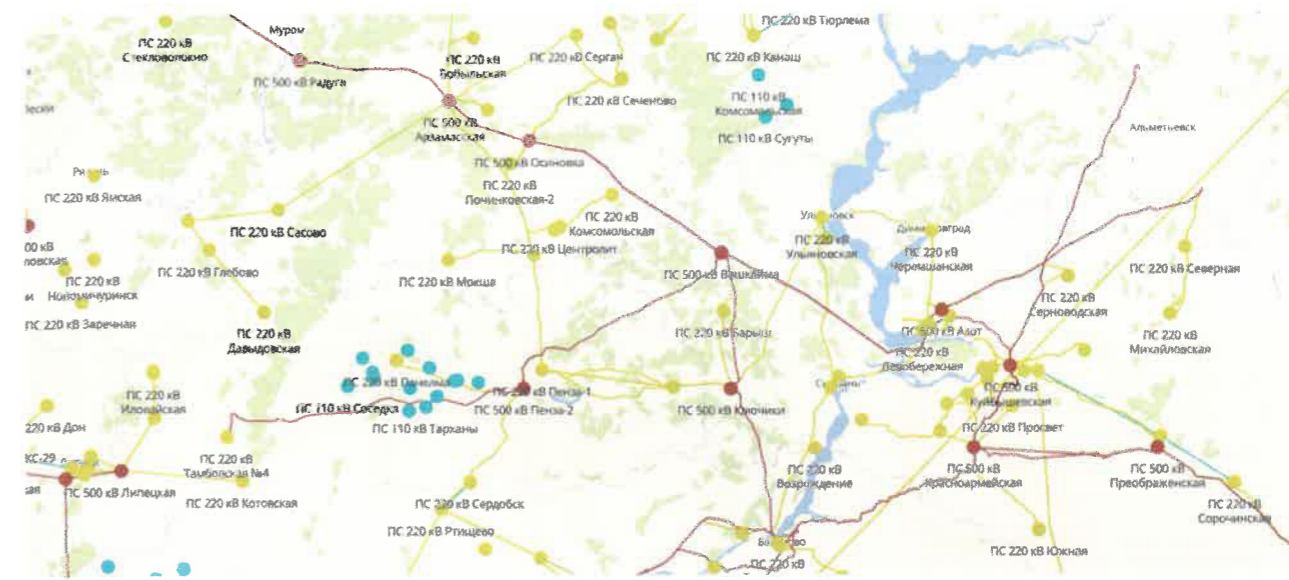


Рисунок 2. Отображение ВЛ на географической карте с привязкой опор к координатам, взятым из GIS

В соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ от 13.07.2020 № 555 допустим переход на ТО по состоянию. В таком случае расходы на проведение ТО устройств РЗА снизятся за счёт предполагаемого снижения объёма проводимых работ с микропроцессорными устройствами (МП) РЗА. Совершить переход на ТО по состоянию устройств РЗА позволяет

использование комплекса подсистем ПТК «Эксплуатация». именно с этим, использует данные от подсистем поиска расчётных режимов и расчёта токов короткого замыкания (ТКЗ), которым в свою очередь требуются данные CIM электрической сети. Подсистемы оценки состояния и анализа работы устройства РЗА используют данные подсистемы хранения уставок и ведения технологических нарушений. Результатом работы последних будет формирование задания на проведение ТО по состоянию устройства РЗА.

использование комплекса подсистем ПТК «Эксплуатация».

### Архитектура ПТК

ПТК «Эксплуатация» базируется на микросервисной архитектуре, включающей в себя ядро ПТК «Эксплуатация» и независимо работающие расчётные модули, обменивающиеся информацией с ядром по стандартизированным протоколам с использованием REST API. Важной задачей, поставленной перед разработчиками, было создание проектов СТО, регламентирующих механизмы информационного взаимодействия ядра ПТК «Эксплуатация» и расчётных модулей с использованием открытых форматов. В рамках этой задачи были разработаны проекты стандартов, описывающих:

1) процедуру и формат предоставления данных производителями для модуля расчёта

параметров срабатывания устройств РЗА;  
2) процедуру и формат предоставления данных производителями для анализа функционирования РЗА;  
3) правила предоставления данных производителями для обслуживания по состоянию.

Внедрение этих стандартов позволяет полностью унифицировать информационный обмен с расчётными модулями, что в свою очередь обеспечивает возможность разработки модулей различными производителями. Использование средств контейнерной виртуализации, на базе открытого стандарта Open Container Initiative (OCI) Specifications обеспечивает максимально быстрый и простой механизм развёртывания разрабатываемых расчётных модулей в ПТК «Эксплуатация».



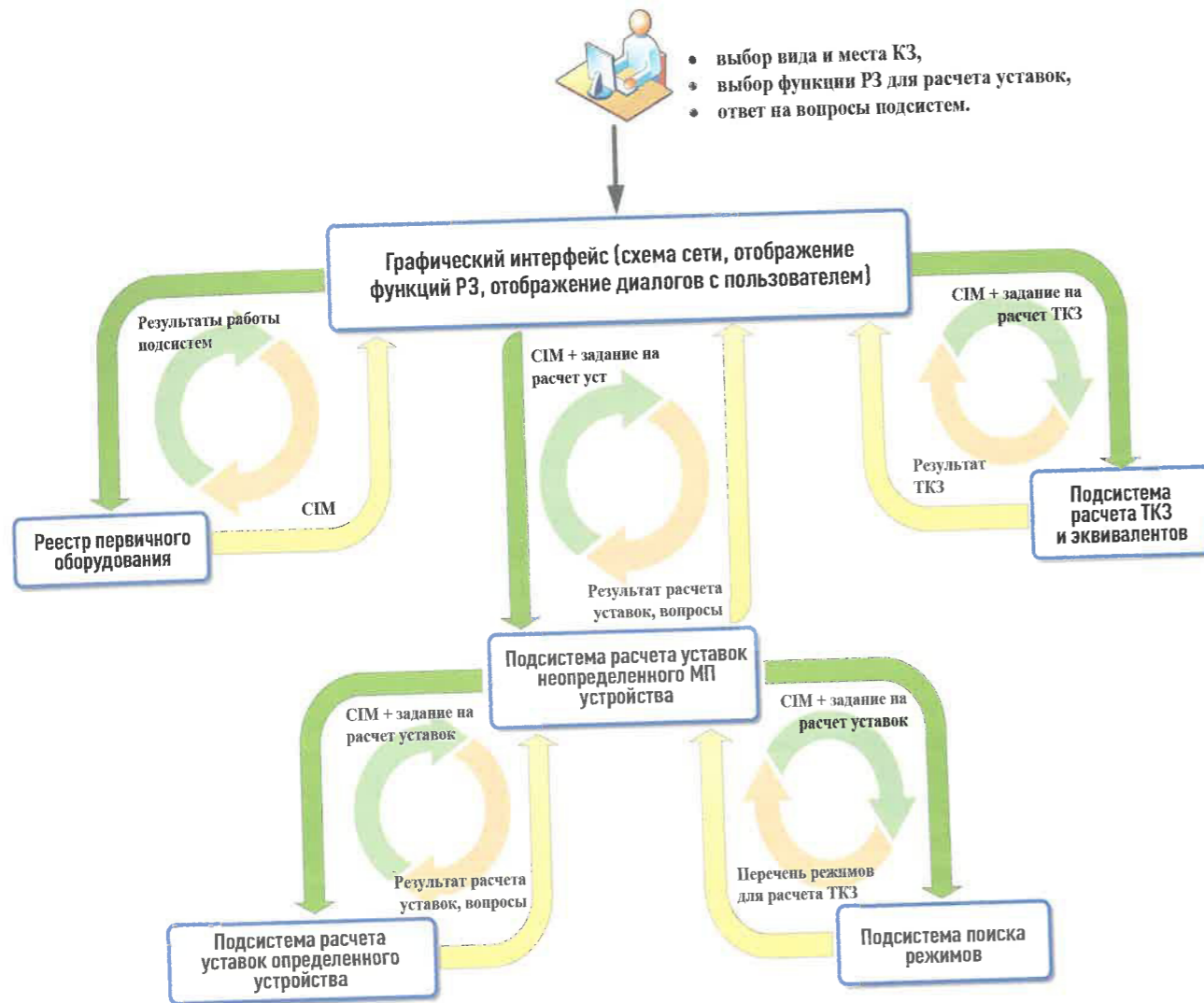


Рисунок 3. Структурная схема части ПТК «Эксплуатация» на этапе жизненного цикла «Пуско-наладка»

Общая информационная модель СИМ

ПТК «Эксплуатация» базируется на общей информационной модели (МЭК 61968/61970 СИМ) с использованием ГОСТ Р 58651 (части 1, 2 и 3) в качестве профиля для описания модели сети первичного энергетического оборудования. Следуя данному ГОСТ, всё первичное оборудование, хранящееся со своими паспортными данными в реестре ПТК «Эксплуатация», описыва-

ется общей информационной моделью. Создавая связи между элементами первичного оборудования подстанций, пользователи ПТК «Эксплуатация» строят схемы сети, описание которых соответствует профилю СИМ.

Одной из задач НИОКР была разработка проекта части ГОСТ Р 58651, посвящённой профилю информационной модели устройств РЗА. Профиль включает классы и атрибуты, взаимосвязи классов для струк-

турирования и описания функций, устройств релейной защиты, привязки функций релейной защиты к схеме сети. Эта задача была выполнена, а полученный профиль СИМ лёг в основу модели данных для обеспечения расчётных задач ПТК.

В итоге, с применением профилей СИМ для первичного и вторичного оборудования в ПТК «Эксплуатация» получена база оборудования в стандартизованном формате с описанием

топологии, точек подключения функций релейной защиты, уставок релейной защиты. Схемы сети в формате СИМ являются исходными данными для модуля расчёта параметров первичного оборудования, расчёта ТКЗ методом фазных координат и эквивалентирования схем, а также для модуля поиска расчётных режимов и расчёта уставок функций релейной защиты.

Решение сопутствующих задач в ПТК «Эксплуатация»

В процессе реализации подсистем был решён ряд нетривиальных задач:

- Интеграция с комплексом СУПА для автоматической выгрузки данных по первичному оборудованию.
- Загрузка в ПТК «Эксплуатация» данных по устройствам и шкафам различных производителей. Для этого на специально организованном сервере выполняется заполнение базы устройств, типовых бланков уставок, типовых карт диагностики представителями ряда производителей устройств РЗА.
- Привязка опор воздушных линий (ВЛ) к географическим координатам, используя данные GIS (рис. 2). Реализована возможность автоматизированного определения коридоров взаимоиндукции с применением данных о положении опор линий.
- Автоматизированное определение сопротивления земли по карте почв с привязкой к координатам опор ВЛ.

Графическое редактирование расчётных электрических схем, в котором удобно и наглядно возможно выполнять расчёты ТКЗ и уставок.

Пользователь ПТК «Эксплуатация» работает со схемой сети и подсистемами расчёта ТКЗ и уставок в графическом интерфейсе. На рис. 3 показана структурная схема части ПТК «Эксплуатация» на этапе жизненного цикла «Пуско-наладка». На рис. 4 представлен пример расчётной схемы в графическом редакторе ПТК «Эксплуатация».

Рассмотрим некоторые подсистемы ПТК «Эксплуатация».

Расчёт токов короткого замыкания методом фазных координат

Уровни токов и напряжений в аварийных режимах требуются для расчёта уставок срабатывания функций релейной защиты.

В ПТК «Эксплуатация» пользователь имеет возможность на схеме, отображаемой в графическом интерфейсе вручную

подготовить режим схемы. Для этого, управляя коммутационными аппаратами, включить или отключить требуемые присоединения на схеме. Настроив режим и выбрав место и вид КЗ, пользователь может рассчитать требуемые аварийные значения токов, как в месте повреждения, так и в любой точке схемы сети.

Помимо ручного задания для подсистемы расчёта ТКЗ, в ПТК «Эксплуатация» предусмотрен автоматизированный режим задания точек и видов КЗ от подсистемы расчёта уставок неопределённого устройства. В этом режиме формируется перечень, требуемых для расчёта уставок выбранной функции РЗ, режимов сети и мест повреждения.

Получив задание в виде расчётной схемы в формате СИМ и параметров места и вида повреждения от пользователя ПТК «Эксплуатация», модуль расчёта ТКЗ производит расчёт аварийных параметров и возвращает их пользователю для отображения на схеме.

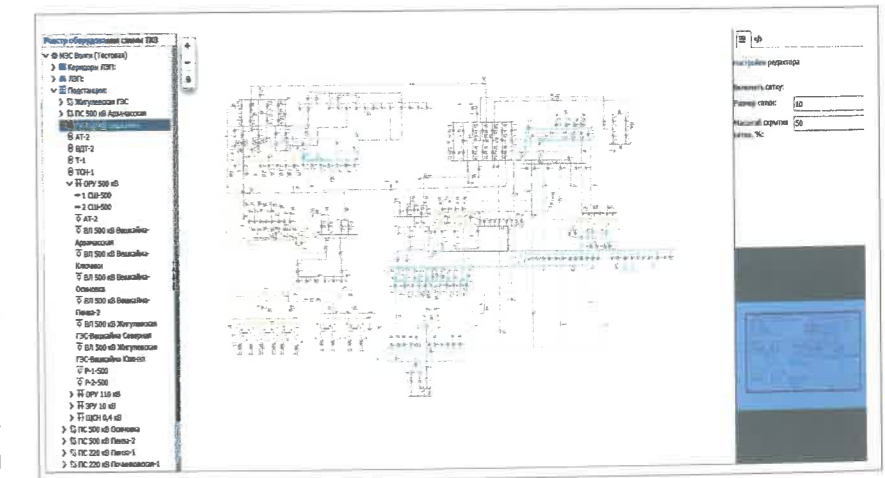


Рисунок 4. Схема сети в графическом редакторе ПТК «Эксплуатация»

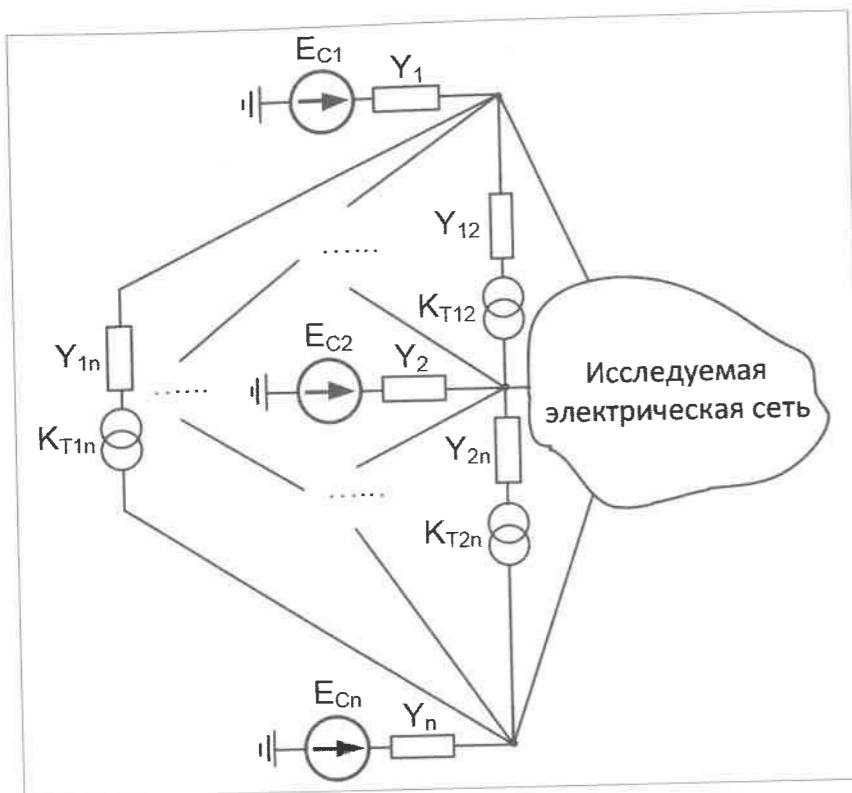


Рисунок 5. Электрическая схема замещения эквивалентной энергосистемы

Подсистема расчёта ТКЗ и эквивалентирования выполняет функции расчёта тока короткого замыкания методом фазных координат, расчёта параметров схемы замещения для первичного оборудования по паспортным данным оборудования и расчёта эквивалентов схемы сети относительно заданных точек.

### Эквивалентирование сети

Для определения режимных параметров требуется обособить рассматриваемый участок от всей остальной сети, что позволит свести указанные выше трудности к наименьшему влиянию. Однако в этом случае возникает вопрос о том, чем же должна быть представлена игнорируемая сеть, чтобы режимные

параметры рассматриваемого участка оставались неизменными. Согласно [2], отбрасываемая часть сети замещается эквивалентами, моделирующими внешнюю электрическую сеть, с их собственными и взаимными параметрами. Такое представление внешней сети позволяет с достоверной точностью получать режимные параметры исследуемого участка.

Абсолютно все существующие алгоритмы эквивалентирования [3–7] основаны на анализе матриц проводимостей и сопротивлений всей сети с последующим удалением групп узлов, относительно которых не производится эквивалентирование. Такие алгоритмы имеют большие задержки при эквивалентировании большой

схемы. Отдельной проблемой является невозможность учёта трансформаторных связей «звезда-треугольник» при эквивалентировании, что связано со сложным несимметричным характером трансформации токов и напряжений разных фаз трансформатора при несимметричных повреждениях.

На основе вышеизложенного решена задача по созданию алгоритма определения параметров эквивалентных энергосистем и их взаимосвязей относительно заданного числа узлов, в котором производится учёт трансформации «звезда-треугольник».

Для исследования несимметричных режимов объекта проектирования применён метод симметричных составляющих [8]. В этом случае эквивалентная энергосистема представляется тремя схемами замещения. Схема замещения прямой последовательности эквивалентной энергосистемы включает в себя совокупность ЭДС за собственными сопротивлениями прямой последовательности. Эквивалентные взаимосвязи представляют собой сопротивления и идеальные трансформации, как показано на рис. 5.

Схема замещения обратной последовательности имеет вид схемы замещения прямой последовательности без источников. Схема замещения нулевой последовательности представляет схему прямой последовательности без источников ЭДС и без элементов, не связанных с «землёй».

Для определения параметров эквивалентов использовано следующее правило: токи в ветвях и напряжения в узлах эквивалентирования должны быть значениям в исходной неэквивалентированной схеме. Такой подход позволяет не анализировать всю схему целиком, а получить эквивалент на основе полученных значений токов и напряжений. Более того, фазовые соотношения между токами при несимметричных повреждениях позволяют получить эквиваленты идеальных трансформаций.

Рассчитанные эквиваленты могут применяться в других схемах сети либо для выполнения текущей схемы с сокращённым количеством отображаемых элементов первичного оборудования сети.

### Сравнение значений расчётных токов КЗ с реальными

Подсистема сравнения расчётных токов КЗ с реальными токами, возникающими при технологических нарушениях, выполняет сравнение токов короткого замыкания, рассчитанных модулем расчёта токов КЗ, с реальными токами, возникающими при возникновении технологических нарушений в одной и той же точке сети. Подсистема выполняет выборку ранее произведённых расчётов или выполняет новый запрос на расчёт токов короткого замыкания в точке КЗ по факту возникновения технологического нарушения и в соответствии с его параметрами. Технологическое

нарушение содержит в себе осциллограммы, которые являются источником данных для определения реальных токов КЗ.

Использование данной подсистемы позволяет проверить правильность теоретически рассчитанных ТКЗ, сравнив их с фактически замеренными значениями токов. Наличие расхождений даст импульс на выяснение причин такого расхождения, среди которых могут быть, как ошибки в схеме сети, так и в не учёте каких-либо параметров или режима схемы сети.

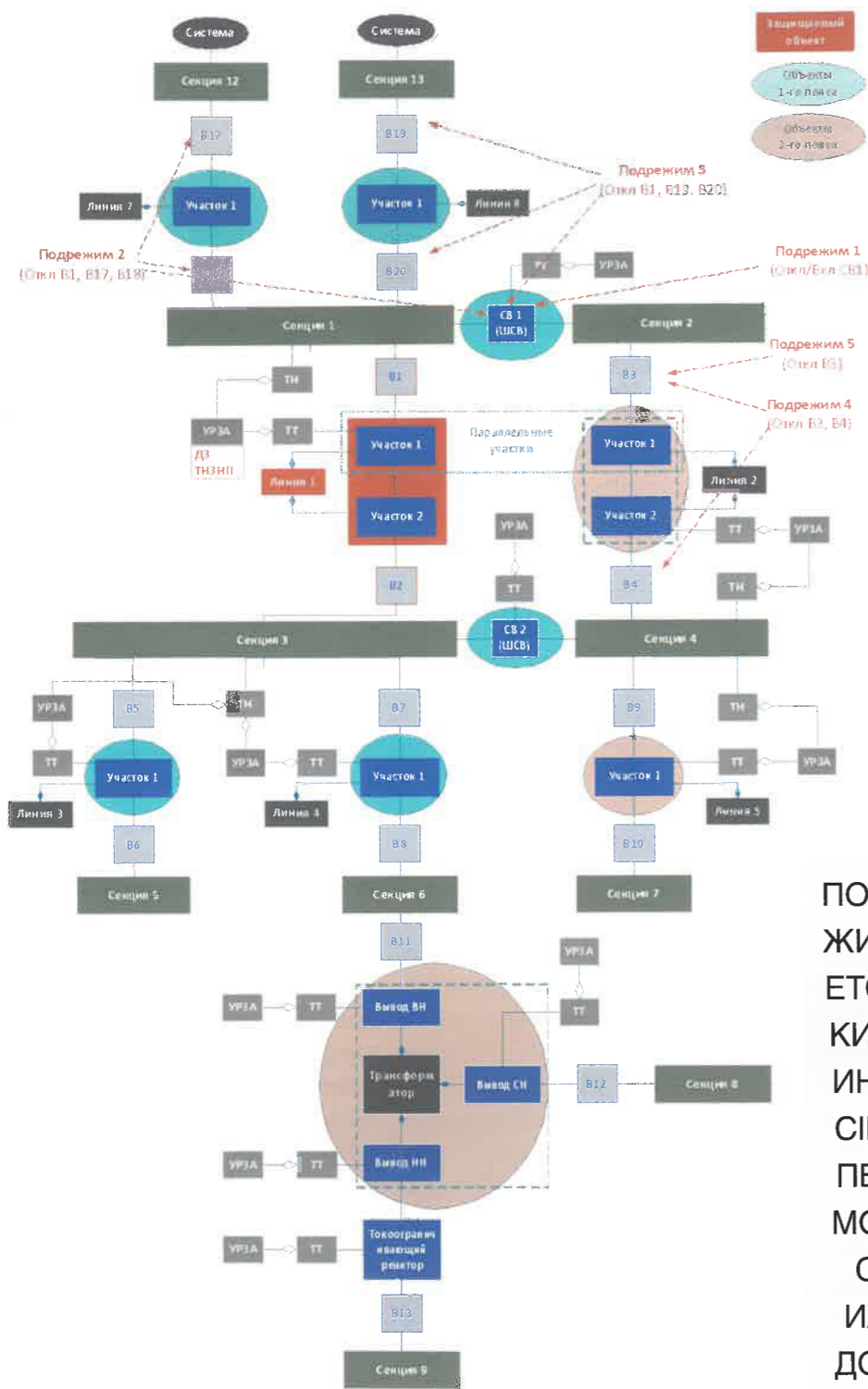
**ПОДСИСТЕМЫ ПТК «ЭКСПЛУАТАЦИЯ» ОБЪЕДИНЕНЫ В ОБЩУЮ ИНФОРМАЦИОННУЮ СЕТЬ. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РАБОТЕ ОДНОЙ ПОДСИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ РАБОТЫ ДРУГИХ ПОДСИСТЕМ. ПРИ ТАКОМ ТЕСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДСИСТЕМ ПТК «ЭКСПЛУАТАЦИЯ» ВЫСТРАИВАЕТ ЧЁТКИЕ ЦЕПОЧКИ ВЗАИМОЗАВИСЯЩИХ СОБЫТИЙ.**

### Автоматический поиск режимов

Выбор места и вида повреждения может быть произведён вручную пользователем ПТК «Эксплуатация» или автоматизировано подсистемой автоматизированного выбора точек КЗ и поиска расчётных режимов, которая активируется после запуска расчёта уставок какой-либо функции релейной защиты. Подсистема автоматизированного выбора точек КЗ и поиска расчётных режимов (ППР) выполняет автоматический выбор мест наблюдения, мест и видов повреждения, мест для расчёта тока качания, режима сети по предоставленной топологии сети и формирование задания на расчёт параметров аварийного режима с указанием условий (подрежимов) для поиска максимальной или минимальной величины искомого параметра аварийного режима в месте наблюдения.

Автоматический выбор мест наблюдения, мест и видов повреждения, мест для расчёта тока качания, режима сети заключается в поиске подсистемой ППР в информационной СИМ модели места наблюдения аварийных параметров при КЗ и места повреждения. Кроме этого, ППР определяет все объекты, связанные с выводами защищаемого объекта со стороны места установки защиты (объекты 1-го пояса относительно места установки защиты), все объекты, выводы которых связаны с объектами 1-го пояса относительно места установки защиты (объекты 2-го пояса относительно





1. Получение задания на поиск подрежимов.
2. Поиск защищаемого объекта в информационной модели.
3. Поиск объектов 1-го и 2-го поясов относительно выводов защищаемого объекта в информационной модели.
4. Поиск выключателей найденных объектов.
5. Учет рабочего положения выключателей.
6. Автоматическое формирование подрежимов путем перебора вариантов режимов с отключением до двух объектов в пределах двух поясов относительно выводов защищаемого объекта.
7. Формирование подрежимов, связанных с выбранной защитой.
8. Дополнение задания на расчет сформированными подрежимами.

ПОИСК НУЖНОГО РЕЖИМА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ АВТОМАТИЧЕСКИ ПО ПОЛУЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИМ МОДЕЛИ ПУТЁМ ПЕРЕБОРА ВСЕВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ ИЛИ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДО ДВУХ ОБЪЕКТОВ ПЕРВИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ДО ДВУХ ПОЯСОВ.

Рисунок 6. Пример автоматического формирования подрежимов ППР

но места установки защиты), все объекты, выводы которых граничат с местом повреждения (объекты 1-го пояса относительно места повреждения) и все объекты, выводы которых связаны с объектами 1-го пояса относительно места повреждения (объекты 2-го пояса относительно места повреждения).

Поиск нужного режима (максимальной или минимальной величины искомого параметра) осуществляется автоматически по полученной информационной СИМ модели (топологии сети) путём перебора всевозможных режимов с отключением или включением до двух объектов первичного оборудования в пределах до двух поясов относительно места установки рассматриваемого устройства РЗА и места повреждения. При поиске режима ППР также учитывается положение РПН трансформаторов. Алгоритмы ППР при формировании режима производят отключение/включение

объектов в зависимости от особенностей расчёта уставок РЗ (например, отключение параллельной линии, параллельного трансформатора). Пример автоматического формирования подрежимов приведён на рис. 6.

В результате своей работы ППР формирует для каждого наблюдаемого параметра аварийного режима массив подрежимов для его определения в подсистеме расчёта токов КЗ с указанием:

- применяемого (-ых) объекта (-ов);
  - действия над объектом (отключение/включение объекта; отключение половины генерации на станциях; применение максимального/минимального режима работы системы; применение среднего/крайнего верхнего/крайнего нижнего положения РПН трансформаторов 1-го пояса).
- В случае неудовлетворения пользователем полученного от

ППР режима предусмотрена возможность задания интересующего условия поиска ручным способом.

### Расчёт уставок неопределённого устройства

После получения запроса от пользователя ПТК «Эксплуатация» на расчёт уставок подсистема расчёта уставок неопределённого устройства (ПРУНУ) считывает информационную модель сети в формате СИМ и формирует задание на поиск расчётных режимов для подсистемы ППР.

Формирование задания на поиск расчётных режимов производится по предусмотренному в подсистеме ПРУНУ массиву искомым параметрам аварийных режимов, необходимых для выбора и проверки чувствительности параметров срабатывания, состав которого зависит от рассчитываемой функции РЗ и выбранного присоединения. В ПРУНУ для каждого вида

Функция	Степень	Пуск	Фактическое срабатывание	Ожидаемое срабатывание
ДЗ ЛЭП 110-220 кВ	ДЗ-фф 1 ступень	Пуск ступени прошёл успешно	Степень сработала верно	Ожидалось срабатывание ступени
	ДЗ-фф 2 ступень	Пуск ступени прошёл успешно	Нет срабатывания	Срабатывание ступени не ожидалось
	ДЗ-фф 3 ступень	Пуск ступени прошёл успешно	Нет срабатывания	Срабатывание ступени не ожидалось
	ДЗ-фф 4 ступень	Пуск ступени прошёл успешно	Нет срабатывания в ступени	Нет срабатывания в ступени
	ДЗ-фф 5 ступень	Нет пуска	Нет срабатывания в ступени	Нет срабатывания в ступени
	ДЗ-фф 6 ступень	Нет пуска	Нет срабатывания	Срабатывание ступени не ожидалось
ДЗ-фз 1 ступень	ДЗ-фз 1 ступень	Нет пуска	Нет срабатывания	Срабатывание ступени не ожидалось
	ДЗ-фз 4 ступень	Не сопоставлен дискретный сигнал	Нет срабатывания в ступени	Нет срабатывания в ступени
	ДЗ-фз 5 ступень	Не сопоставлен дискретный сигнал	Нет срабатывания в ступени	Нет срабатывания в ступени

Рисунок 7. Пример проведения анализа дистанционной защиты ВЛ по направлениям мощностей в момент КЗ

присоединения задаётся набор функций РЗ, массив искомых параметров аварийных режимов, необходимых для выбора и проверки чувствительности параметров срабатывания.

Методики расчёта уставок, применяемые в алгоритмах, соответствуют рекомендациям, приведённым в Руководящих указаниях по релейной защите 1961–1985 гг. [9–12]. Расчёт уставок функций защит неопределённого МП устройства производится ПРУНУ после получения всех исходных данных.

Если в модели данных недостаточно исходной информации для расчёта уставок функции РЗ ПРУНУ ведёт диалог с пользователем ПТК «Эксплуатация», например, при необходимости ввода значения параметра, определяемого пользователем или согласия/несогласия пользователя на то или иное действие.

Результатом работы ПРУНУ является:

- заполненный бланк уставок неопределённого МП устройства РЗА;
- в случае недостаточных исходных данных вопросы пользователю с вариантами ответов;
- список ошибок при невозможности выполнить расчёт.

Перечень уставок бланка определяется нормативными документами заказчика.

### Расчёт уставок определённого устройства

Подсистема расчёта уставок определённого устройства (ПРУОУ) проверяет полноту

исходных данных, хранящихся в базе ПТК «Эксплуатация». Например, проверяется, что в модели сети присутствуют данные по коэффициентам ТТ и ТН, к которым подключено рассматриваемое устройство. Если требуемых данных нет в модели сети пользователю выводятся уточняющие вопросы, получив ответ на которые, подсистема продолжает свою работу. Пользователь ПТК «Эксплуатация» выбирает из справочника производителя устройства РЗ, элементную базу и функцию РЗ, для которой требуется произвести расчёт уставок. Защищаемое оборудование и место расположения на схеме подсистема определяет из модели сети.

Расчёт уставок функций определённого устройства РЗА заключается в пересчёте уставок функций неопределённого МП устройства РЗА выбранного производителя. Поэтому уставки рассматриваемой функции неопределённого МП устройства также должны быть в качестве исходных данных подсистемы.

При пересчёте уставок ПРУОУ использует методики расчёта уставок производителя. ПРУОУ производит адаптацию уставок неопределённого МП устройства для выбранного определённого устройства РЗА.

Результатом работы ПРУОУ является:

- заполненный бланк уставок устройства РЗА выбранного производителя;
- в случае недостаточных исходных данных вопросы

пользователю с вариантами ответов;

- список ошибок при невозможности выполнить пересчёт.

### Хранение уставок

ПТК «Эксплуатация» выполняет хранение как рассчитанных уставок неопределённого устройства РЗА, так и рассчитанных уставок конкретных производителей. Бланки уставок для функций неопределённого устройства хранятся в хронологическом порядке для всех выполненных расчётов. В карточках конкретных устройств также организовано хранение заполненных типовых бланков уставок производителей.

Файлы уставок в стандартизованном формате привязываются к карточкам устройств ПТК «Эксплуатация» и доступны для скачивания и экспорта в смежные системы, например, в ПТК «Приёмка».

Кроме рассчитанных уставок ПТК «Эксплуатация» выполняет хранение выставленных на устройствах РЗА уставок. В качестве данных для хранения используются протоколы наладки, в которых указаны выставленные уставки. Протоколы наладки поступают из смежной системы ПТК «Приёмка» в формате общей информационной модели СИМ в виде субъектов (метаданных) и файлов уставок в стандартизованном формате.

Файлы уставок в стандартизованном формате привязываются к карточкам устройств ПТК «Эксплуатация».

### Оценка состояния устройства РЗА

В качестве метода для оценки состояния устройств используются алгоритмы, построенные на анализе сигналов неисправностей, поступающих от устройства, на анализе фактов правильной и неправильной работы функций РЗ устройств, на анализе случаев нештатной работы устройств такого же вида на других объектах электрической сети.

Производители устройств релейной защиты создают в ПТК «Эксплуатация» для своего оборудования технологические карты. В карте прописывается перечень возможных сигналов неисправностей устройства и степень критичности этих сигналов с учётом частоты возникновения сигналов.

Алгоритм оценки состояния устройства РЗА рассчитывает для каждого устройства индекс технического состояния, основываясь на данных, полученных с учётом технологической карты, данных о работе функций релейной защиты и данных о случаях выхода из строя или неправильной работы других устройств такого же вида. По значению индекса технического состояния подсистема формирует один из 3 статусов для устройства — устройство исправно, требуется проведение ТО или устройство вышло из строя.

Подсистема оценки состояния устройства РЗА для своей работы использует результаты работы подсистемы анализа работы устройства РЗА.

### Анализ работы устройства РЗА

Анализ работы РЗА только с использованием технологии цифровых двойников, при котором система анализа пытается повторить работу устройства сопряжено с рядом сложностей: затраты на ввод уставок и их актуализацию, необходимость учёта всех поколений устройств и вариантов программного обеспечения (прошивок), что требует одновременно поддерживать большое количество программных модулей.

Использование модели сети в формате СИМ позволяет провести анализ более глубоко с учётом топологии сети и записей осциллограмм повреждения в разных точках электрической сети и предложить дополнительные способы анализа, исключая использование уставок. Анализ работы РЗА выполняется с использованием современных технологий, основанных на применении нейронных сетей.

Подсистема включает в себя инструментарий поэтапного обучения анализу осциллограмм, классификации переходных процессов в электрической сети и классификации работы устройств РЗА (правильное срабатывание, ложное срабатывание, допущенное неправильное срабатывание, допущенное несрабатывание, излишнее срабатывание, допущенное неправильное срабатывание, отказ срабатывания).

В качестве материала для обучения используются осциллограммы аварийных процессов,

на основе которых оценку выполнил человек и осциллограммы, полученные путём автоматической модификации реальных осциллограмм с целью формирования большого массива данных для первичного обучения. В процессе анализа подсистема выполняет несколько действий:

- с использованием технологии нейронных сетей в записи осциллограммы определяется наличие нестационарных режимов (насыщение ТТ, бросок тока намагничивания, апериодическая составляющая в токе и другие), которые могли бы повлиять на правильность расчёта первой гармоники устройствами РЗА и обратить на это внимание сотрудников службы РЗА;
- определяется момент возникновения повреждения, вид повреждения;
- проводится экспресс анализ работы РЗ. Анализ включает в себя оценку дискретных сигналов работы функций устройства, проводится сравнение аналоговых каналов, которые записали измерения тока или напряжения для одной точки сети. В случае расхождения измерений делается заключение о возможной неисправности аналоговых цепей;
- используя записи одного повреждения в разных точках электрической сети, определяется повреждённый объект по направлениям перетоков мощностей. На схеме сети определяется элемент, к которому стекаются токи в режиме короткого замыкания;



- формируется перечень функций РЗ, которые с высокой степенью достоверности должны были сработать для селективной локализации повреждения, а также, которые должны были запуститься и начать набирать выдержку времени;
- производится проверка выставленных уставок в устройстве путём прогонки аварийного процесса на виртуальных функциях РЗ.

Для визуализации анализа работы РЗА разработан интерфейс в ПТК «Эксплуатация», в котором каждый этап анализа отображается на своей экранной форме. На рис. 7 приведён пример экранной формы подсистемы анализа работы РЗ.

Проверка выставленных уставок подсистемой анализа работы устройства РЗА выполняется для уставок неопределённого МП устройства РЗА, которые рассчитываются в подсистеме расчёта уставок неопределённого МП устройства.

### Вывод

Использование СИМ в ПТК «Эксплуатация» позволяет структурировать все данные по первичному и вторичному оборудованию, хранящемуся в базе, выстраивать топологию сети, выполнять обмен информацией с внешними системами, поддерживающими формат СИМ. Благодаря поддержке СИМ в ПТК «Эксплуатация» весь жизненный цикл устройств РЗА сопровождается в разработанных подсистемах. Выстроенная топология сети

в формате СИМ позволяет решать задачи, для решения которых ранее не было возможности. Благодаря решению описанных выше задач повышается эффективность бизнес-процессов служб РЗА, АСУ ТП и метрологии.

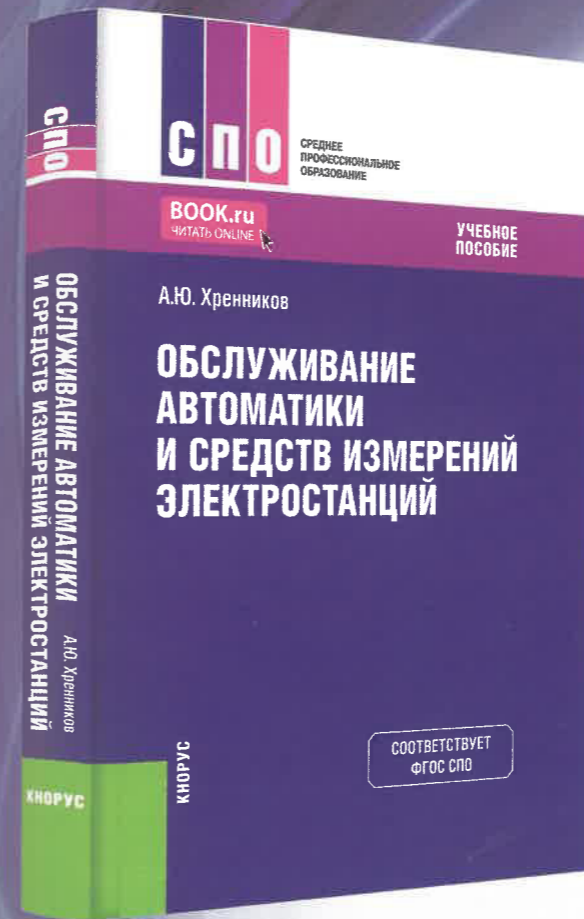
### ЛИТЕРАТУРА

- Баранов, Ю.А. Выбор уставок срабатывания микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики серии «Сириус» для распределительных сетей 6–35 кВ/Ю.А. Баранов. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2013. – 87 с.
- Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем/С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.
- Лямец, Ю.Я. Эквивалентирование имитационных моделей электрических сетей/Ю.Я. Лямец, П.И. Воронов, М.В. Мартынов//Электричество. – 2015. – № 5. – С. 22–29. – EDN TWVQUV.
- Занарюкин, В.П. Построение эквивалентных моделей энергосистем для расчётов несимметричных режимов/В.П. Занарюкин, А.В. Крюков, Е.А. Крюков//Ползуновский вестник. – 2005. – № 4–3. – С. 286–289. – EDN QIVPJF.
- Воронов, П.Л. Эквивалентирование и упрощение сложных электрических систем по частям при моделировании/П.Л. Воронов, В.А. Щедрин//Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 44–55. – EDN TLAMMP.
- Молодцов, В.С. Эквивалентирование распределительных электрических сетей энергосистем/В.С. Молодцов//Известия высших учебных

- заведений. Электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 72–76. – DOI 10.17213/0136–3360–2015–4-72–76. – EDN UIQNJJD.
- Молодцов, В.С. Эквивалентирование сложных электрических сетей энергосистем/В.С. Молодцов, М.В. Молодцов//Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 61–66. – DOI 10.17213/0136–3360–2014–6-61–66. – EDN TGMILD.
- Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники в трех частях/Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа. 1964. – 753 с.
- Руководящие указания по релейной защите. Вып. 2. Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–220 кВ. – М.–Л.: Госэнергоиздат. – 1961. – 64 с. с черт.
- Руководящие указания по релейной защите. Вып. 3. Защита шин 6–220 кВ станций и подстанций. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. с черт. и табл.
- Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7 (дополнение). Дистанционная защита линий 35–330 кВ. Сост. Всесоюз. Гос. Проектно-изыскательским и научно-иссл. ин-том Энергосетьпроект МЭИЗ СССР. – М.: «Энергия». – 1968. – 16 с. с ил.
- Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 10. Высоочастотная блокировка дистанционной и токовой направленной нулевой последовательности защит линий 110–220 кВ. – М.: «Энергия». – 1975. – 76 с. с ил.
- Хренников А.Ю., Точилкин В.Г. Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики. Учебно-методическое пособие для магистратуры/Директ-Медиа – М.: 2021. – 212 с., с ил.

# ОБСЛУЖИВАНИЕ АВТОМАТИКИ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

АЛЕКСАНДР ХРЕННИКОВ



Учебное пособие предназначено для учащихся колледжей по специальностям 13.01.05 «Электромонтер по техническому обслуживанию электростанций и сетей» и 13.01.10 «Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования» (по отраслям).

В рамках 1-й главы рассмотрены вопросы опасности поражения человека электрическим током, Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (действуют с 2021 г.): электробезопасность, причины травматизма, шаговое напряжение, классификация производственных помещений по степени опасности, освобождение пострадавшего и первая помощь при поражении электрическим током, защитное заземление, зануление, защитное отключение, нарядно-допускная система при работе в электроустановках, электрозащитные средства, плакаты и знаки электробезопасности.

В главе 2 представлен учебный материал по электроизмерительным приборам и электрическим измерениям: характеристики средств измерений и погрешности, принцип действия приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, ферродинамической и электростатической систем, электронные счетчики электрической энергии, цифровые измерительные приборы, мультиметры, самопишущие приборы, контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА).

В главе 3 изложены вопросы организации и производства работ при выполнении работ в действующих устройствах РЗА, в цепях вторичной коммутации. Рассмотрены виды и периодичность технического обслуживания (ТО) РЗА и ПА, программы работ, подготовка к проведению работ, подготовка рабочего места (организационные мероприятия), технические мероприятия при проведении работ в устройствах РЗА, большое внимание уделено проверке устройств первичным током и напряжением, снятию векторных диаграмм, объемам испытаний при различных видах ТО, нарушениям, связанным с отказом или неправильной работой УРЗА.

Глава 4 посвящена вопросам технического обслуживания оборудования подстанций напряжением 35–750 кВ: производство и распределение электроэнергии, схемы электроснабжения, схемы распределительных устройств (РУ) электростанций и подстанций, высоковольтное электрооборудование, техника высоких напряжений и испытания электрооборудования, производство оперативных переключений, эксплуатация и ремонт электрооборудования РУ, силовых трансформаторов, синхронных генераторов, предохранители, автоматические выключатели, контакторы и магнитные пускатели.

