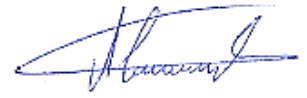


На правах рукописи



СИМАКОВ Александр Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОмИИТ)).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

ХУДОНОГОВ Игорь Анатольевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск;

ПУПИН Валерий Михайлович – доктор технических наук, доцент, управляющий проектами, общество с ограниченной ответственностью «НПК Промир», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 27 июня 2023 г. в 16-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.094.02, созданного на базе Омского государственного технического университета и Омского государственного университета путей сообщения, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д.11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОмГТУ.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (при наличии), просим направлять по адресу диссертационного совета 99.2.094.02: 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11. Тел.: (3812) 65-24-79. E-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Ученый секретарь диссертационного
совета 99.2.094.02,
кандидат технических наук, доцент



О. А. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Преобразование топливно-энергетического комплекса Российской Федерации с внедрением цифровых технологий осуществляется в соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года, указом президента Российской Федерации № 204 от 07 мая 2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и распоряжением Правительства РФ № 3924-Р от 28 декабря 2021 г. «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса» на период до 2030 года.

Особая роль при внедрении цифровых инструментов уделяется электротехническим комплексам релейной защиты и автоматики (РЗА), предназначенным для ликвидации повреждений и аварийных режимов, возникающих в электрооборудовании и электроэнергетических системах.

Важным фактором обеспечения работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов РЗА является система технического обслуживания (ТО), которая может, как повысить эффективность защит за счет своевременного выявления и устранения дефектов, так и снизить – за счет ошибок при выводе и вводе комплексов защиты, выполнения операций ТО не в полном объеме и пр. Анализ статистических данных показывает, что до 20% случаев неправильной работы электротехнических комплексов РЗА происходит по вине эксплуатирующего персонала.

Современные электротехнические комплексы РЗА являются сложной системой, выполняющей измерения, анализ электрических величин и обмен электротехнической информацией (сигналами защит, командами управления и блокировок). Согласно СТО 56947007-29.240.10.299-2020 «Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС» ПАО «ФСК ЕЭС», технология интеграции электротехнических комплексов РЗА в единую систему, осуществляющую обмен информацией в соответствии с требованиями стандарта МЭК-61850, получила название «Цифровая подстанция» (ЦПС). При выполнении ТО электротехнических комплексов РЗА ЦПС должны учитываться эксплуатационные особенности, обусловленные передачей сведений о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде.

Электротехнические комплексы РЗА одновременно выполняют защиту собственных присоединений, осуществляют резервирование нижестоящих и участвуют в алгоритмах вышестоящих защит. Таким образом, от полноты и качества ТО напрямую зависит работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов РЗА.

Степень разработанности темы диссертации. Исследования качества функционирования электротехнических комплексов РЗА проводились научными коллективами МЭИ, ТПУ, УРФУ, НГТУ, СПбПУ, ДВГУПС, СамГТУ, ЮРГПУ, ОмГТУ и других учреждений.

Вопросам повышения качества функционирования электротехнических комплексов РЗА посвящен ряд основополагающих работ таких авторов, как А. А. Волошин, В. Г. Гольдштейн, В. И. Нагай, К. И. Никитин, В. П. Обоскалов,

Э. П. Смирнов, А. М. Федосеев, А. С. Трофимов, А. И. Шалин, А. Apostolov, E. Atienza, C. Brunner, R. Kuffel, J. J. Kumm, и другие.

При решении задач оценки работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов релейной защиты используются таблично-логические и логико-вероятностные методы, а также методы Марковских цепей. Качество функционирования электротехнических комплексов РЗА определяется способностью выполнять свои функции в течение срока службы при наличии аварийного режима на защищаемом электрооборудовании и характеризуется вероятностью безотказной работы. При этом, не учитывается в достаточной мере рост эффективности самодиагностики электротехнических комплексов РЗА, их схемные и конструктивные особенности, а также влияние полноты ТО электротехнических комплексов РЗА ЦПС на работоспособность и качество функционирования защит.

Нормативной основой, определяющей технологию выполнения ТО комплексов РЗА, являются утвержденные приказом Министерства энергетики Российской Федерации № 555 от 13.07.2020 «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики». Объемы ТО, утвержденные правилами, сформированы на базе опыта эксплуатации и эффективны при обеспечении исправности существующих электротехнических комплексов РЗА. Специфические особенности ТО комплексов РЗА ЦПС, в частности влияние полноты и достоверности электротехнической информации, учтены не полностью и требуют отдельных исследований.

Целью диссертационной работы является повышение качества функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций за счет совершенствования технологии технического обслуживания и диагностирования их систем и компонентов в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

выполнить анализ структуры и направлений развития современных электротехнических комплексов релейной защиты, определить достаточность существующих критериев оценки работоспособности и качества функционирования систем и компонентов цифровых подстанций;

разработать способ диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющий проверить влияние параметров электротехнической информации на качество функционирования защит;

разработать математическую модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты, позволяющую учесть особенности эксплуатации систем и компонентов цифровых подстанций и их влияние на качество функционирования защит;

сформировать комплекс мероприятий по совершенствованию технологии технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты, учитывающих особенности эксплуатации систем и компонентов цифровых подстанций и выполнить оценку достигаемого технического и экономического эффекта.

Объект исследования – электротехнические комплексы релейной защиты цифровых подстанций промышленного назначения.

Направление исследований – исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов релейной защиты и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций промышленного назначения (в соответствии с п. 4 паспорта специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан способ диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, отличающийся тем, что позволяет проверить качество функционирования защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования;

- сформирована математическая модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты, отличающаяся учетом влияния систем и компонентов цифровых подстанций, передачи электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде и технологии технического обслуживания на качество функционирования защит;

- предложена технология технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, отличающаяся тем, что включенные в неё технологические операции позволяют повысить качество функционирования защит в условиях изменения полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанный способ диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций позволяет проверить качество функционирования защит при наиболее вероятных изменениях полноты и достоверности информации о состоянии защищаемого электрооборудования;

Сформированная математическая модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты позволяет оценить влияние систем и компонентов цифровых подстанций, передачи электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде и технологии технического обслуживания на качество функционирования защит;

Предложенная технология технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций позволяет повысить качество функционирования защит в условиях изменения полноты и достоверности информации о состоянии защищаемого электрооборудования за счет своевременного выявления неправильной работы защит в таких условиях и принятия соответствующих мер.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решены с использованием основных положений теории надежности электротехнических комплексов и систем, теории массового обслуживания, теории графов, планирования экспериментов, методов математического анализа, статистического

анализа, методов прогнозирования. Для проведения математических расчетов использованы программные продукты MathCAD, Microsoft Excel.

Экспериментальные исследования проводились на базе программно-технического комплекса «Цифровая подстанция» АО «Газпромнефть – ОНПЗ».

Основные положения, выносимые на защиту:

способ диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющий осуществлять проверку качества функционирования защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования;

математическая модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты, учитывающая влияние систем и компонентов цифровых подстанций, передачи электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде и технологии технического обслуживания на качество функционирования защит;

технология технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющая повысить качество функционирования защит за счет применения технологических операций, позволяющих своевременно выявлять и устранять дефекты защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации.

Реализация результатов работы.

Усовершенствованная технология технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющая осуществлять диагностику функционирования защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования, внедрена в территориальной сетевой организации ООО «Газпромнефть-Энергосервис», осуществляющей сервисное обслуживание и эксплуатацию электроэнергетических активов Омского нефтеперерабатывающего завода.

Степень достоверность научных положений и результатов диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждается экспериментальной проверкой, а также совпадением результатов, полученных в работе с данными технического учета и анализа функционирования комплексов релейной защиты и автоматики. При статистической проверке гипотез принят пятипроцентный уровень значимости. Расхождение теоретических данных, полученных при расчете параметров функционирования электротехнических комплексов релейной защиты, с фактическими не превышает 5%.

Апробация результатов работы. Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались и обсуждались на XLIX международной научно-практической конференции с элементами научной школы «Федоровские чтения» (Москва, 2019); на всероссийской научно-технической конференции «Россия Молодая: передовые технологии - в промышленность» (Омск, 2019); на научно-технической конференции среди молодых специалистов и работников АО «Газпромнефть-ОНПЗ» «Новатор» (Омск, 2018, 2019, 2020); на международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» (Москва, 2019); на научно-технической конференции молодых специалистов

БЛПС ПАО «Газпромнефть» (Санкт-Петербург, 2019); на научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск 2019, 2020, 2021, 2022); на V международной научно-технической конференция «Проблемы машиноведения» (Омск, 2021); на заседании постоянно действующего научно-технического семинара Омского государственного университета путей сообщения по экспертизе и обсуждению диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук по научным специальностям технических отраслей науки (Омск, 2022).

Личный вклад автора. Автору работы лично принадлежат результаты по разработке, постановке и проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и интерпретации полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в анализе и уточнении критериев работоспособности современных комплексов релейной защиты, выполнении исследований по разработке способа диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, разработке математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций и совершенствовании технологии технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющей повысить качество функционирования защит в условиях изменения полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 11 печатных работах, из них три статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, одна статья в издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка из 105 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 178 страниц, 33 таблицы и 69 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и указана степень разработанности темы научного исследования, приведены цель и задачи, положения, выносимые на защиту, характеризуются научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, методы и методология исследования, степень достоверности полученных результатов, апробация полученных результатов.

Первый раздел диссертационной работы посвящен анализу качества функционирования электротехнических комплексов РЗА в единой национальной электрической сети России.

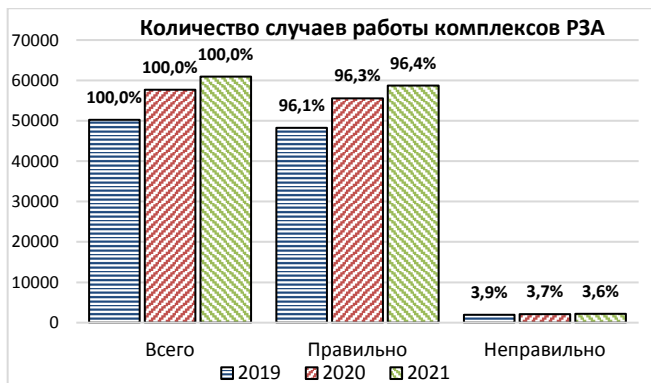


Рис. 1 – Анализ качества функционирования комплексов РЗА

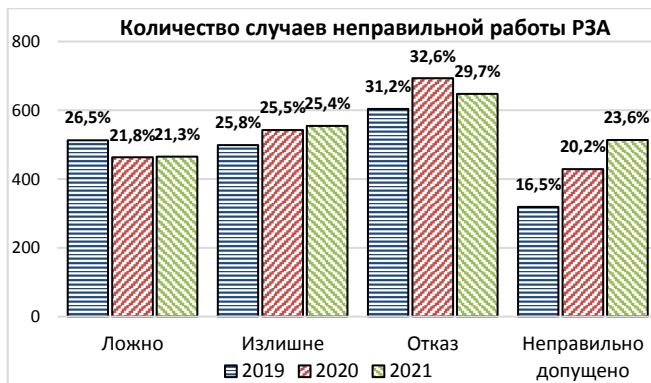


Рис. 2 – Классификация неправильной работы РЗА



Рис. 3 – Технические причины неправильной работы комплексов РЗА



Рис. 4 – Количество комплексов РЗА ЦПС, введенных в эксплуатацию

Осуществлен сбор и анализ сведений о качестве функционирования комплексов РЗА (рис. 1), выполнена классификация причин неправильной работы комплексов РЗА (рис. 2) определены основные технические причины неправильной работы комплексов РЗА (рис. 3). Отмечена растущая интенсивность внедрения цифровых инструментов в схемы комплексы РЗА (рис. 4). Определено влияние цифровой трансформации на основные показатели комплексов РЗА.

На основе проведенного анализа состояния вопроса сформулированы цель исследования, поставлены задачи для её достижения.

Во втором разделе сформулированы критерии оценки работоспособности электротехнических комплексов РЗА ЦПС, разработан и опробован на практике способ диагностирования электротехнических комплексов РЗА ЦПС, позволяющий учесть влияние параметров электротехнической информации на качество функционирования защит.

В ходе исследования, выполненного в первой главе, установлено, что осуществлять оценку работоспособности электротехнических комплексов РЗА допустимо по следующему критерию:

$$R_{\text{РЗА}} = P_{\text{во}} \cdot P_{\text{вц}} \cdot \prod_{i=1}^n P_{\text{ai}} P_{\text{pi}} \cdot \prod_{s=1}^m P_{\text{ипс}} \quad (1)$$

где P_{ai} , P_{pi} – показатели работоспособности соответственно аппаратной части, программной части компонентов комплекса РЗА; $P_{\text{ипс}}$ – показатель работоспособности измерительных преобразователей; $P_{\text{вц}}$, $P_{\text{во}}$ – показатели работоспособности вторичных цепей и вспомогательного оборудования.

Поскольку критерий работоспособности (1) не в полной мере учитывает особенности современных защит, предлагается для оценки работоспособности электротехнических комплексов РЗА ЦПС использовать уточненный критерий:

$$R_{\text{РЗА}} = P_{\text{во}} \cdot P_{\text{вц}} \cdot \prod_{i=1}^n P_{\text{ai}} P_{\text{пи}} \cdot \prod_{s=1}^m P_{\text{ипс}} \cdot K_{\text{ПИ}} \quad (2)$$

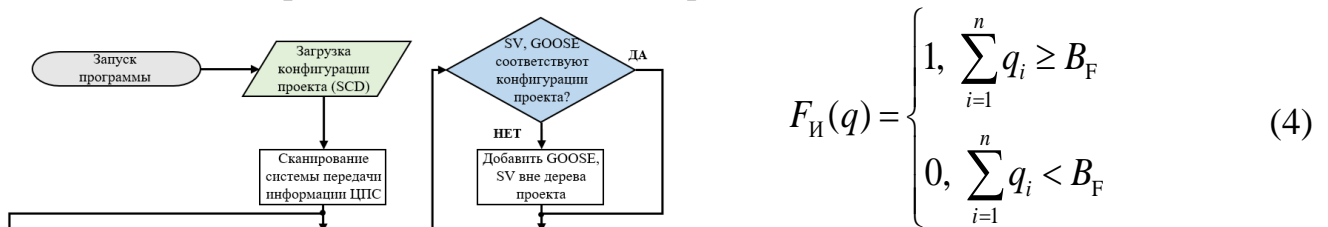
где $K_{\text{ПИ}}$ – показатель работоспособности системы передачи электротехнической информации.

Система передачи электротехнической информации должна обеспечить передачу требуемого количества данных необходимого качества:

$$K_{\text{ПИ}} = F_{\text{и}} \cdot Q_{\text{и}} \quad (3)$$

где $F_{\text{и}}$ и $Q_{\text{и}}$ – критерии полноты достоверности электротехнической информации.

Критерий полноты характеризует объем электротехнической информации, необходимый для работоспособности электротехнического комплекса РЗА:



$$F_{\text{и}}(q) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n q_i \geq B_{\text{F}} \\ 0, & \sum_{i=1}^n q_i < B_{\text{F}} \end{cases} \quad (4)$$

где q_i – количество элементов электротехнической информации, B_{F} – предел работоспособности комплекса РЗА ЦПС.

Критерий достоверности электротехнической информации определяет наличие и правильную интерпретацию меток качества передаваемых сведений:

$$Q_{\text{и}} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n q_i Q_{\text{в}}}{\sum_{i=1}^n q_i} - \frac{\sum_{i=1}^n R_{\text{иВ}}}{\sum_{i=1}^n R_{\text{и}}} \right) \quad (5)$$

где $Q_{\text{в}}$ – количество валидных элементов электротехнической информации, $R_{\text{и}}$ – количество реакций комплекса РЗА ЦПС; $R_{\text{иВ}}$ – реакции на валидные элементы.

Для проверки системы передачи электротехнической информации, имеющей критическую важность при обеспечении работоспособности электротехнических комплексов РЗА ЦПС, разработана программа для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20222665059), позволяющая выполнять анализ, собирать и выводить сведения об электротехнической информации, передаваемой в цифровом виде в форматах SV, GOOSE, PTP (рис.5).

При анализе системы передачи электротехнической информации комплекса РЗА ЦПС (рис.6) обнаружены случаи нарушения полноты электротехнических

сведений в цепях измерения и управления, в частности потери выборок измеряемых величин в формате Sampled Values (SV) и сведений в формате Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE). Повторный анализ с применением аналогичных программ для ЭВМ показал схожие результаты.

Для оценки влияния выявленных эксплуатационных особенностей на качество функционирования защит, предложен способ диагностирования комплекса РЗА ЦПС, который заключается в преднамеренном изменении полноты и достоверности электротехнической информации для проверки функционирования электротехнического комплекса РЗА ЦПС в этих условиях.

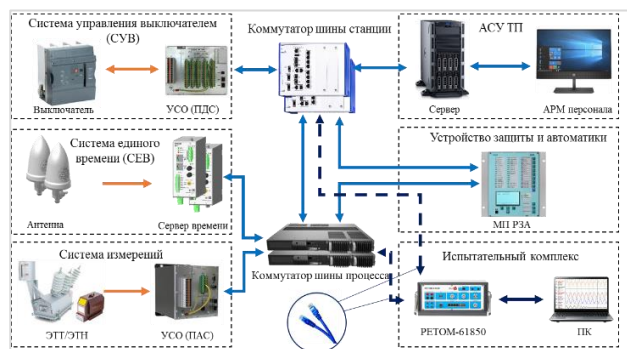


Рис. 6 – Программно-технический комплекс «Цифровая подстанция»

На первом этапе выполняется диагностика механизма проверки достоверности получаемых сведений об измерениях токов и напряжений. Проверяемое оборудование комплекса РЗА ЦПС должно выполнять защиту присоединения при получении достоверной электротехнической информации и блокировать защиту при нарушении достоверности.

Условие правильной работы оборудования можно определить как:

$$\frac{\sum_{i=1}^n q_{svi} Q_B}{\sum R_B} - \frac{\sum_{r=1}^m q_{svr} Q_H}{\sum R_H} = 0 \quad (6)$$

где q_{sv} – элементы электротехнической информации в формате SV; Q_B , Q_H – идентификаторы хорошего и плохого качества данных; R_B , R_H – количество реакций срабатывания и блокирования оборудования РЗА ЦПС.

На втором этапе проверяется работа защит в условиях нарушения последовательности измерительных выборок, которое возникает при динамических изменениях загрузки локальной вычислительной сети (ЛВС) энергообъекта (рис. 7). Для проверки защит создаются интервалы, на которых выборки значений токов и напряжений в формате SV хаотически перемешиваются.

Условие правильной работы оборудования РЗА ЦПС сформулировано как:

$$P(q) = q_{sv0} + \sum_{i=1}^n q_{svri} + q_{sv(n+1)} \begin{cases} 1, & \text{при } 1 \leq n \leq B_{FS} \\ 0, & \text{при } n > B_{FS} \end{cases} \quad (7)$$

где q_{sv0} , $q_{sv(n+1)}$ – элементы электротехнической информации в формате SV с правильной последовательностью; q_{svr} – элементы информации с хаотическим

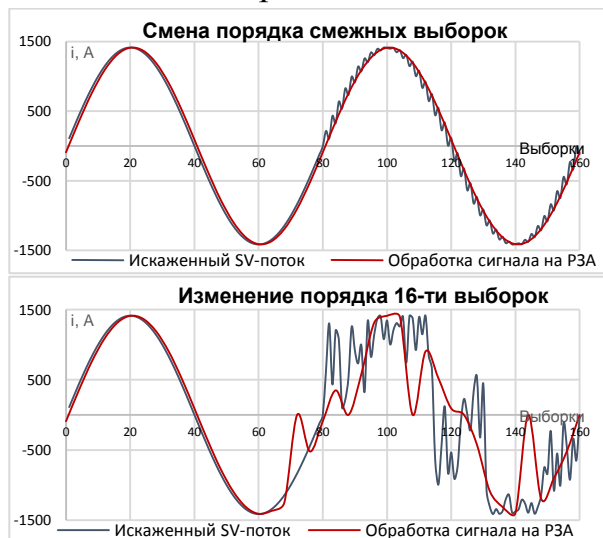


Рис. 7 – Работа защит при нарушении порядка измерительных выборок

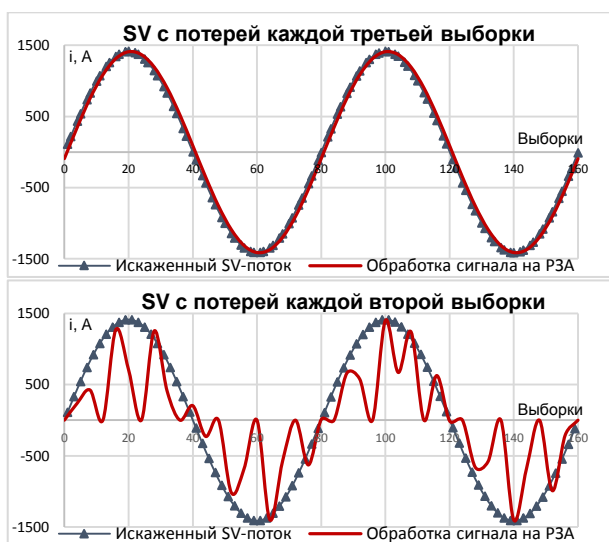


Рис. 8 – Работа защит при потере измерительных выборок

Условие правильной работы оборудования РЗА ЦПС определено как:

$$P(q) = q_{sv0} + \sum_{s=1}^m q_{svls} + q_{sv(m+1)} \begin{cases} 1, & \text{при } m \geq B_{FL} \\ 0, & \text{при } m < B_{FL} \end{cases} \quad (8)$$

где $q_{sv(m+1)}$ – элементы электротехнической информации в формате SV с правильной последовательностью; q_{svls} – элементы информации, потерянные (исключенные) на интервале от 1 до m ; B_{FL} – предел работоспособности оборудования РЗА ЦПС при потере элементов электротехнической информации.

На четвертом этапе проверяется влияние системы единого времени на работу защит. Для проверки защит изменяются параметры синхронизации времени и проверяется реакция оборудования РЗА ЦПС.

На пятом этапе выполняется проверка интерпретации сведений в формате GOOSE. Процедура интерпретации оборудованием РЗА ЦПС сведений о достоверности GOOSE аналогична проверке влияния достоверности выборок в формате SV. Отличие заключается в том, что дополнительно проверяются метки изменения конфигурации и реакция на полное исчезновение GOOSE.

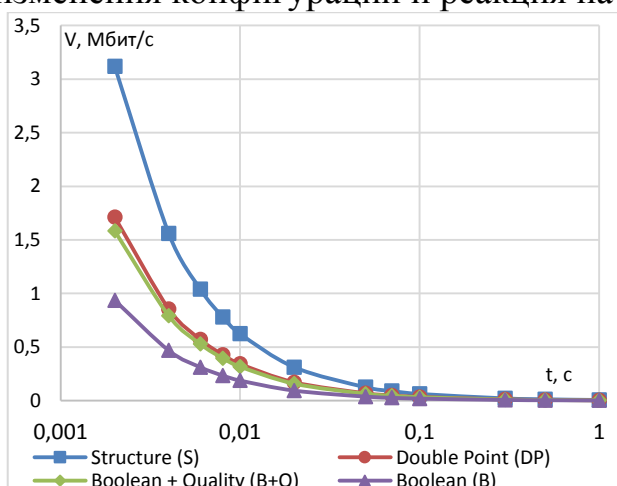


Рис. 9 – Нагрузка на ЛВС, создаваемая GOOSE

нарушением последовательности на интервале от 1 до n ; B_{FS} – предел работоспособности оборудования РЗА ЦПС при нарушении последовательности электротехнической информации.

На третьем этапе оценивается способность терминалов РЗА ЦПС восстанавливать потери измерительных выборок, которые происходят при изменении загрузки ЛВС, программных и аппаратных дефектах оборудования ЦПС и пр. Для проверки защит создаются интервалы, на которых исключаются выборки значений токов и напряжений в формате SV (рис. 8).

На шестом этапе проверяется загрузка ЛВС электротехническими данными. Особо важен учет загрузки данными в формате GOOSE (рис. 9). Эта загрузка имеет переменный характер и зависит от типа и интенсивности GOOSE.

Суммарную загрузку ЛВС можно определить через коэффициент загрузки:

$$\eta_{lan.m} = \frac{V_{sv} + V_{gse} + V_{ptp} + V_{mms} + V_{oth}}{V_{max}} \quad (9)$$

где V_{max} – максимальная пропускная способность Ethernet 100BASE или 1000BASE; V_{gse} – загрузка сообщениями в

формате *GOOSE*; V_{sv} – нагрузка измерениями в формате *SV*; V_{ptr} – нагрузка сообщениями синхронизации времени; V_{mms} – нагрузка отчетами о состоянии оборудования; V_{oth} – нагрузка прочей информацией.

Таким образом, разработанный способ диагностирования электротехнических комплексов РЗА ЦПС позволяет проверить влияние полноты и достоверности информации о состоянии защищаемого электрооборудования на качество функционирования защит. Полученные данные используются при создании математической модели функционирования и совершенствовании технологии ТО комплексов РЗА ЦПС.

Третья глава посвящена разработке математической модели функционирования электротехнических комплексов РЗА промышленного назначения.

Электротехнические комплексы РЗА промышленного назначения (рис. 10) предохраняют оборудование от электрических и технологических аварийных режимов, включают в себя множество измерительных преобразователей и видов защит. Кроме того, такие комплексы РЗА интегрированы в системы АСУ ТП и АСДУЭ.

В общем случае, вероятность безотказной работы электротехнического комплекса РЗА определяется как:

$$P_{\Sigma} = P_A P_B \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

При экспоненциальном законе распределения отказов вероятность безотказной работы электротехнического комплекса РЗА равна:

$$P_{\Sigma}(t) = \exp(-\Omega_1 t) \exp(-\Omega_2 t) \dots = \exp\left(-t \sum_{i=1}^n \Omega_i\right) \quad (11)$$

где Ω – параметр потока отказов; t – рассматриваемый диапазон времени.

Результаты расчета вероятности безотказной работы к концу межремонтного цикла без учета работы диагностирующих устройств и восстановления исправности в межремонтный период, представлены на рис. 11. По результатам видно, что вероятность безотказного состояния комплексов РЗА ЦПС на 16% ниже, чем у комплексов классической РЗА. Это связано с существенным увеличением количества компонентов

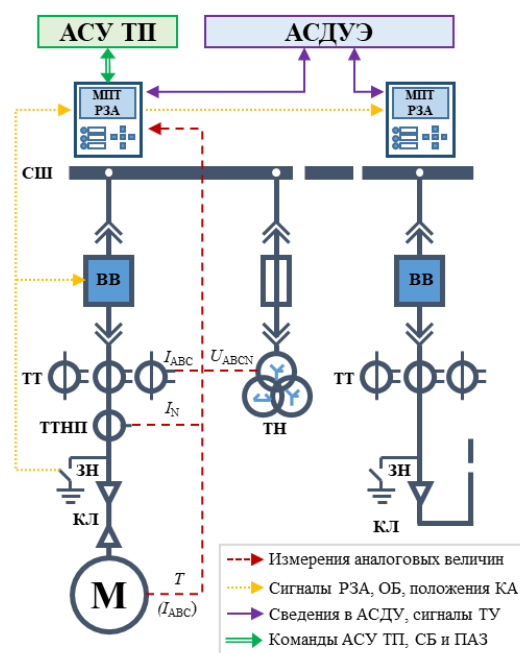


Рис. 10 – Электротехнический комплекс РЗА промышленного назначения

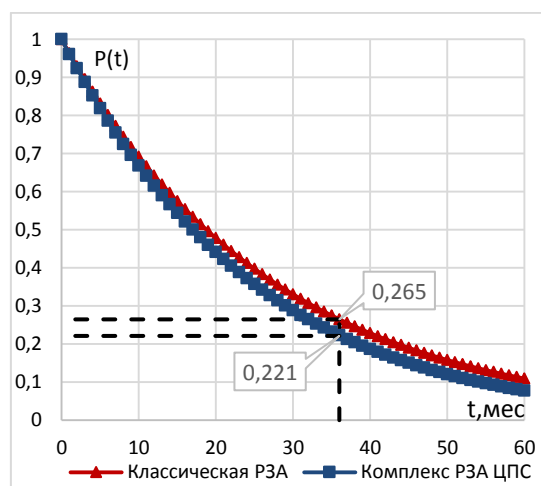


Рис. 11 – Вероятность безотказной работы комплексов РЗА

комплекса. Для уточнения результатов необходим учет потоков восстановления комплексов РЗА.

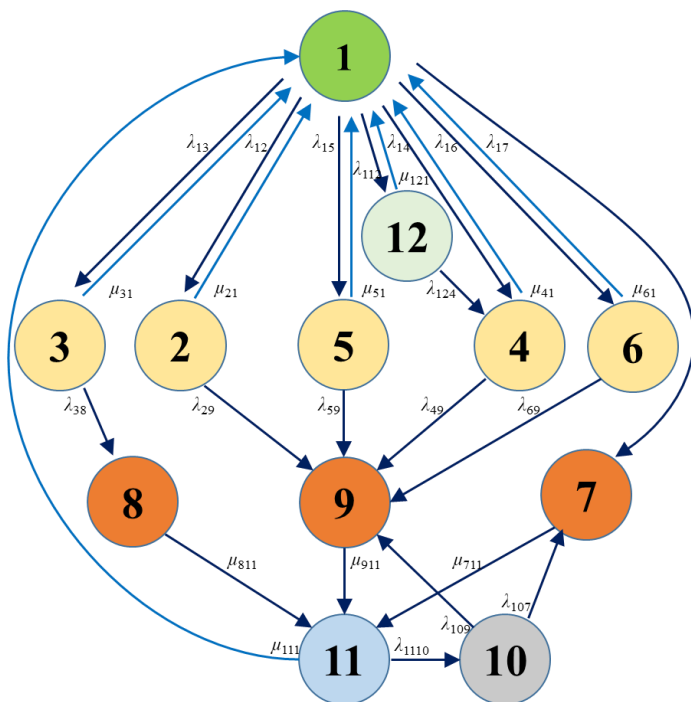


Рис. 12 – Граф состояний и переходов электротехнического комплекса РЗА

Отличительной чертой современных комплексов РЗА является развитая система диагностики, обеспечивающая частую самопроверку. Для построения математической модели функционирования комплексов РЗА с частой самопроверкой применяется математический аппарат цепей Маркова, позволяющий оценить функционирование системы с предопределенным пространством состояний, которое может быть представлено в виде графа (рис. 12).

Система уравнений, описывающая состояния комплекса РЗА, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \sum_{j \neq 1}^m P_j(t) \lambda_{j1} - P_1(t) \sum_{j \neq 1}^m \lambda_{1j} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \sum_{j \neq 2}^m P_j(t) \lambda_{j2} - P_2(t) \sum_{j \neq 2}^m \lambda_{2j} \\ \dots \\ \frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i}^m P_j(t) \lambda_{ji} - P_i(t) \sum_{j \neq i}^m \lambda_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

Электротехнический комплекс непременно находится в одном их состояний:

$$P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_i(t) = 1 \quad (13)$$

Система уравнений может быть представлена в матричной форме:

$$d\bar{P} = L^T \cdot \bar{P} \quad (14)$$

При оценке надежности систем с большим сроком службы изменениями вероятностей состояний, пренебрегают, т. е. рассматривают стационарные значения вероятностей. Получим их, приравнявая левую часть системы уравнений (12) нулю. В результате (14) трансформируется в систему линейных уравнений:

$$0 = (L_h^T)^{-1} \cdot \bar{P} \quad (15)$$

Матрица интенсивностей переходов между состояниями электротехнического комплекса РЗА имеет вид:

$$L = \begin{pmatrix} L_1 & \lambda_{12} & \lambda_{17} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} & \lambda_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{112} \\ \mu_{21} & L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{29} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{31} & 0 & L_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{41} & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{49} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{51} & 0 & 0 & 0 & L_5 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{59} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_6 & 0 & 0 & \lambda_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_7 & 0 & 0 & 0 & \mu_{711} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_8 & 0 & 0 & \mu_{811} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_9 & 0 & \mu_{911} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{107} & 0 & \mu_{109} & L_{10} & 0 & 0 \\ \mu_{111} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{1110} & L_{11} & 0 \\ \mu_{121} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{12} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Результаты расчетов стационарных значений вероятности безотказной работы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Вероятности безотказной работы комплексов РЗА в течение срока службы

Состояние		Комплекс РЗА	Комплекс РЗА ЦПС	Комплекс РЗА ЦПС при $R_{ср}/R_{ср.п}=1$
Исправное	P_1	0,956	0,959	0,972
Работоспособное (ЦПС)	P_{12}	0	$1,538 \cdot 10^{-4}$	$1,561 \cdot 10^{-4}$
Излишнее наблюдаемое	P_2	$1,145 \cdot 10^{-4}$	$0,958 \cdot 10^{-4}$	$0,964 \cdot 10^{-4}$
Излишнее ненаблюдаемое	P_3	0,013	0,011	0,011
Отказ наблюдаемое	P_4	$1,584 \cdot 10^{-4}$	$1,149 \cdot 10^{-4}$	$1,157 \cdot 10^{-4}$
Отказ ненаблюдаемое	P_5	0,019	0,014	0,014
Ложное наблюдаемое	P_6	$1,144 \cdot 10^{-4}$	$0,957 \cdot 10^{-4}$	$0,963 \cdot 10^{-4}$
Неопределенное	P_{10}	$1,331 \cdot 10^{-4}$	$8,906 \cdot 10^{-4}$	$2,482 \cdot 10^{-4}$
Восстановление	P_{11}	$3,113 \cdot 10^{-4}$	$1,384 \cdot 10^{-4}$	$1,061 \cdot 10^{-4}$
Ложное срабатывание	P_7	$0,928 \cdot 10^{-4}$	$0,786 \cdot 10^{-4}$	$0,781 \cdot 10^{-4}$
Излишнее срабатывание	P_8	$1,379 \cdot 10^{-4}$	$1,689 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$
Отказ в срабатывании	P_9	$1,782 \cdot 10^{-4}$	$1,821 \cdot 10^{-4}$	$1,319 \cdot 10^{-4}$

Разработанная математическая модель функционирования электротехнических комплексов РЗА позволяет учесть влияние систем и компонентов ЦПС, передачи электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде и технологии технического обслуживания на качество функционирования защит. Расчетное значение вероятности безотказной работы электротехнического комплекса классической РЗА составило 95,61%, что совпадает в пределах погрешности со средним значением этого показателя по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности предложенной модели.

В четвертой главе разработана технология ТО электротехнических комплексов РЗА ЦПС, позволяющая повысить качество функционирования защит за счет изменения объема и последовательности технологических операций,

рассчитан технический и экономический эффект от повышения качества функционирования защит при внедрении усовершенствованной технологии ТО.

Элементы комплексов РЗА подвергаются многократному воздействию в рамках регламентированных операций ТО, что является одним из факторов, обеспечивающих качественную диагностику и выявление дефектов.

На рис. 13 представлен анализ воздействия на функциональные группы комплекса РЗА в рамках регламентированных объемов ТО. Отмечается снижение интенсивности воздействий на функциональные группы комплексов РЗА ЦПС, что обусловлено недостаточным учетом специфики их функционирования. Таким образом, затрудняется выявление дефектов персоналом при выполнении ТО, что приводит к снижению качества функционирования комплексов РЗА ЦПС.

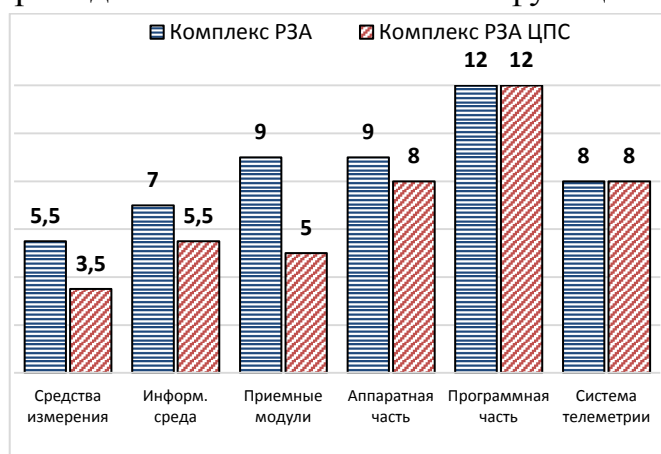


Рис. 13 – Функциональные группы электротехнических комплексов РЗА

Для относительной оценки изменения многократности проверок введено понятие среднего показателя воздействия:

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (17)$$

где R_i – регламентированное воздействие на функциональную группу комплекса РЗА; n – количество функциональных групп.

Для оценки качества ТО введено понятие коэффициента полноты проверок, определяющего вероятность перехода комплекса РЗА в исправное состояние:

$$K_{ПП} = \exp\left[-\sum_{j=1}^r \lambda_j T_j k_j\right] \cdot \frac{R_{cp}}{R_{cp.n}} \cdot \left(1 - \sum_{s=1}^m q_s\right), \quad (18)$$

где T_j – среднее время выполнения операций j -го вида, λ_j – интенсивность ошибок персонала в рамках ТО, где k_j – число выполненных операций j -го вида; $R_{cp.n}$ – эталонный средний показатель воздействия; q_n – вероятность отказа компонентов, не подвергнутых воздействию в ходе ТО.

Интенсивность ошибок персонала в рамках ТО можно определить как:

$$\lambda_j = \frac{n_{нс.ср} \cdot \Delta_{то}}{n_{общ.ср}}, \quad (19)$$

где $n_{нс.ср}$ – среднее количество неправильных срабатываний, $n_{общ.ср}$ – среднее количество всех срабатываний, $\Delta_{то}$ – относительное количество неправильных срабатываний по причине некачественного ТО.

Учет полноты ТО при переходе комплекса РЗА в исправное состояние:

$$\mu_{и} = K_{ПП} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}. \quad (20)$$

В свою очередь, возможность перехода комплекса РЗА в неопределенное

состояние, способное привести к неправильной работе, определяется как:

$$\mu_n = (1 - K_{III}) \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \quad (21)$$

Выполнен анализ актуальности утвержденной технологии ТО, закреплённой действующими правилами, для электротехнических комплексов РЗА ЦПС.

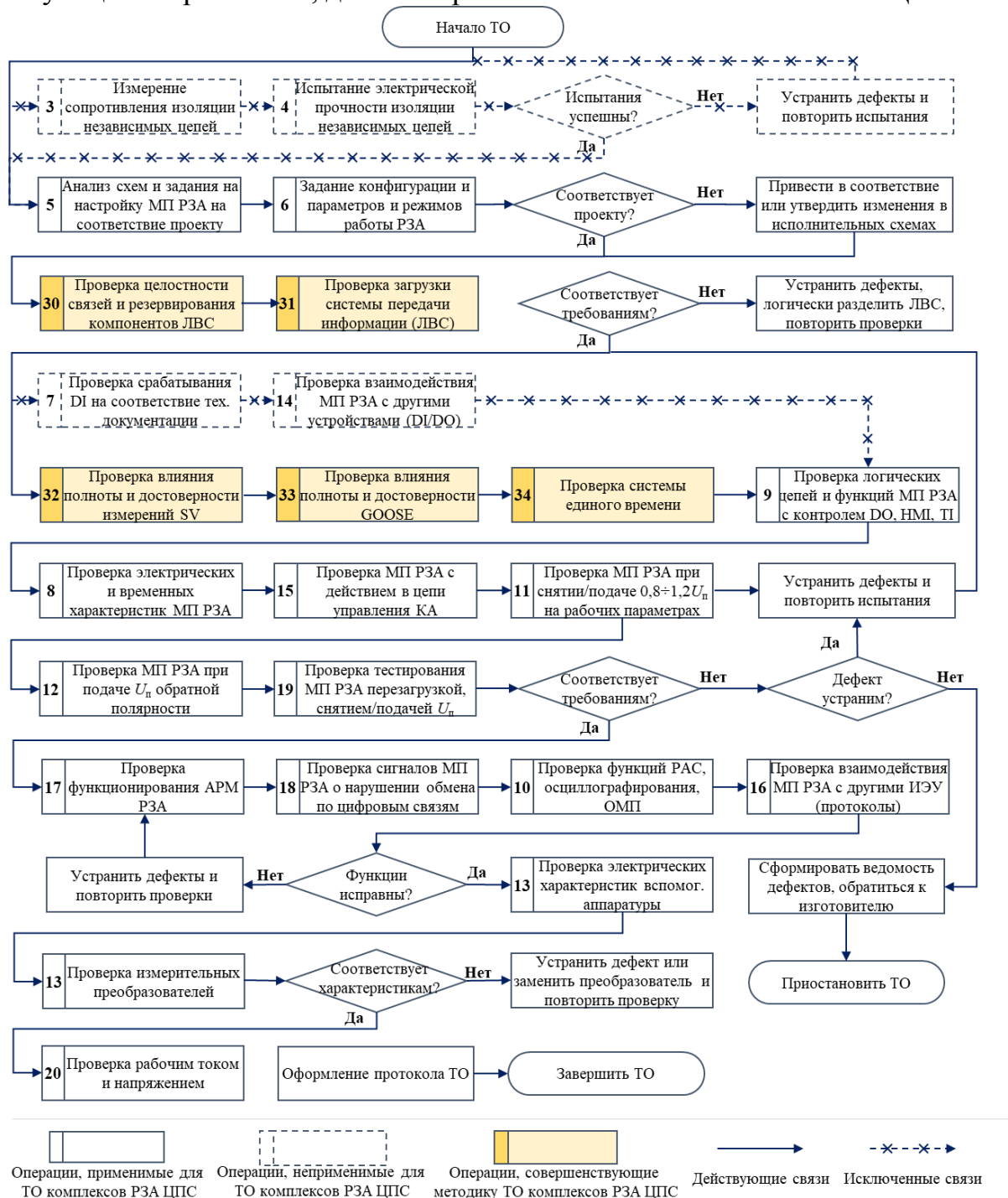


Рис. 14 – Последовательность технологических операций ТО комплекса РЗА ЦПС

Отмечено, что изменение структуры функционирования комплексов РЗА ЦПС, не учтено в достаточной мере. Предложена технология ТО (рис. 14), усовершенствованная за счет изменения перечня технологических операций, выполняемых при ТО комплексов РЗА ЦПС.

На основе математической модели, разработанной в третьей главе,

выполнена оценка технического эффекта от применения усовершенствованной технологии ТО. Отмечено повышение качества функционирования защит на 1,34%.

Для расчета экономического эффекта используется экономический показатель надёжности электротехнических комплексов РЗА. Определить математическое ожидание стоимости ненадежности защит можно как:

$$M[\varepsilon]_x = \sum_{i=1}^k c_{лс} q_{лск} + \sum_{i=1}^n c_{исі} q_{исі} \Omega_{исі} + \sum_{j=1}^m c_{осj} q_{осj} \Omega_{осj} \quad (22)$$

где $c_{лс}$, $c_{ис}$, $c_{ос}$ – стоимостные коэффициенты соответствующих отказов в функционировании; $q_{лс}$, $q_{ис}$, $q_{ос}$ – коэффициенты неготовности при соответствующих отказах в функционировании; $\Omega_{лс}$, $\Omega_{ос}$ – параметры потока аварийных режимов, способных привести к излишнему срабатыванию или отказу в функционировании.

Согласно результатам расчета, ожидаемый экономический эффект от применения усовершенствованной технологии ТО для электротехнического комплекса РЗА ЦПС установки первичной переработки нефти составляет более 70 млн. рублей за счет повышения качества функционирования защит и недопущения простоя оборудования по причине неправильной работы защит в течение срока службы электротехнического комплекса РЗА (25 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение качества функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций за счет совершенствования технологии технического обслуживания, диагностирования и оценки работоспособности. Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1) В результате анализа данных технического учета функционирования электротехнических комплексов релейной защиты в единой национальной электроэнергетической сети России установлены основные типы, причины и закономерности неправильной работы защит. Определено что средняя вероятность правильной работы комплексов РЗА составляет 96,27%.

2) Сформулированы критерии оценки работоспособности электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющие дополнительно учесть влияние полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования, влияющей на качество работы защит. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая выполнять анализ системы передачи электротехнической информации комплексов релейной защиты цифровых подстанций. Предложен способ диагностирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющий осуществлять проверку качества функционирования защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования.

3) Разработана математическая модель функционирования электротехнических

комплексов релейной защиты, позволяющая учесть влияние систем и компонентов цифровых подстанций, передачи электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования в цифровом виде и технологии технического обслуживания на качество функционирования защит. Расчетное значение вероятности безотказной работы комплексов релейной защиты составило 95,61%, что соответствует в пределах погрешности среднему значению этого показателя (96,27%) по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

4) Предложена технология технического обслуживания электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющая повысить качество функционирования защит за счет применения технологических операций, направленных на выявление и устранение дефектов защит при изменении полноты и достоверности электротехнической информации. Расчетное увеличение вероятности безотказной работы электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций в результате применения усовершенствованной технологии технического обслуживания составило с 95,90% до 97,24%. Оценка экономического эффекта на примере технологической установки первичной переработки нефти показала, что сокращение финансовых потерь из-за простоя оборудования, вызванного неправильной работой защит, составит более 70 млн. рублей в течение срока службы электротехнического комплекса РЗА (25 лет).

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается разработать принципы проверки направленных, дистанционных и дифференциальных защит в условиях нарушения полноты и достоверности информации о состоянии защищаемого электрооборудования.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Симаков, А. В. Разработка метода проверки комплексов цифровой релейной защиты электроэнергетических установок / А. В. Симаков, В. В. Харламов, В. И. Скороходов. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – №. 5 (167). – С. 58-63.

2. Симаков, А. В. Проверка электрических и временных характеристик токовой защиты цифровых подстанций / А.В. Симаков, В. В. Харламов, В. И. Скороходов. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2021. – №. 2 (176). – С. 46-51

3. Симаков, А. В. Разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций / А. В. Симаков, В. В. Харламов, М. Ю. Чернев. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2023. – №. 1 (185). – С. 93-98.

б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus:

4. Lysenko O. A., Simakov A. V., Kharlamov V. V. Algorithm for testing digital substation protection devices in conditions of network distortions in the process bus // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1901. – №. 1. – С. 012014.

в) объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20222665059 Российская Федерация. Определение показателей информационного обмена электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций: №20222665059: заявлено 02.08.2022: опубликовано (зарегистрировано) 09.08.2022 / А. В. Симаков, В. В. Харламов, А. А. Минаков; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – 1 с. – Текст: непосредственный

г) научные работы, опубликованные в других изданиях:

6. Горовой, С. А. Анализ несинусоидального режима работы системы электроснабжения на основе вейвлет преобразования цифрового потока мгновенных значений тока / С. А. Горовой, А. В. Симаков, В. И. Скороходов. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 96 – 105.

7. Симаков, А. В. Разработка метода проверки комплексов релейной защиты цифровых подстанций / А. В. Симаков, В. В. Харламов, Е. В. Пфафенрот. – Текст: непосредственный // Фёдоровские чтения – 2019: материалы XLIX Международной научно-практической конференции с элементами научной школы / М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 268–274.

8. Симаков, А. В. Моделирование устройств релейной защиты и автоматики в программном обеспечении Digsilent PowerFactory / А. В. Симаков, О. А. Лысенко, М. Ю. Чернев. – Текст: непосредственный / Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2019. № 1. С. 98–102.

9. Симаков, А. В. Проверка цифровых устройств релейной защиты и автоматики с применением специализированного испытательного комплекса / А. В. Симаков, В. В. Харламов, Р. В. Сергеев. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. С.280–287.

10. Симаков, А. В. Повышение эффективности проверки устройств релейной защиты и автоматики цифровых подстанций / А. В. Симаков, В. В. Харламов. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2021. С.338–345.

11. Симаков, А. В. Анализ особенностей внедрения цифровых подстанций в единой национальной электрической сети России / А. В. Симаков, В. В. Харламов. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. С.327–334.