

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Кокорин Евгений Леонидович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кокин Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Гольдштейн Валерий Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», профессор кафедры
«Автоматизированные электрические системы»;
Нагай Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический университет
(НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск,
заведующий кафедрой «Электрические станции
и электроэнергетические системы»;
Волошин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва, директор Центра
Национальной технологической инициативы
«Технологии транспортировки электроэнергии и
распределенных интеллектуальных
энергосистем».

Защита состоится 15 октября 2021 года, в 11 час. 00 мин. На заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»: <https://dissovnet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=2487>
Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета


Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. В процессе эксплуатации в энергосистеме периодически возникают повреждения силового оборудования. Функцию их локализации выполняет релейная защита (РЗ), целью функционирования которой является снижение ущерба от ненормальных режимов работы линий и оборудования. Учитывая важность устройств РЗ для электроэнергетической системы (ЭЭС), с одной стороны, и тот факт, что они являются причиной 25% технологических нарушений, с другой стороны, целесообразен учет РЗ при решении задач надежности ЭЭС.

Вторичные цепи современных подстанций представляют собой сложный технический комплекс, выполняющий измерения параметров режима, его анализ и выдачу управляющих воздействий. Степень влияния устройства РЗ на ЭЭС определяется направлением приложения управляющих воздействий, которые могут распространяться как на близлежащий коммутационный аппарат, так и на значительные объемы удаленной нагрузки с использованием каналов связи противоаварийной автоматики. Непосредственно устройство РЗ подвержено влиянию не только защищаемого элемента, но и всей прилегающей сети, повреждения в которой могут вызывать как правильные, так и неправильные его срабатывания. Кроме того, на функционирование устройства РЗ оказывают влияние такие факторы, как схемное исполнение, реализуемые алгоритмы, надежность элементной базы и эффективность подхода к эксплуатации.

Важным свойством ЭЭС является подключение новых потребителей и периодическая необходимость в реконструкции существующих объектов. Это ставит перед инженерами задачи многокритериального выбора с необходимостью обоснования рационального решения. В условиях многообразия субъектов отношений и их интересов требуется учет и согласование мнений всех заинтересованных сторон в выборе наилучшего варианта развития и функционирования сети, поэтому каждое решение должно быть строго обосновано. На сегодняшний день решения о приоритетности замены того или иного оборудования РЗ принимаются на основании мнения отдельных специалистов, качество таких решений зависит от квалификации экспертов и потому не всегда объективно. Для объективизации процесса принятия решений целесообразна его формализация, по средствам использования численного показателя, учитывающего технические и экономические аспекты. Сказанное

свидетельствует о потребности в развитии методов технико-экономического обоснования подходов к управлению эксплуатацией РЗ.

Существующие методы расчета надежности ЭЭС традиционно учитывают устройства РЗ упрощенно, как коэффициент, на который умножается показатель надежности первичного оборудования. Вопросам схемной (структурной) надежности энергосистем посвящен ряд основополагающих работ таких авторов, как Гнеденко Б.В., Гук Ю.Б., Китушин В.Г., Обоскалов В.П. и др. Для решения задач структурной надежности в проанализированных работах используются таблично-логические методы различных формаций, методы логических преобразований, и строгие аналитические методы. Гельфандом Я.С., Розановым М.Н., Смирновым Э.П., Федосеевым А.М. влияние вторичных цепей на надежность ЭЭС учтено с помощью результирующего коэффициента надежности РЗ. В работах Рипса Я.С. и Смирнова Э.П. проведен анализ обоснованности наиболее распространенных обобщенных показателей надежности, однако эффективность того или иного показателя не доказана, что позволяет говорить о том, что никаким единичным коэффициентом невозможно достоверно описать надежность функционирования РЗ в условиях многообразия режимов ЭЭС. Также стоит отметить, что методы, использующие обобщенные коэффициенты надежности, не учитывают схемные и конструктивные особенности устройств РЗ, их состояние, готовность к действию в конкретный момент времени и условия эксплуатации.

Проведенный анализ работ Зеленцова Б.П., Смирнова Э.П., Трофимова А.С., Шалина А.И., Billinton R., Kumm J.J., Schweitzer III E.O. показал, что требованиям повышенной детализации процессов и учета множества факторов соответствуют методы, основанные на цепях Маркова. Математический аппарат марковских цепей традиционно применяется для систем обслуживания, для РЗ он получил распространение одновременно с увеличением числа эксплуатируемых микропроцессорных (МП) устройств. Готовность традиционных устройств РЗ определяется при выполнении технического обслуживания (ТО), однако за время межпроверочного интервала их состояние может измениться. МП устройства РЗ позволяют частично или полностью контролировать свое состояние с помощью самодиагностики, являющейся регулярным событием. Увеличение потока регулярных событий повышает обоснованность применения методов, основанных на марковских процессах.

В результате анализа научно-технической литературы выявлено, что вопросы применения расчетных показателей надежности для обоснования подходов к управлению эксплуатацией РЗ недостаточно проработаны. Сказанное обусловило характер исследований, в рамках которых автором выполнена разработка метода определения характеристик ненадежности РЗ с использованием модели состояния РЗ, а также метода применения полученных характеристик для анализа технических решений в части РЗ в энергосистеме.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов управления эксплуатацией РЗ, позволяющих повысить надежность РЗ при недопущении повышения затрат на эксплуатацию.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

– анализ традиционных и современных подходов к эксплуатации устройств РЗ, для оценки их влияния на технические характеристики системы;

– анализ существующих подходов к расчету риска отказов и надежности ЭЭС с учетом устройств РЗ, для оценки их применимости к решению практических задач;

– анализ устройств РЗ в промышленной эксплуатации с целью определения уровня надежности, свойственного комплексу РЗ и выявления возможных способов повышения надежности без сверхнормативного увеличения затрат;

– разработка метода определения вероятности нахождения устройств РЗ в неработоспособном состоянии в зависимости от значимых факторов с целью обоснования объемов воздействия на устройства РЗ, необходимых для достижения целевого уровня надежности;

– разработка метода определения влияния отказов устройств РЗ на технико-экономические характеристики ЭЭС, с целью его применения для обоснования первостепенной значимости для ЭЭС конкретных технических решений в части реконструкции РЗ;

– разработка метода обоснования подхода к эксплуатации конкретных устройств РЗ для рационализации баланса надежности и издержек.

Теоретической и методологической основой диссертационной работы являются результаты исследований отечественных и зарубежных ученых в области анализа надежности и рисков.

Информационную базу диссертационной работы составляют монографии, материалы научно-технических конференций, статьи в периодических изданиях и

научных сборниках по исследуемой проблеме, техническое описание устройств РЗ, нормативно техническая документация (НТД) и реальные данные об отказах.

При проведении исследований использовалась следующая **методология и методы исследования**:

– графо-вероятностный подход при моделировании устройства РЗ для определения влияния на надежность его функционирования внутренних и внешних факторов;

– методы теории графов, решения дифференциальных уравнений, математической теории надежности, корреляционного анализа;

– методы моделирования и алгоритмизации.

Научная новизна работы состоит в разработке моделей состояния устройств РЗ и их использовании в предложенных методах решения инженерных задач по выбору состава оборудования РЗ и организации его эксплуатации с учетом технико-экономического критерия.

1. Модель готовности РЗ на основе марковских процессов уточнена путем возможности учета таких значимых факторов, как ближнее резервирование устройств РЗ, качество связи и частота периодических мероприятий по техническому обслуживанию.

2. Разработан метод расчета потенциальной длительности отключенного состояния элемента по причине отказа РЗ любого вида, учитывающий многообразие потенциально возможных случаев неправильной работы устройств РЗ. Метод позволяет установить влияние реальной сетевой топологии, наличия дальнего резервирования и межобъектного взаимодействия на характеристики надежности.

3. Разработан метод определения ущерба, вызванного ненадежностью РЗ, позволяющий определить влияние ненадежности РЗ на ЭЭС, учитывающий внутренние для устройств РЗ значимые факторы. Метод отличается от существующих возможностью учета влияния этих факторов не только на защищаемое РЗ оборудование, но и на смежные с ним элементы ЭЭС.

4. Разработан обобщенный метод технико-экономического обоснования подходов к управлению эксплуатацией РЗ подстанций, позволяющий анализировать комплекс РЗ с точки зрения технического и экономического критерия для повышения эффективности решений при эксплуатации и планировании развития сети.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода определения вероятности нахождения устройства РЗ в неработоспособном состоянии, метода определения длительности отключенного состояния элемента ЭЭС по причинам, связанным с отказами РЗ любого вида, а также в обеспечении возможности выполнения технико-экономического обоснования подходов к управлению эксплуатацией РЗ подстанции.

Практическая значимость работы состоит в:

- предложенных решениях задач определения коэффициентов неработоспособности устройств РЗ. Указанные коэффициенты рассчитываются с применением многофакторного подхода и позволяют определить эффективность методов управления эксплуатацией;
- предложенном решении задачи структурной надежности сети с учетом вклада устройств РЗ;
- разработке метода определения влияния отказов отдельных устройств РЗ на систему для принятия обоснованных технических решений;
- возможности использования полученных результатов в учебном процессе по тематике надежности.

Основные положения, выносимые на защиту:

- способ модификации существующих моделей состояния устройств РЗ позволяющий обеспечить учет таких факторов, как наличие ближнего резервирования, периодичность технических осмотров, надежность связи между ПС и диспетчерским центром при расчете показателей надежности;
- разработанный метод определения вероятности нахождения устройства РЗ в неработоспособном состоянии, предназначенный для оценки возможности достижения целевого уровня надежности РЗ с использованием имеющегося состава технических средств и формирования требуемого для этого метода управления эксплуатацией;
- разработанный метод определения длительности отключенного состояния элемента ЭЭС по причинам, связанным с отказами РЗ любого вида позволяющий осуществить оценку влияния РЗ на надежность смежного ей энергоузла;
- разработанный метод расчета потенциально недоотпущенной электроэнергии, по причинам связанным с отказами РЗ любого вида, позволяющий осуществлять управление программами замены оборудования с точки зрения технико-экономического критерия;

– разработанный метод расчета потенциально недоотпущенной электроэнергии, по причинам связанным с отказами РЗ любого вида позволяющий осуществлять оценку влияния подходов к управлению эксплуатацией конкретных устройств РЗ на технико-экономическую эффективность ЭЭС;

– разработанный метод осуществления выбора системы обслуживания устройств РЗ с использованием предложенного в работе метода расчета потенциально недоотпущенной электроэнергии, по причинам связанным с отказами РЗ любого вида предназначенный для снижения затрат на эксплуатацию РЗ при сохранении целевых значений надежности ЭЭС.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на 8 конференциях, в том числе:

– VII Международная молодежная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи-2016», Иваново, 2016.

– Научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России», Чебоксары, 2017.

– XVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017), Санкт-Петербург, 2017.

– VIII международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017», Самара, 2017.

– 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvia, Riga, 2017.

– 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), Екатеринбург, 2018.

– 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvia, Riga, 2018.

– XLII научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем – 2020», Новочеркасск, 2020.

Достоверность разработанной методики подтверждается корректным использованием математического аппарата, качественным анализом результатов расчета численных примеров, а также сравнением расчетных показателей со статистическими. Полученные результаты в части определения вероятности нахождения устройств РЗ в неработоспособных состояниях численно сопоставимы с рассмотренными исследованиями смежной тематики при значительно большей детализации входной информации. Полученные результаты

в части определения технико-экономических критериев эффективности функционирования ЭЭС с учетом РЗ получены впервые и в работах других авторов не представлены. Результаты работы были успешно представлены в рамках ряда международных и всероссийских конференций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 10 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 8 – в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад. Рассмотренная в работе проблематика выявлена лично автором в ходе работы в подразделениях, выполняющих функции эксплуатации РЗ. Вклад автора в теоретическую часть исследования заключается в разработке моделей и методов, используемых для управления эксплуатацией РЗ, их алгоритмизации, а также в выполнении оценочных расчетов и апробации.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Содержит 186 стр., 66 рисунков и 48 таблиц. Библиография включает 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационного исследования, формулируются его цели, задачи и методика выполнения, определяется научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Структура комплекса РЗ и показатели его надежности» приведены результаты анализа предметной области исследования, в ходе которого рассмотрены основные показатели, применяемые для характеристики надежности и риска отказа устройств в электроэнергетике. Показано, что такие особенности РЗ, как, с одной стороны, масштабность задействования в системе и соответственно – размерность задачи, а с другой – значительное число внутренних факторов, порождают существенные трудности в прогнозировании её отказов. В результате обзора научно-технической литературы выявлено, что в настоящее время не сформирован единый подход к анализу надежности устройств РЗ, а существующие методы расчета надежности, имеющие дело с устройствами РЗ, могут быть классифицированы на две группы в зависимости от условий применения:

– методы, определяющие надежность как безотказность;

– методы, определяющие надежность как готовность.

Надежность в смысле безотказности понимается как свойство РЗ сохранять в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в любой произвольный момент времени, как в нормальных, так и в аварийных режимах. А в понимании готовности – свойство РЗ срабатывать при коротких замыканиях (КЗ) в пределах установленной для нее зоны и не работать неправильно в режимах, при которых ее работа не предусматривается.

В основе методов, понимающих надежность как безотказность, лежит постулат о том, что последствия отказа устройства РЗ неочевидны до возникновения повреждений первичного оборудования. С точки зрения надежности в смысле безотказности, отказом устройства РЗ является его неправильное действие на первичное оборудование или его отсутствие при наличии требования. Методами этой группы (Гельфанд Я. С., Розанов. М. Н., Смирнов Э. П., Федосеев А. М.), функционирование РЗ и основного оборудования рассматривается совместно и в той или иной мере имеют дело с результирующими коэффициентами надежности в том числе для РЗ. Из-за многообразия режимов функционирования ЭЭС подход с применением результирующих коэффициентов надежности является приближенным. Единственным коэффициентом невозможно учесть ступенчатый подход к резервированию устройств РЗ, а также многообразие режимов её неправильных срабатываний (отказ срабатывания, ложное срабатывание, излишнее срабатывание при внешних КЗ). Потому для возможности решения практических задач с помощью расчета надежности требуется соответствующее развитие алгоритмов, в том числе, в части возможности их программной реализации.

Большей детализации процессов функционирования РЗ позволяют добиться методы, определяющие надежность устройств РЗ, как готовность (Зеленцов Б. П., Смирнов Э. П., Трофимов А. С., Шалин А. И., Billinton R., Kumm J. J., Schweitzer III E. O.). Основным достоинством рассмотренных в работе существующих методов этой группы, является возможность определения характера изменения параметров надежности устройств РЗ с учетом многообразия влияющих факторов, основной проблемой – сложность определения и обоснования исходных параметров. Основным показателем, используемым методами рассмотренной группы, является вероятность, практическое применение которой не предложено. На основании чего, сделан

вывод о необходимости адаптации методов определения готовности для возможности обоснования с их помощью подходов к управлению эксплуатацией РЗ. Под эксплуатацией РЗ в работе понимается часть жизненного цикла РЗ на протяжении которого она используется по назначению. Под управлением эксплуатацией РЗ – анализ характеристик устройств РЗ, планирование и осуществление воздействий на них, с целью повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат. Под методом управления эксплуатацией РЗ – совокупность правил по планированию и осуществлению воздействий на устройства РЗ и их анализу после непосредственной реализации.

В результате анализа типовых алгоритмов функционирования РЗ выявлена возможность повышения надежности за счет использования самодиагностики. Рассмотрены существующие алгоритмы и решения по автоматизированному обнаружению неисправностей, сделан вывод о необходимости учета систем самодиагностики при расчете надежности, как фактора, существенно влияющего на ее значение.

Анализ НТД показал, что действующие стандарты затрудняют переход к эксплуатации устройств РЗ по состоянию, а документы, допускающие такой подход, находятся в стадии разработки или внедрения, и повсеместно не применяются.

Оценка надежности устройств РЗ может выполняться с использованием математических моделей их функционирования. Требованием к моделям является возможность учета с их помощью как внешних, так и внутренних влияющих на РЗ факторов, кроме того, модель должна быть удобна для программной алгоритмизации.

Во второй главе «Оценочный анализ надежности РЗ» показана значительная неоднородность статистической информации, для чего использованы данные научно-технической литературы. Данные по статистике отказов РЗ из отчета электросетевой компании Екатеринбургского энергоузла позволили сделать выводы о влиянии внедрения МП устройств на надежность.

Выполнен оценочный расчет вклада РЗ в надежность ЭЭС с использованием простейшей модели ненадежного элемента. Полученные результаты численно сопоставимы со статистической информацией и обоснуют важность учета РЗ при решении задач надежности энергосистем.

Управление вероятностью неисправных состояний на протяжении периода эксплуатации устройства может выполняться посредством методов активного

поддержания надежности. Принцип действия таких методов заключается в контроле большого числа параметров для наблюдения за правильностью работы измерительных органов в РЗ и других устройствах. Выполненный обзор показал почти полное отсутствие фактического опыта внедрения систем, реализующих указанный метод. Однако, выполненный анализ уровня технологического совершенства оборудования, позволяет говорить о его достаточности для реализации систем активного поддержания надежности.

В третьей главе «Анализ влияния внутренних факторов на вероятность неработоспособного состояния РЗ» описывается разработанная в программной среде Simulink модель состояний РЗ. Объектом моделирования является совокупность РЗ и защищаемого ею элемента первичной схемы. Модель является многофакторной и учитывает: состав РЗ на объекте, и многообразие влияющих на нее внутренних факторов, таких как: длительность межпроверочного интервала, эффективность функционирования алгоритмов самодиагностики, интенсивность КЗ, качество связи между ПС и диспетчерским пунктом. Рассмотрен также предложенный метод, позволяющий с применением указанной модели, определить вероятность неработоспособного состояния РЗ.

В связи с тем, что в литературе приведены численные значения показателей надежности далеко не полного спектра устройств РЗ, в работе используются усредненные статистические показатели. На основании исходных данных, автоматически формируется матрица связности, топология которой предопределена разработанным графом состояний системы. На основании полученной матрицы с использованием математического аппарата уравнений Колмогорова (1) выполняется расчет вероятности нахождения модели в рассматриваемых состояниях. Для определения коэффициентов неработоспособности полученные вероятности группируются на основании идентичности возникающих последствий.

Разработанная модель и метод ее применения позволили сделать вывод о характере влияния внутренних факторов на вероятность нахождения РЗ в исправном состоянии. Вероятность неработоспособного состояния РЗ ($P_{нз}$) принимает различные значения в зависимости от временного интервала между техническими обслуживаниями (ТО) и эффективности самодиагностики ($\eta_{ск}$). Зависимость на рисунке 1 показывает, что повышение эффективности самодиагностики позволяет уменьшить интервал между ТО без снижения уровня надежности эксплуатируемого устройства. Зависимость $P_{нз}$ от интенсивности КЗ

позволяет сделать вывод о том, что КЗ, являющиеся апробацией работы РЗ в полной схеме, оказывают на величину $P_{нз}$ влияние сходное плановым проверкам. То есть для элементов сети, характеризующихся большой вероятностью повреждения функционал диагностики устройств РЗ частично замещается их

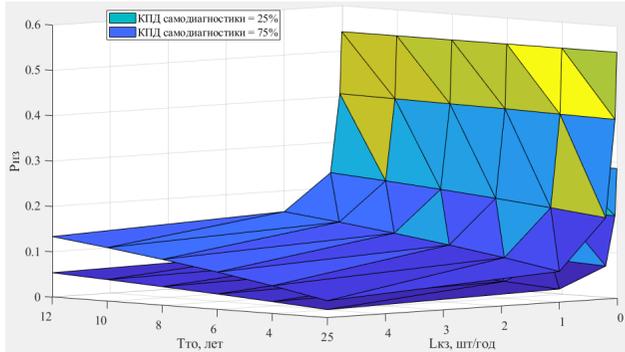


Рисунок 1 - Зависимость вероятности нахождения РЗ в неработоспособном состоянии от интервала между ТО и интенсивности КЗ

постоянными опробованиями и эффективность самодиагностики несколько снижается. В результате высокая интенсивность КЗ приводит к тому, что вероятность отказа неконтролируемых защит и устройств с самодиагностикой асимптотически сближаются.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = \sum_{j=1, \neq 1}^m P_j \lambda_{j1} - P_1 \sum_{j=1, \neq 1}^m \lambda_{1j} \\ \frac{dP_2}{dt} = \sum_{j=1, \neq 2}^m P_j \lambda_{j2} - P_2 \sum_{j=1, \neq 2}^m \lambda_{2j} \\ \dots \\ \frac{dP_i}{dt} = \sum_{j=1, \neq i}^m P_j \lambda_{ji} - P_i \sum_{j=1, \neq i}^m \lambda_{ij} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n P_i = 1 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где P_i - вероятность нахождения системы в состоянии i , а λ_{ij} - интенсивность перехода из состояния i в состояние j .

При моделировании учитывалась возможность организации ближнего резервирования РЗ и его влияние на надежность РЗ присоединения в целом. Выявлено что ближнее резервирование позволяет снизить вероятность

несрабатывания, однако вызывает увеличение вероятности излишней и ложной работы. Поэтому при расчетах надежности вместо обобщенного значения неработоспособности РЗ целесообразно применение неработоспособности на несрабатывание и на излишнее срабатывание.

В четвертой главе «Влияние потенциальных отказов РЗ на ЭЭС» разработан метод расчета влияния отказов РЗ на величину потенциально недоотпущенной электроэнергии. Новизна метода заключается: во-первых, в возможности учета влияния РЗ не только на защищаемый элемент основного оборудования, но и на смежные с ним и, во-вторых, в учете разных типов отказов, дальнего резервирования и внутренних для устройства РЗ факторов на надежность ЭЭС.

Идея разработанного метода получена в результате анализа подхода по поиску повреждения в защищаемой сети, последствия которого с точки зрения возникающего ущерба в большей степени эквивалентны последствиям от неправильного функционирования РЗ, предложенного Гельфандом Я.С. Учитывая указанное исследование, а также тот факт, что отказы (различных видов) различных устройств РЗ могут вызывать отключение одного элемента основного оборудования, принято решение для оценки надежности РЗ применять время простоя основного оборудования из-за неправильного функционирования РЗ. Исходной информацией об ЭЭС для разработанного метода является граф оборудования, который в общем виде представлен на рисунке 2. Граф оборудования ЭЭС включает в себя множество первичного оборудования $[n_1, \dots, n_i, \dots, n_k]$ и множество устройств РЗ $[n_{i1} \dots n_{im}]$. Хранение графа осуществляется в табличном виде, для преобразования исходных данных из вида комбинации традиционно используемых для характеристики ЭЭС таблиц «узлы» и «ветви» используется разработанный на языке Python алгоритм.

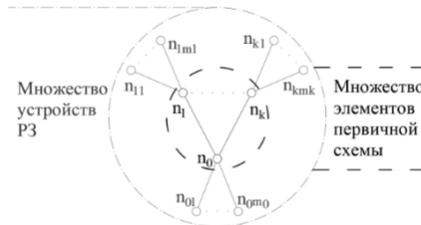


Рисунок 2 - Граф оборудования ЭЭС

Для характеристики влияния РЗ на надежность ЭЭС введены следующие показатели: R - потенциальная длительность отключенного состояния элемента

основного оборудования по причине отказа РЗ любого вида, U - потенциальный недоотпуск, вызванный этим отказом. Расчет R выполняется согласно выражению (2).

$$R = \left(\sum_{i=1}^{m_0} \lambda_{m0i} + \sum_{j=1}^k \lambda_{кзj} \cdot \sum_{z=1}^{m_j} P_{нзjz} + \sum_{i=1}^{m_0} P_{uc30i} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{кзj} \right) \cdot t_{on}, \quad (2)$$

где $\lambda_{кзj}$ – интенсивность возникновения КЗ, λ_{m0i} – интенсивность ложных срабатываний устройства РЗ, $P_{нзjz}$ и P_{uc30i} – вероятность неработоспособного состояния РЗ на несрабатывание и излишнее срабатывание, а t_{on} – время восстановления питания, принятое равным времени оперативных переключений. Таким образом, R учитывает отключения элемента, вызванные непосредственно установленной на нем РЗ, так и по причинам отказа РЗ смежных присоединений. Автором предложены методы учета таких характеристик РЗ, как селективность, резервирование удаленных КЗ, пуск УРОВ и прочее.

Величина R характеризует длительность отключенного состояния элемента сети, однако отключение отдельного сетевого элемента не всегда ведет к обесточению потребителя. Для определения степени влияния РЗ на конечного потребителя рассчитывается значение среднегодового потенциального недоотпуска электроэнергии, вызываемого отключением элемента сети ΔW . Разработанный метод расчета ΔW основан на методе Монте-Карло и простейшей марковской модели ненадежного элемента. Метод позволяет учитывать прямой и косвенный недоотпуск электроэнергии. Под прямым недоотпуском понимается потеря питания потребителем в результате отключения питающего элемента, являвшегося для него источником мощности. Под косвенным понимается увеличение потенциального недоотпуска вследствие снижения надежности ЭЭС на время восстановления работоспособности отключенного элемента. Программная реализация метода выполнена с применением языка Python.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что величина потенциально недоотпущенной электроэнергии в результате отказов РЗ любого вида, вызванная ненадежностью РЗ, непосредственно зависит от надежности устройства РЗ ($P_{нз}$), длительности отключений, вызываемых её отказами (R), а также последствий, возникающих в результате отключения защищаемого элемента (ΔW). Сформулированы следующие методы численного выражения U , как комбинации перечисленных факторов:

1. Представление величины потенциально недоотпущенной электроэнергии (U), в результате отказа РЗ любого вида в векторной форме. Значения перечисленных выше факторов, оказывающих влияние на величину U , при этом рассматриваются как проекции на оси трехмерного пространства. Достоинством метода является его гибкость, возможность учета большей значимости того или иного фактора в зависимости от местных условий с помощью весовых коэффициентов. Векторное представление U позволяет сравнивать характеристики однотипных устройств что может быть использовано, например, для формирования программ замены устройств РЗ. Недостатком метода является невозможность сравнения с его помощью разнородных затрат, например ущербов и затрат на обслуживание. В работе настоящий метод используется для визуализации информации.

2. Представление U в форме потенциального недоотпуска электроэнергии. Потенциально недоотпущенная электроэнергия, в результате отказа РЗ любого вида определяется как величина, пропорциональная общей длительности таких отказов (R), и величине возникающих при этом последствий ΔW , т.е. согласно выражению (3).

$$U = R \cdot \Delta W \quad (3)$$

Достоинством такого представления U является возможность его применения, для сравнительного анализа ущербов и затрат на модернизацию энергообъектов. В работе настоящий метод используется для составления программ замены и анализа эффективности того или иного целевого воздействия на устройство РЗ.

Апробация разработанного метода выполнена на примере типовой схемы IEEE 14, дополненной моделями ненадежных устройств РЗ. Для указанной схемы по известным режимным параметрам и характеристикам устройств РЗ ($P_{из}$), произведен расчет R и ΔW с дальнейшим определением U в относительной величине и финансовом эквиваленте. Анализ полученных результатов показал, что абсолютное значение U не является показателем надежности только устройства РЗ и зависит от таких факторов, как количество смежных элементов сети, интенсивность КЗ на них, и величины протекающей мощности. Для характеристики эффективности целевых воздействий на РЗ использована разность исходного значения U и его величины после осуществления воздействия, именуемая в работе показателем ΔU . Под целевым воздействием понимается любое действие, направленное на повышение надежности рассматриваемого

устройства РЗ, например, изменение подхода к обслуживанию или его замена. Первоочередным направлением приложения таких воздействий являются устройства РЗ, замена которых оказывает максимально положительное влияние на снижение потенциального недоотпуска. Сортировка полученных значений ΔU по убыванию позволила сформировать обоснованный порядок замены устройств РЗ, который графически представлен на рисунке 3.

Для проверки полученного списка замены устройств на достоверность в работе выполнен анализ оказывающих на него наиболее существенное влияние факторов. Выявлено, что ненадежные устройства РЗ, установленные на ЛЭП, мало влияющих на недоотпуск сети, могут вносить значимый вклад в ненадежность ЭЭС из-за своего влияния на смежные элементы. Непосредственно надежность устройства РЗ не является доминирующим фактором при составлении рейтинга, однако доказан убывающий характер зависимости U от надежности РЗ. В связи с существенным влиянием класса напряжения на U выявлена целесообразность группировки элементов сети по классу напряжения. Это объясняется двумя факторами: большей нагрузочной способностью элементов 220 кВ и принятым в работе допущением о равенстве характеристик надежности защит 220 и 110 кВ.

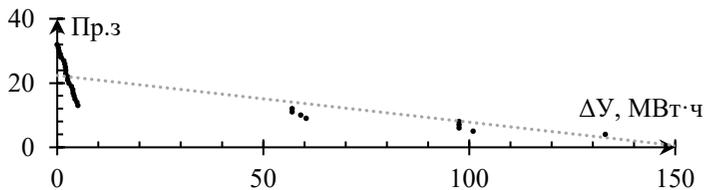


Рисунок 3 - Зависимость $С_{\text{смеж.узлов}}(Пр.з)$

В работе рассматриваются различные методы оценки величины финансового ущерба. В случае потребности в сравнении характеристик однотипных устройств целесообразно определение ущерба в относительных единицах, в других случаях предлагается использовать абсолютные величины. На основе стоимости недоотпущенной электроэнергии, согласно выражению (4), определяется значение ущерба. Стоимость электроэнергии ($C_{э-эн}$) принимается равной двойному тарифу, то есть 3,7 р/кВт·ч или 1,5-4 \$/кВт·ч согласно указаниям по проектированию развития энергосистем.

$$U_p = U \cdot C_{э-эн} \quad (4)$$

Метод определения ущерба в относительных единицах позволяет обеспечить визуализацию результатов. В качестве показателя применяемого для осуществления сравнения между однотипными устройствами в этом случае используются длины полученных трехмерных векторов. На рисунке 4 вектора, характеризующие значения потенциального ущерба по линиям 220 кВ, построены в трехмерном пространстве, для чего использована библиотека Matplotlib языка Python. Качественный анализ построенных векторов позволяет говорить о том, что различие между рассматриваемыми элементами системы в части ΔW существенно, что во многом обуславливает итоговый рейтинг замены устройств РЗ.

Для определения влияния внутренних факторов отдельных устройств на систему в целом при расчетах согласно методам определения влияния потенциальных отказов РЗ на систему, использована модель состояний устройства РЗ, описанная в третьей главе работы. Структурная схема обобщенного метода, состоящая из ранее описанных функциональных частей, представлена на рисунке 5.

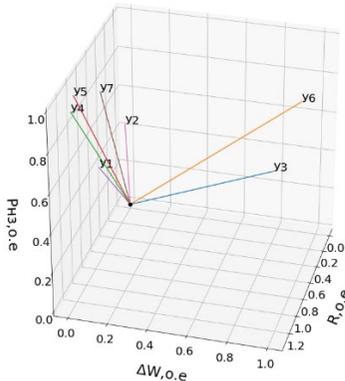


Рисунок 4 – Векторная форма представления U

Влияние исходных данных (блок 1 на рисунке 5) на модель состояний РЗ (блок 2) заключается в формировании ее входных параметров – интенсивностей переходов, вызванных: отказами, КЗ и другими причинами, что непосредственно влияет на итоговое значение $P_{нз}$. Рассчитанные значения недоотпуска вызываемого отключением элемента основного оборудования, также основанные на исходных данных, поступают в блок 4, где на основании сформированного графа оборудования ЭЭС (блок 1), параметров РЗ (блок 2) и недоотпуска сети вызванного отключением элемента (блок 3), выполняется расчет величин R и U .

Полученные результаты используются для управления эксплуатацией РЗ (блок 5) осуществляемого путем определения стоимостных показателей или сравнительного анализа однотипных объектов. Результатом принятия эксплуатационных решений могут являться замена устройств или, например изменение подхода к обслуживанию с соответствующим изменением показателей надежности что приводит к корректировке исходных данных (блок 1). То есть можно говорить о том, что рассматриваемому обобщенному методу свойственно наличие обратной связи, чем обеспечивается возможность оценки последствий принимаемых решений.

Рассматриваемый метод применим для широкого круга задач связанных с оценкой надежности РЗ, например с его помощью возможно обоснование рациональной системы обслуживания РЗ. В рамках работы выполнено решение указанной задачи для фрагмента ЭЭС с реальными параметрами и распределением МП и ЭМ устройств РЗ в соотношении 1:4. Рассчитанные значения U и других величин сравнены со значениями полученными в результате

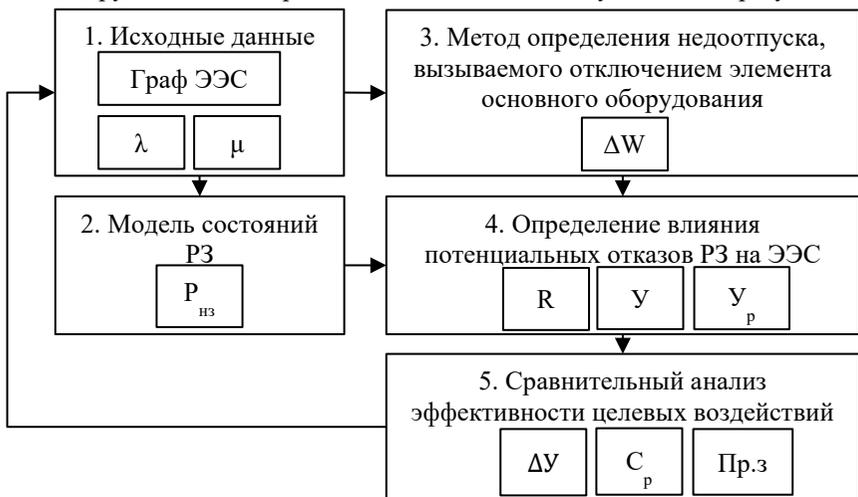


Рисунок 5 - Структурная схема разработанного метода аналогичных расчетов, выполненных для ЭЭС, оснащенной МП устройствами РЗ с повышенной эффективностью самодиагностики (с сохранением ТО и с отказом от обслуживания), что позволило определить показатель ΔU , характеризующий эффективность замены устройств в исходной сети на технологически более совершенные. Полученные значения ΔU для элементов рассмотренного фрагмента ЭЭС (трансформаторы, ЛЭП) представлены на рисунке 6.

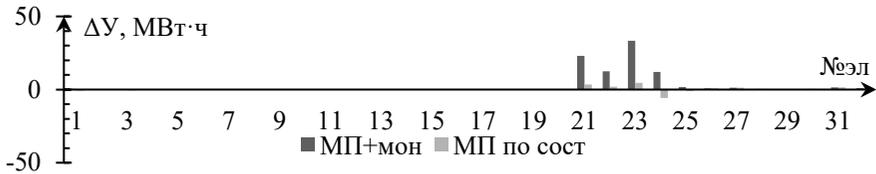


Рисунок 6 - Динамика изменения U при замене защит на МП

Анализ приведенных на рисунке 6 результатов позволяет сделать следующие выводы: замена исходных защит на МП устройства с повышенным уровнем самодиагностики ведет к увеличению надежности всех присоединений фрагмента ЭЭС, однако в случае отказа от обслуживания вновь установленных устройств РЗ, на ряде сетевых элементов наблюдается ее снижение. Полученная зависимость объясняется большей вероятностью нахождения необслуживаемых защит в состоянии с потенциально возможным излишним срабатыванием, свойственной таким устройствам при высоких значениях интенсивности внешних КЗ. Кроме того, выявлено что надежность устройств РЗ элементов ЭЭС интенсивность КЗ на которых относительно мала (например, элементы 11, 12, 13) почти не зависит от выбранной системы обслуживания, при условии оснащения их МП РЗ с повышенным уровнем самодиагностики. На основании сказанного сделан вывод о целесообразности замены устройств РЗ на технологически более совершенные с применением адаптивного подхода к их обслуживанию, что позволяет сохранить надежность на уровне, соответствующем полному сохранению плановой системы ТО, при сокращении затрат на обслуживание.

В заключительном разделе работы выполнено технико-экономическое сравнение подходов к эксплуатации РЗ, выявлено, что в зависимости от местных условий (например удаленности энергообъектов от диспетчерского пункта) эффективность тех или иных подходов может варьироваться. Показано что при любых условиях затраты на вариант с адаптивным управлением ТО в зависимости от потенциальных ущербов, минимальны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ традиционных и современных подходов к эксплуатации устройств РЗ, показал, что применяемые в ЭЭС планово-предупредительный подход к планированию ремонтов и экспертный подход к планированию развития препятствуют полноценному использованию преимуществ современного оборудования.

2. Выполнен анализ существующих подходов к расчету риска и надежности устройств РЗ, показано, что наиболее распространены методы обобщенных показателей и методы пространства состояний. Установлено, что методы расчета риска и надежности для решения практических задач РЗ не применяются.

3. Выполненный анализ реально эксплуатируемых устройств РЗ, позволил качественно оценить уровень надежности, как следствие наблюдаемости вторичных цепей, и выявил возможность её повышения без сверхнормативных затрат, путем увеличения эффективности самодиагностики.

4. Разработан метод определения вероятности нахождения устройств РЗ в неработоспособном состоянии. Работа метода основана на использовании модели состояний устройства РЗ, основанной на теории марковских процессов, преимуществом которой по сравнению с другими исследованиями в области является возможность учета ближнего резервирования, а также параметров надежности средств связи. Метод пригоден для определения объемов воздействия на устройство РЗ, необходимых для достижения целевого уровня надежности.

5. При разработке методов определения влияния отказов устройств РЗ на технико-экономические характеристики ЭЭС выделено два основных технико-экономических критерия: длительность отключенного состояния элемента ЭЭС по причинам связанным с отказами РЗ любого вида и потенциально недоотпущенная электроэнергия, по причинам связанным с отказами РЗ любого вида. Показана применимость первого критерия для сравнительного анализа однотипных объектов в системе при принятии технических решений и второго для обоснования первостепенной значимости конкретных технических решений любого вида в части РЗ для ЭЭС.

6. С использованием результатов корреляционного анализа, доказано, что разработанный метод определения влияния потенциальных отказов РЗ на ЭЭС, позволяет оценить роль устройств РЗ в системной надежности, и, как следствие, пригоден для решения задач планирования реконструкции устройств РЗ в сети с учетом технических и экономических критериев.

7. Разработан метод обоснования подхода к эксплуатации конкретных устройств РЗ, учитывающий вероятность нахождения устройства в неработоспособном состоянии, а также его системную значимость, характеризуемую величиной потенциально недоотпущенной электроэнергии, по причинам, связанным с отказами РЗ любого вида. Приведенный в диссертации расчет технико-экономических критериев, для тестовой схемы ЭЭС IEEE14,

позволяет сделать вывод о пригодности метода для рационализации баланса надежности и издержек.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Kokorin, E.L. Integral assessment of electrical grid equipment state / E.L. Kokorin, A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev // Proceedings of the 18th IEEE Mediterranean electrotechnical conference Melecon 2016. – 2016. – 7495362. – 7495362. 0,44 п.л./0,3 п.л. (Web of Science, Scopus).

2. Kokorin, E. Information and analytical system for power system life cycle management / E. Kokorin, S. Dmitriev, A. Khalyasmaa, R. Valiev // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – P. 245-252. – 7763124. 0,5 п.л./0,4 п.л. (Web of Science, Scopus).

3. Kokorin, E. Electrical network reliability assessment with consideration of the secondary circuits' effect / E. Kokorin, A. Khalyasmaa, S. Dmitriev // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – P. 230-238. – 7763103. 0,56 п.л./0,4 п.л. (Web of Science, Scopus).

4. Kokorin, E. Electrical Equipment Condition Based Maintenance Strategy / E. Kokorin, A. Khalyasmaa // Proceedings of the 2016 international conference and exposition on electrical and power engineering (EPE). – 2016. – P. 748-753. – 7781439. 0,375 п.л./0,3 п.л. (Web of Science, Scopus).

5. Кокорин, Е.Л. Степень контролируемости вторичных цепей подстанции / Е.Л. Кокорин, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин // Известия НТЦ ЕЭС. – 2017. – №77. – С. 132-141. 0,625 п.л./0,5 п.л.

6. Kokorin, E. L. Relay protection and automation equipment operability evaluation on the basis of the graph probabilistic model / E. L. Kokorin, S. A. Dmitriev // Proceedings 2017 XX IEEE International Conference of Soft Computing and Measurements (SCM). – 2017. – P. 315-318. – 7970572. 0,25 п.л./0,2 п.л. (Web of Science, Scopus).

7. Kokorin, E. L. Maintenance of Protective Relays / E. L. Kokorin, S. A. Dmitriev // 2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2017. – 8124768. 0,31 п.л./0,3 п.л. (Web of Science, Scopus).

8. Кокорин, Е.Л. Оптимизация комплекса РЗиА с учетом технико-экономических параметров / Е.Л. Кокорин, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин // Известия НТЦ ЕЭС. – 2018. – №78. – 12 С. 0,75 п.л./0,6 п.л.

9. Kokorin, E. L. Calculation of the relay protection and automation failure risks / E. L. Kokorin, S. A. Dmitriev, S. E. Kokin // 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – vol 2018. – April. – 8341696. 0,375 п.л./0,3 п.л. (Web of Science, Scopus).

10. Kokorin, E. L. Calculation of the relay protection and automation failure risk with consideration of systemic factors / E. L. Kokorin, S. A. Dmitriev // 2018 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2018. – 8659858. 0,25 п.л./0,2 п.л. (Web of Science, Scopus).

Другие публикации:

11. Кокорин, Е.Л. Нечеткая графовая модель оценки состояния электроэнергетических объектов / Е.Л. Кокорин, А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин // Сборник трудов VI международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2015». – 2015. – С. 87-90. 0,25 п.л./0,2 п.л.

12. Кокорин, Е.Л. Введение в проблему разработки системы оценки надежности объектов электрической сети на основе методов нечеткой логики / Е. Л. Кокорин // Молодежная наука в Уральском Федеральном Университете. – 2016. – № 1. – 6 с. 0,375 п.л./0,375 п.л.

13. Кокорин, Е.Л. Интегральная оценка технического состояния электросетевого оборудования на основе методов искусственного интеллекта / Е.Л. Кокорин, С.А. Дмитриев, А.И. Хальясмаа // Сборник трудов VII международной молодёжной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016». – 2016. – С. 234 - 237. 0,25 п.л./0,2 п.л.

14. Кокорин, Е.Л. Техническое обслуживание микропроцессорных устройств релейной защиты / Е.Л. Кокорин // Сборник тезисов и докладов IV международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». – 18-21 апреля, 2017. – С. 77-78. 0,125 п.л./0,125 п.л.

15. Кокорин, Е.Л. Оценка работоспособности устройств релейной защиты и автоматики на основе графовой вероятностной модели / Е.Л. Кокорин, С.А. Дмитриев // XVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2014). – 2017. – С. 405-408. 0,25 п.л./0,2 п.л.

16. Кокорин, Е.Л. Оптимизация системы технического обслуживания релейной защиты и автоматики / Е.Л. Кокорин, С.А. Дмитриев // Материалы VIII международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017». – 02-06 октября 2017 г. – С. 321 – 324. 0,25 п.л./0,2 п.л.

Подписано в печать 2021. Формат 60x84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,50. Тираж 90 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии ООО «Таймер - КЦ»
620075, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, д. 136