

На правах рукописи

Чулюкова Маргарита Валерьевна

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ И МЕТОДА
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ
АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии
наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Томин Никита Викторович

Официальные оппоненты: **Фишов Александр Георгиевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Новосибирский государственный
технический университет», кафедра «Автоматизированные
электроэнергетические системы», профессор

Самойленко Владислав Олегович
кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра
«Автоматизированные электрические системы», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»,
г. Томск

Защита состоится: «14» апреля 2026 года в 14:00 ч на заседании диссертационного
совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН:
<https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2026-2/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные
печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 на
имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» февраля 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.118.01,

доктор технических наук, доцент



Солодуша Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. При проектировании электроэнергетических систем (ЭЭС) устанавливается определенный уровень надежности электроснабжения потребителей. Высокий износ оборудования генерирующих и сетевых компаний наряду с недостаточными объемами и темпами его модернизации и цифровизации, снижение их способности выполнять свои технологические функции обуславливают рост числа аварийных отключений, что негативно отражается на надежности электроснабжения потребителей.

В условиях этих вызовов развитие распределенных энергетических ресурсов (РЭР) таких, как распределённая генерация (РГ), система накопления электрической энергии (СНЭЭ), интеллектуальные технологии в энергетике приводит к созданию новых интеллектуальных энергосистем (ИЭС) и открывает огромные возможности повышения эффективности и надежности их работы. Учитывая ограниченные финансовые, человеческие и временные ресурсы энергетических компаний, гибкий переход от традиционных ЭЭС к ИЭС представляет собой важную задачу для российских энергетиков и требует разработки новых оптимальных решений этой задачи. И это делает актуальными исследования, проведенные в диссертационной работе.

Надежная работа ЭЭС может быть определена количеством ее энергорайонов (ЭР), способных работать *изолированно* и поддерживать в них энергетический баланс в аварийных ситуациях. В связи с этим одним из важных аспектов перехода к новым направлениям развития ЭЭС для обеспечения надежности электроснабжения является энергетическая гибкость (англ. *energy flexibility*). В работе под энергетической гибкостью понимается способность РЭР в дополнение к существующим средствам регулирования гибкости целенаправленно оказывать управляемое техническое воздействие на баланс электрической энергии и мощности в энергосистеме. Оптимизированная работа РЭР на уровне ЭР позволяет поддерживать баланс спроса и предложения и управления ограничениями в сети, особенно в аварийных ситуациях.

Повышение энергетической гибкости для обеспечения надежности электроснабжения ЭР с РЭР в аварийных ситуациях рассматривается путем применения технологии управления спросом (англ. *demand response*). Гибкость технологического производственного процесса позволяет потребителю изменять спрос на электроэнергию из сети и делает его «активным» участником энергорынка. Под «активным потребителем» понимается участник розничного рынка электроэнергии, у которого есть возможность оптимизировать график загрузки своих мощностей для минимизации затрат на электроэнергию или получения дохода от продажи собственной электроэнергии и мощности. Использование локальных источников энергоснабжения потребителя (резервных генерирующих установок (ГУ), СНЭЭ и др.) также способствует снижению потребления электроэнергии из внешней ЭЭС.

В связи с этим предложен новый вариант участия активных потребителей в решении вопросов послеаварийного управления на этапе восстановления нормального режима работы ЭР с РЭР и включения его в параллельную работу с

ЭЭС, который направлен на предотвращение непредвиденных перерывов в электроснабжении в периоды ограниченного предложения электроэнергии, реализованный в работе в виде новой автоматики управления нагрузкой активных потребителей (АУНАП).

Степень разработанности проблемы. Вопросами развития ЭЭС и обеспечения устойчивой и надежной их работы занимались многие отечественные ученые: Мелентьев Л.А., Веников В.А., Китушин В.Г., Руденко Ю.Н., Бушуев В.В., Бартоломей П.И., Воропай Н.И., Арцишевский Я.Л., Ерохин П.М., Курбацкий В.Г., Назарычев А.Н., Бердин А.С., Кучеров Ю.Н., Гуревич Ю.Е. и др., а также зарубежные: Besanger Y., Eremia M., Rehtanz Ch., Cochran J., Miller M., Zinaman O., Milligan M., Buche M., Delikaraoglou S., Heussen K., Chen X., Chongqing K., Heinen S., Hewicker C., Wang Y., Chen C., Allan A. R.N. и др.

В нашей стране исследованиями вопросов управления различными режимами работы ИЭС занимаются учёные Нудельман Г.С., Антонов В.И., Короткевич М.А., Фишов А.Г., Бык Ф.Л., Илюшин П.В., Глазырин В.Е., Ефимов Д.Н., Паздерин А.В., Куликов А.Л., Шарыгин М.В., Булатов Ю.Н. и др.

Проблемами управления нагрузкой в различных ее аспектах занимаются ученые разных стран: Совалов С.А., Непомнящий В.А., Гук Ю.Б., Огороков В.Р., Крумм Л.А., Эдельман В.И., Гордеев В.И., Папков Б.В., Михайлов В.В., Демура А.В., Чукреев Ю.Я., Корнилов Г.П., Лоскутов А.Б., Шунтов А.В., Иофьев Б.И., Дзюба А.П., Ханаев В.В., Богданов В.А., Семенов В.А., Яковлева Т.С., Васильев А.П., Boyu Xie, Linyao Zhang, Kotchakorn Maneebang, Janis Kampars, M. Ali Sönmez, Javad Jazaeri и др.

Однако предлагаемые методы, как правило, были направлены на повышение экономической эффективности и оптимизации работы ЭЭС. В настоящий момент в связи с появлением активных потребителей, имеющих определенный технологический ресурс управления своим электропотреблением, стало актуальным исследование вопросов управления нагрузкой в послеаварийных режимах.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка принципов и метода автоматического управления нагрузкой активных потребителей, предоставляющих собственную мощность, для обеспечения надежности электроснабжения при аварийном выделении энергорайонов с распределенными энергетическими ресурсами на изолированную работу.

Задачи исследования включают в себя:

1. Исследование режимов работы ЭР с РЭР и проблемы при их функционировании в аварийных ситуациях.
2. Анализ существующих способов обеспечения надежной работы ЭР с РЭР.
3. Обоснование необходимости в разработке новых подходов к обеспечению надежности электроснабжения потребителей в ЭР с РЭР.
4. На основе технологии управления спросом разработка принципов и метода автоматического управления нагрузкой активных потребителей для обеспечения надёжности электроснабжения потребителей ЭР с РЭР в послеаварийных режимах.

5. Разработка методических положений согласования действий существующих устройств противоаварийной автоматики (ПА) в комплексе противоаварийного управления (ПАУ) и предлагаемой автоматики АУНАП.

6. Разработка методического подхода к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР при различных возмущениях и переходе в послеаварийный режим.

7. Исследование эффективности работы АУНАП как дополнительного способа обеспечения надежности электроснабжения потребителей в послеаварийном режиме работы ЭР с РЭР, комплексный анализ полученных результатов.

Объектом исследования являются энергорайоны, подключенные к распределительной сети переменного тока общего пользования ЭЭС и включающие в себя распределенные энергетические ресурсы.

Предметом исследования являются процессы управления нагрузкой, основанные на принципах технологии управления спросом.

Методология и методы исследования. Диссертация выполнена с использованием комплексного подхода, включающего в себя методы математического моделирования, теорию имитационного моделирования, теорию автоматического управления, теорию оптимизации, теорию электрических сетей и систем, теоретические основы релейной защиты и ПА. Программная реализация выполнена с использованием объектно-ориентированного подхода средствами языка Python. Для имитационного моделирования объекта исследования, его функционирования в различных режимных ситуациях и анализа полученных результатов применялись ПВК RastrWin, RusTab, Pandapower.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод автоматического управления нагрузкой активных потребителей для обеспечения надежности электроснабжения потребителей ЭР с РЭР в послеаварийных режимах. В отличие от существующих мировых практик использования технологии управления спросом, ориентированных на решение задач противоаварийного управления режимами работы ЭЭС, предложен новый вариант использования данной технологии для послеаварийного гарантированного восстановления электроснабжения потребителей и ликвидации дефицита мощности на уровне ЭР с РЭР путем использования дополнительной мощности активных потребителей.

2. Разработаны методические положения согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой дополнительной автоматики АУНАП, направленные на исключение риска повторного нарушения устойчивости по частоте и напряжению в послеаварийном установившемся режиме и сохранения селективности выполнения действий АУНАП

3. Разработан методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях. В отличие от существующих мировых и отечественных практик решения проблем снижения гибкости ЭЭС и связанных с этим возникающих негативных

последствий для потребителей, ориентированных на использование традиционных средств регулирования гибкости, предложен подход, который позволяет формировать мероприятия с оптимальным комплексным использованием всех существующих источников гибкости для гарантированного электроснабжения потребителей в аварийных ситуациях.

Теоретическая значимость работы. Предложен и теоретически обоснован методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях. Диссертационная работа углубляет теоретические основы использования технологии управления спросом в части решения задач оперативно-технологического управления в электроэнергетике. Валидирована возможность применения разработанного метода АУНАП для обеспечения надежности электроснабжения потребителей в аварийных ситуациях.

Практическая значимость работы.

1. Результаты практических исследований диссертационной работы верифицированы на авариях, происшедших в реальных действующих ЭР Дальнего Востока, а именно Амурской области, Приморского края, Республики Саха (Якутия), и подтвердили актуальность применения предложенного в работе метода АУНАП в комплексе ПАУ и методического подхода к повышению энергетической гибкости для минимизации последствий для потребителей в аварийных ситуациях.

2. Метод АУНАП за счет автоматической реализации его алгоритмов без дополнительного отключения мощности позволяет ускорить процесс восстановления электроснабжения потребителей, перерыв в электроснабжении которых может привести к негативным социально-значимым последствиям, затрагивающим различные аспекты жизни.

3. Предложенные метод АУНАП и методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях были использованы компанией АО «Фонд Форсайт» при разработке технической концепции управления нагрузками и режимами работы микросети Международного аэропорта г. Петропавловск-Камчатский, а также при формировании алгоритмов диспетчеризации объектов РГ в ЭР с РЭР сельскохозяйственного назначения тепличного комплекса Поволжье в Ленинградской области.

4. Разработанный программный инструмент в среде Python для реализации метода АУНАП может быть интегрирован в программные комплексы оперативно-технологических служб электросетевых компаний (ЭСК) и использован в практических действиях оперативного персонала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принципы автоматического управления нагрузкой активных потребителей для обеспечения надежности электроснабжения ЭР с РЭР в послеаварийном режиме работы.

2. Методические положения согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой АУНАП при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу.

3. Методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях.

4. Результаты практических исследований эффективности работы АУНАП как дополнительного способа обеспечения надежности электроснабжения потребителей в послеаварийном режиме работы реальных ЭР с РЭР.

Представленные выше научные положения обосновывают актуальность и значимость исследований в области использования технологии управления спросом для послеаварийного управления режимами работы ЭР с РЭР для повышения энергетической гибкости ЭЭС и представляют интерес для научного сообщества и практических специалистов в области электроэнергетики.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности ВАК 2.4.3. «Электроэнергетика»:

Пункт 14. «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы». Во второй главе в параграфе 2.1. диссертации представлен метод АУНАП для *послеаварийного управления* режимом потребления электроэнергии в ЭР с РЭР (п.1 научной новизны, положение 1, выносимое на защиту), в третьей главе в параграфе 3.3. диссертации представлены результаты практических исследований эффективности работы АУНАП как дополнительного способа обеспечения надежности электроснабжения потребителей в послеаварийном режиме работы ЭР с РЭР (п.1 научной новизны, положение 4, выносимое на защиту).

Пункт 16. «Разработка методов анализа и *синтеза систем автоматического регулирования*, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике». Во второй главе диссертации представлены: в параграфе 2.1. – новая автоматика АУНАП (п.1 научной новизны, положение 1, выносимое на защиту), в параграфе 2.2. – методические положения согласования действий существующих устройств ПА и новой дополнительной автоматики АУНАП в комплексе ПАУ (п.2 научной новизны, положение 2, выносимое на защиту), в параграфе 2.3. – методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях с использованием новой автоматики АУНАП (п.3 научной новизны, положение 3, выносимое на защиту).

Пункт 20. «Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и *управления электропотреблением*, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии». Во второй главе в параграфе 2.1. диссертации представлена новая автоматика АУНАП, разработанная на базе технологии управления спросом (п.1 научной новизны, положение 1, выносимое на защиту).

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием основных положений теорий математического моделирования и автоматического управления, корректностью имитационных моделей, их адекватностью для исследуемых процессов, а также проверкой и сопоставлением теоретических положений и результатов, полученных в экспериментальных исследованиях. Результаты находятся в соответствии с данными, полученными другими отечественными и зарубежными авторами.

Апробация работы. Основные теоретические положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях, семинарах и симпозиуме: IX Международная научно-техническая конференция «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Россия, Благовещенск, 2019 г.); Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon 2018» (Россия, Владивосток, 2018 г.); International Workshop on Flexibility and Resiliency Problems of Electric Power Systems (Россия, Иркутск, 2019 г.); 11th Symposium on Control of Power and Energy Systems (онлайн-доклад, 2022 г.); 95-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Россия, Иркутская обл., о. Ольхон, 2023 г.), 97-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Россия, г. Новосибирск, 2025 г.).

Результаты работы внедрены в производственные процессы АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания», АО «Фонд Форсайт» и РУП «Белэнергосетьпроект» Республики Беларусь (Приложение А).

Публикации. По теме исследования опубликовано 13 печатных научных работ (включая сборники статей конференций), из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3, 3 – в изданиях, включенных в базы Scopus и/или Web of Science, 7 – в иных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 3 главы и заключение, 5 приложений, изложенные на 174 страницах, и включает в себя 9 таблиц, 33 рисунка и список литературы из 143 наименований. В приложениях приведены сведения об апробации и применении результатов исследования.

Личный вклад. Автором идеи создания предложенной в работе автоматики АУНАП является член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор Воропай Н.И. и им же была инициирована данная диссертационная работа.

Личный вклад соискателя состоит:

- в рамках обзорно-аналитической работы – обоснование актуальности разработки новых методов обеспечения надежности электроснабжения;
- в рамках научно-методической работы – разработка математической модели и алгоритма работы АУНАП, разработка положений согласований действий АУНАП с другими устройствами ПА, разработка алгоритма работы методического подхода к повышению энергетической гибкости и определение критериев оценки его эффективности;

– в рамках практических исследований – разработка моделей ЭР с РЭР и сценариев их аварийного выделения на изолированную работу, анализ полученных результатов.

Совместно с член-корр. РАН Воропаем Н.И. соискателем был подобран материал для обзорно-аналитической работы, выполнена постановка задач диссертации, совместно с д.т.н. Курбацким В.Г. были сформулированы требования к АУНАП и селективности ее работы, совместно с к.т.н. Томиным Н.В. был разработан программный инструмент для реализации новой автоматики АУНАП и выполнены вычислительные эксперименты с его использованием.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, отражены научная новизна, практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения, дано краткое содержание работы.

В первой главе проведен обзор современного состояния проблемы и обоснована необходимость разработки новых методов обеспечения надежной работы ЭР с РЭР с номинальным напряжением 220 кВ и ниже в аварийных ситуациях. Рост требований потребителей к надежности электроснабжения стимулирует переход традиционных ЭЭС к ИЭС и ориентацию электросетевых компаний на качество предоставляемых услуг. Такой переход особенно актуален для стратегически важных восточных регионов нашей страны Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, для которых проблема надежного электроснабжения остается острой в социальном, техническом и экономическом аспектах в условиях дефицита генерирующих мощностей на фоне увеличения спроса на потребление мощности и роста аварийности оборудования генерирующих и электросетевых компаний из-за его высокого износа.

Также в первой главе показано, что обеспечение надежной работы ЭЭС в аварийных ситуациях достигается за счет увеличения количества ее работоспособных районов, которые могут быть выделены на изолированную работу по условию сохранения в каждой изолированной части системы баланса мощностей. Проведенный анализ существующих методов обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях показал, что в большинстве алгоритмов их работы заложен принцип отключения нагрузки потребителей. При этом отмечено, что в этих методах сохраняется еще ряд недоработок в части полного исключения негативных последствий для ответственных потребителей, социально-значимых объектов и объектов жизнеобеспечения из-за существующих разногласий между нормативными правовыми актами, отсутствием требуемой селективности при выборе воздействий на отключение нагрузки с учетом реальных рисков нарушения электроснабжения потребителей.

Повышение возможностей больших ЭЭС деления на изолированно работающие ЭР для сохранения ее устойчивой и надежной работы в аварийных ситуациях и появление новых свойств преобразованных энергосистем

актуализирует вопрос совершенствования систем управления и автоматики за счет внедрения в них гибких энергетических технологий. Интеграция цифровых технологий в системы управления ИЭС привела к необходимости согласования централизованных и децентрализованных подходов к управлению режимами, позволяющего внедрять РЭР в состав централизованных региональных ЭР. Создание цифровых районов электрических сетей создает условия для реализации новых подходов к решению вышеуказанной проблемы.

Качественно новые требования к ЭЭС делают гибкость системообразующим фактором, а управление ею – главным условием для перехода к новым направлениям развития ЭЭС. Обеспечение требуемого уровня гибкости ЭЭС может быть достигнуто широким спектром технологических решений, одним из которых является *управление спросом*.

Следовательно, основным направлением в работе было выбрано исследование технологии управления спросом не только как экономической услуги управления нормальными режимами работы ИЭС, но и как инструментария послеаварийного управления спросом для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР с целью дальнейшей разработки нового метода автоматического управления нагрузкой активных потребителей.

В второй главе разработаны структура, принципы, математическая модель и алгоритм работы АУНАП, продемонстрирована логика работы нового метода послеаварийного управления нагрузкой активных потребителей, разработаны методические положения согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой АУНАП при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу. На основе решения вышеуказанных задач разработан методический подход, включающий принципы, алгоритм и критерии оценки методического подхода к повышению гибкости в ЭР с РЭР.

Автоматика управления нагрузкой активных потребителей (АУНАП)

В России программа противоаварийного управления спросом является новой и находится пока на стадии разработки рыночного механизма вознаграждения потребителей за их участие в ней, используя при этом зарубежный опыт и опыт стимулирования потребителей в участии в экономической программе управления спросом. Исходя из этого, в диссертационной работе предложен новый вариант участия активных потребителей в послеаварийном управлении на этапе восстановления нормального режима работы ЭР с РЭР и их включения в параллельную работу с ЭЭС, который реализован в виде новой автоматики АУНАП.

Идея предлагаемого метода послеаварийного управления нагрузкой заключается в предоставлении активными потребителями на договорных условиях дополнительной мощности, снижая собственное потребление или активируя работу собственных источников генерации, и далее в автоматическом перераспределении и ротации предоставляемой ими мощности в зависимости от изменения графика их нагрузки между потребителями с ответственной нагрузкой.

Цель данного подхода – оперативное восстановление электроснабжения потребителей с ответственной нагрузкой в условиях дефицита мощности, которое может возникнуть при работе устройств ПА или ввода графиков аварийного

ограничения (ГАО) для сохранения устойчивой работы ЭЭС в аварийных ситуациях.

АУНАП рассматривается как дополнительная автоматика послеаварийного управления в изолированном режиме работы ЭР с РЭР. Действия АУНАП начинаются при установлении баланса потребляемой и генерируемой мощностей после завершения работы традиционной ПА. При этом АУНАП не работает при отключении ответственной нагрузки действием релейной защиты от повреждений электрооборудования. Для решения поставленных задач была разработана математическая модель, реализованная в виде алгоритма работы АУНАП, который представлен на рисунке 1 в виде упрощенной блок-схемы.

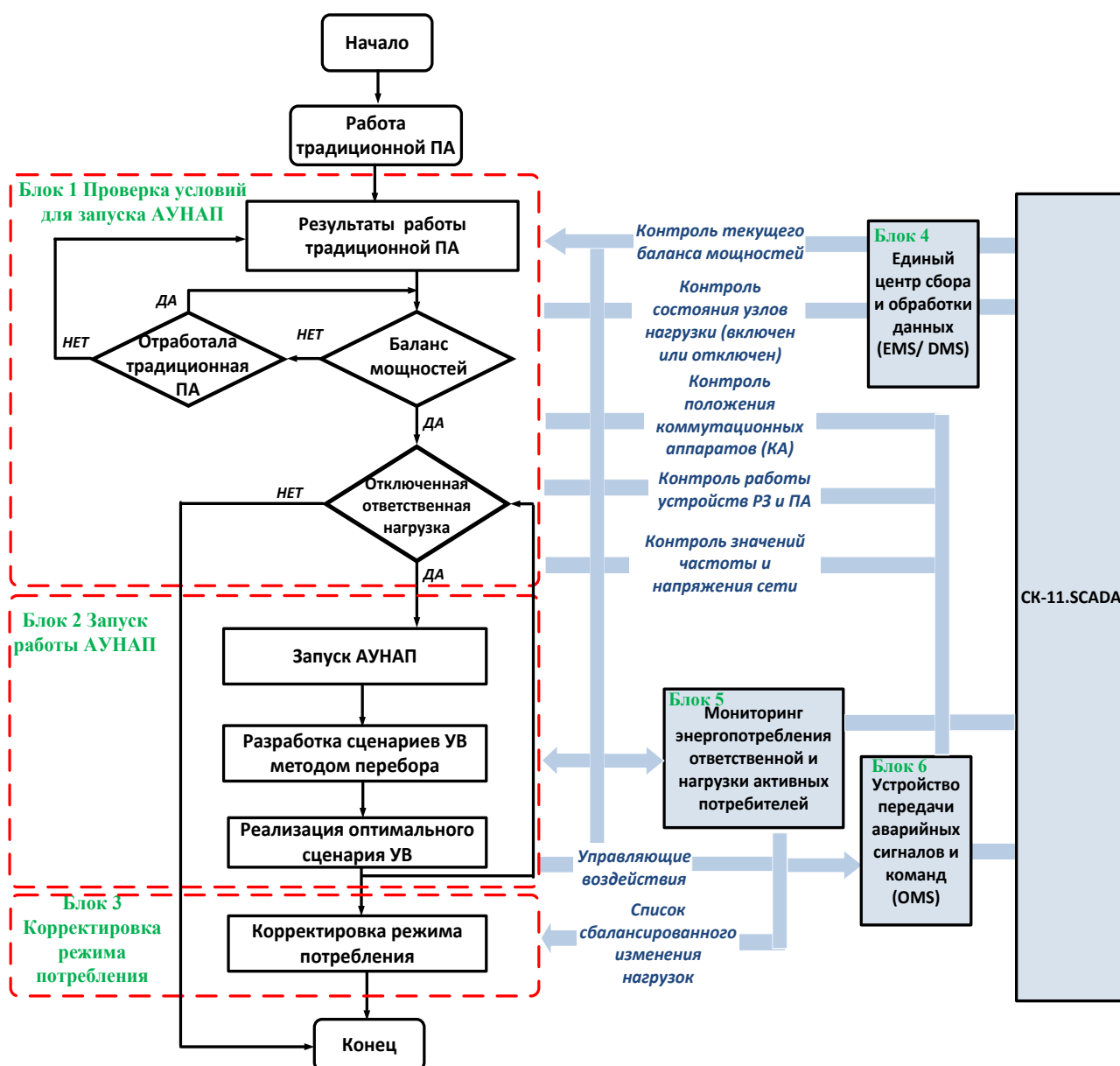


Рисунок 1 – Упрощенная блок-схема алгоритма и информационных связей координирующего комплекса АУНАП

Метод АУНАП включает три ключевых этапа:

1. Автоматический запуск при нарушении баланса мощностей, основываясь на информации о выполнении следующих критериев:

– **баланс мощностей** по формулам (1) – (3)

$$P_{ген} = P_{потр} + \Delta P, \quad (1)$$

$$P_{ген} = P_{гу} + P_{снээ} + P_{виэ}, \quad (2)$$

$$P_{потр} = P^I + P^{II} + P^{III}, \quad (3)$$

где $P_{ген}$ – генерирующая мощность в выделенном ЭР; $P_{потр}$ – потребляемая мощность в выделенном ЭР; ΔP – потери мощности в выделенном ЭР; $P_{гу}$ – мощность регулируемых ГУ; $P_{снээ}$ – мощность СНЭЭ; $P_{виэ}$ – мощность нерегулируемых ГУ на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ); P^I , P^{II} , P^{III} – мощность нагрузки потребителей 1, 2, 3 категории соответственно, в том числе управляемой нагрузки активных потребителей;

– **наличие отключенной ответственной нагрузки** по следующим критериям по формуле (4)

$$\sum_{i=1}^K P_{откл_i}^{отв} * prizm_i > 0, \quad i = 1, \dots, K, \quad prizm_i = \begin{cases} 0 - \text{включен}, \\ 1 - \text{отключен}, \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{откл_i}^{отв}$ – отключенная мощность ответственной нагрузки в узле i , K – количество узлов с ответственной нагрузкой, $prizm_i$ – признак состояния узла i с ответственной нагрузкой.

2. Формирование оптимальных сценариев перераспределения мощности с учетом категорий потребителей методом перебора путем минимизации целевой функция по формуле (5) с учетом режимных ограничений:

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^K a_i * P_{откл_i}^{отв} - \left(\sum_{i=1}^{G_1} P_{i_{свобод}}^{гу} + \sum_{i=1}^{G_2} P_{i_{свобод}}^{снээ} + \sum_{i=1}^{G_3} P_{i_{свобод}}^{виэ} + \sum_{i=1}^{N_3} P_{i_{свобод}}^{III} + \sum_{i=1}^{N_2} P_{i_{свобод}}^{II} + \sum_{i=1}^{N_1} P_{i_{свобод}}^I \right) \right), \quad (5)$$

где $P_{откл_i}^{отв}$ – отключенная мощность ответственной нагрузки в узле i ; $P_{i_{свобод}}^{гу}$ – свободная мощность регулируемых ГУ в узле i ; $P_{i_{свобод}}^{снээ}$ – свободная мощность СНЭЭ в узле i ; $P_{i_{свобод}}^{виэ}$ – свободная мощность нерегулируемых ГУ на базе ВИЭ в узле i ; $P_{i_{свобод}}^I$, $P_{i_{свобод}}^{II}$, $P_{i_{свобод}}^{III}$ – высвобожденная мощность нагрузки 1, 2, 3 категории соответственно в узле i ; a_i – весовой коэффициент.

Под свободной мощностью ГУ и СНЭЭ понимается мощность собственной микрогенерации активных потребителей, которую они гарантируют предоставить при аварийном дефиците мощности.

Под высвобожденной мощностью нагрузки 1,2,3 категории понимается дополнительная мощность активных потребителей, которую они гарантируют предоставить путем снижения собственного потребления.

В алгоритме АУНАП предлагается учесть более высокое вознаграждение активным потребителям 2 категории за предоставление ими услуги по снижению потребляемой ими мощности в аварийных ситуациях по сравнению с потребителями 3 категории и, соответственно, более высокое вознаграждения потребителям 1 категории по сравнению с потребителями 2 категории.

В формулу (5) введен весовой коэффициент для определения приоритетности подключения ответственной нагрузки, который рассчитывается на основе ранговой оценки по формуле (6):

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^N A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N A_{ij}}, \quad (6)$$

где A_{ij} – ранг i -ого показателя приоритетности, определенный j -м экспертом; N – число экспертов; n – число учитываемых показателей приоритетности.

Конкретные критерии оценки включают: социальную значимость, экономические последствия отключения, влияние на устойчивость сети. Для объективности расчета предлагается использовать метод оценки в шкале рангов с использованием непосредственного ранжирования, когда каждому критерию присваивается ранг по шкале от 1 (минимальная важность) до 10 (максимальная критичность). Итоговый коэффициент нормируется на сумму баллов всех потребителей (формула 6), что исключает субъективность.

3. Динамическая адаптация режимов потребления с целью оптимизации использования мощности активных потребителей до момента восстановления нормального режима работы ЭР с РЭР и включения его на параллельную работу с ЭЭС. Эта задача решается методом оптимального управления путем минимизации общей целевой функции на всем прогнозном временном горизонте (T) за счет выбора состава, времени и стоимости (C) управляющих воздействий (УВ) для каждого момента времени прогнозного диапазона по формуле (7):

$$\min \sum_{t=1}^T F_t(X_t, t) = \sum_{t=1}^T F_{dt}(X_t) + \sum_{t=1}^C f_{ci}(x_{ti}, t) \Big|_{\substack{b(x) \geq 0 \\ g(x) = 0}}, \quad (7)$$

где X_t – УВ, доступные в момент времени t ; F_{dt} – функция статической оптимизации каждого режима для времени t ; f_{ci} – монотонно убывающая функция стоимости УВ x_{ti} , зависящая от времени УВ, которые были выполнены до времени t ; $b(x)$ – ограничения на управляющие параметры; $g(x)$ – сетевые ограничения.

Функция стоимости f_{ci} отражает затраты на применение УВ x_{ti} в момент времени t и может включать: плату за переключение режимов потребителей, штрафы за отклонение от нормативного потребления, рыночную стоимость электроэнергии в момент t .

Ограничения $b(x) \geq 0$ включают максимально допустимую мощность потребителей, минимальное время между переключениями, температурные ограничения оборудования. Сетевые ограничения $g(x) = 0$ отражают баланс мощности в узлах сети, пропускную способность линий и т.п.

Для реализации алгоритмов работы АУНАП предложено использование программного комплекса ПК «СК-11. SCADA», который используется в центрах управления сетями оперативно-технологических служб ЭСК. В зависимости от нужд конкретной ЭСК, комплектация программных пакетов «СК-11. SCADA» может варьироваться и адаптироваться под новые задачи. Это позволяет гибко настраивать систему, в том числе для решения задач, связанных с восстановлением электроснабжения ответственных потребителей.

Методические положения согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой АУНАП

Основные принципы методических положений согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой автоматики при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу приведены на рисунке 2 в виде последовательности действий. Предлагаемая последовательность заключается в очередности выполнения тремя подсистемами своих функций: *предупредительной, локализующей, восстановительной*. Состав элементов каждой подсистемы определен исходя из задач, решаемых на каждом этапе изолирования ЭР с РЭР.

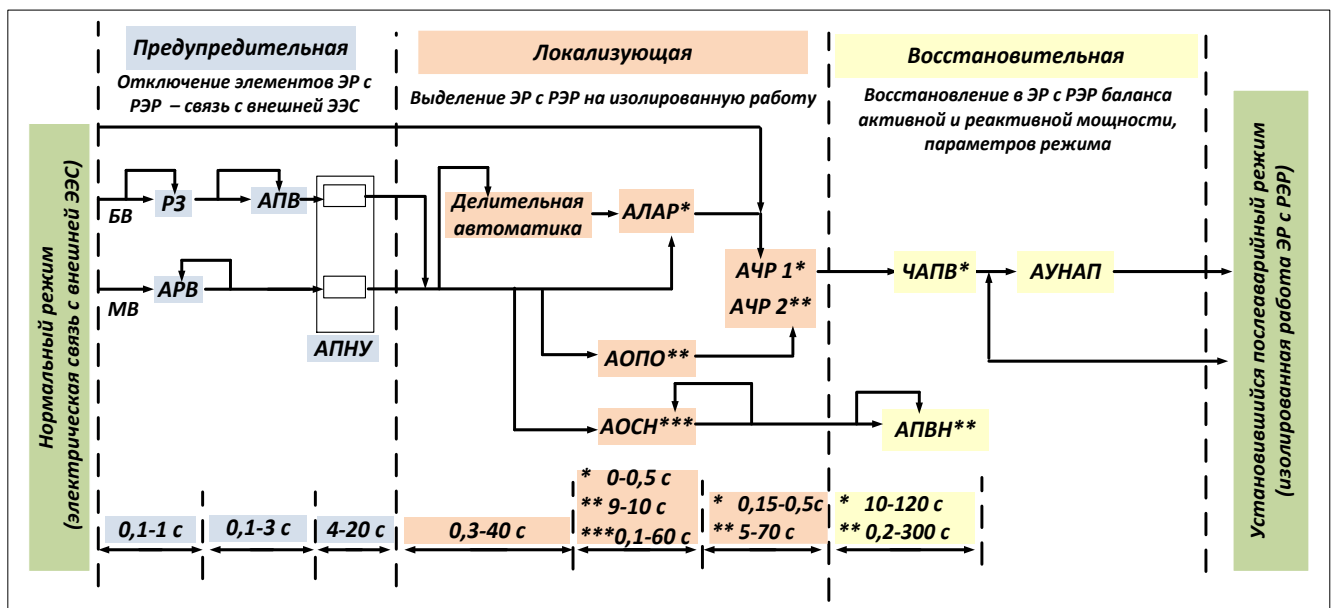


Рисунок 2 – Последовательность работы существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой АУНАП при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу

(БВ – большое возмущение; МВ – малое возмущение; АПВ – автоматика повторного включения; АРВ – автоматическое регулирование возбуждения; АПНУ – автоматика предотвращения нарушения устойчивости; АЛАР – автоматика ликвидации асинхронного режим; АОСН – автоматика ограничения снижения напряжения; АОПО – автоматика ограничения перегрузки оборудования; АЧР – автоматическая частотная разгрузка; ЧАПВ – частотное автоматическое повторное включение; АПВН – автоматика повторного включения по напряжению; АУНАП – автоматика управления нагрузкой активных потребителей)

Целью разработки методических положений согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой АУНАП является исключение риска повторного нарушения устойчивости по частоте и напряжению в послеаварийном установившемся режиме и сохранения селективности выполнения действий АУНАП.

Особенность действий АУНАП при согласовании ее работы с другими устройствами ПА на этапе восстановления заключается в следующем:

1. Учет суточного графика нагрузки потребителей, величина потребления электрической мощности которого может меняться в разные периоды автоматического перераспределения нагрузки для поддержания уровней частоты и напряжения в допустимых пределах.

2. Поддержание допустимых уровней частоты до момента восстановления нормального режима работы ЭР с РЭР регулированием АРВ включенных в работу из резерва регулируемых генерирующих установок (ГУ).

3. Поддержание допустимых уровней напряжения автоматическим изменением коэффициентов трансформации силовых трансформаторов форсировкой выдачи реактивной мощности средствами компенсации реактивной мощности при перераспределении (ротации) нагрузки действиями АУНАП и включении в работу нагрузки, влияющей на напряжение в выделившемся ЭР.

4. Блокировка действий частотной автоматики повторного включения (ЧАПВ) для предотвращения роста дефицита активной мощности и автоматики повторного включения по напряжению (АПВН) для предотвращения роста дефицита реактивной мощности для сохранения селективной работы АУНАП.

Методический подход к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежной работы ЭР с РЭР

В качестве основы методического подхода к повышению энергетической гибкости ЭР с РЭР используется **анализ последствий для потребителя в результате аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу**. Данный анализ основан на факторах (рисунок 3), влияющих на процесс аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу. Масштаб воздействия этих факторов на устойчивое и надежное функционирование ЭР с РЭР в послеаварийном режиме определяется охватом мероприятий, формирующих алгоритм разработки мер по повышению энергетической гибкости системы.

Вынесенный на защиту разработанный методический подход заключается в следующем:

1. В процессе оценки последствий аварийного перехода ЭР с РЭР на изолированную работу по каждому из анализируемых аспектов составляется набор возможных факторов, которые могут угрожать устойчивой работе ЭР с РЭР в послеаварийном режиме.

2. Проводится оценка зависимости устойчивой и надежной работы ЭР с РЭР от условий реализации конкретного негативного фактора. Если устойчивая и надежная работа ЭР с РЭР в изолированном послеаварийном режиме снижается из-за реализации негативных факторов (с учетом возможности их сочетания и одновременного воздействия на переходный процесс), производится анализ причин снижения гибкости ЭР с РЭР.

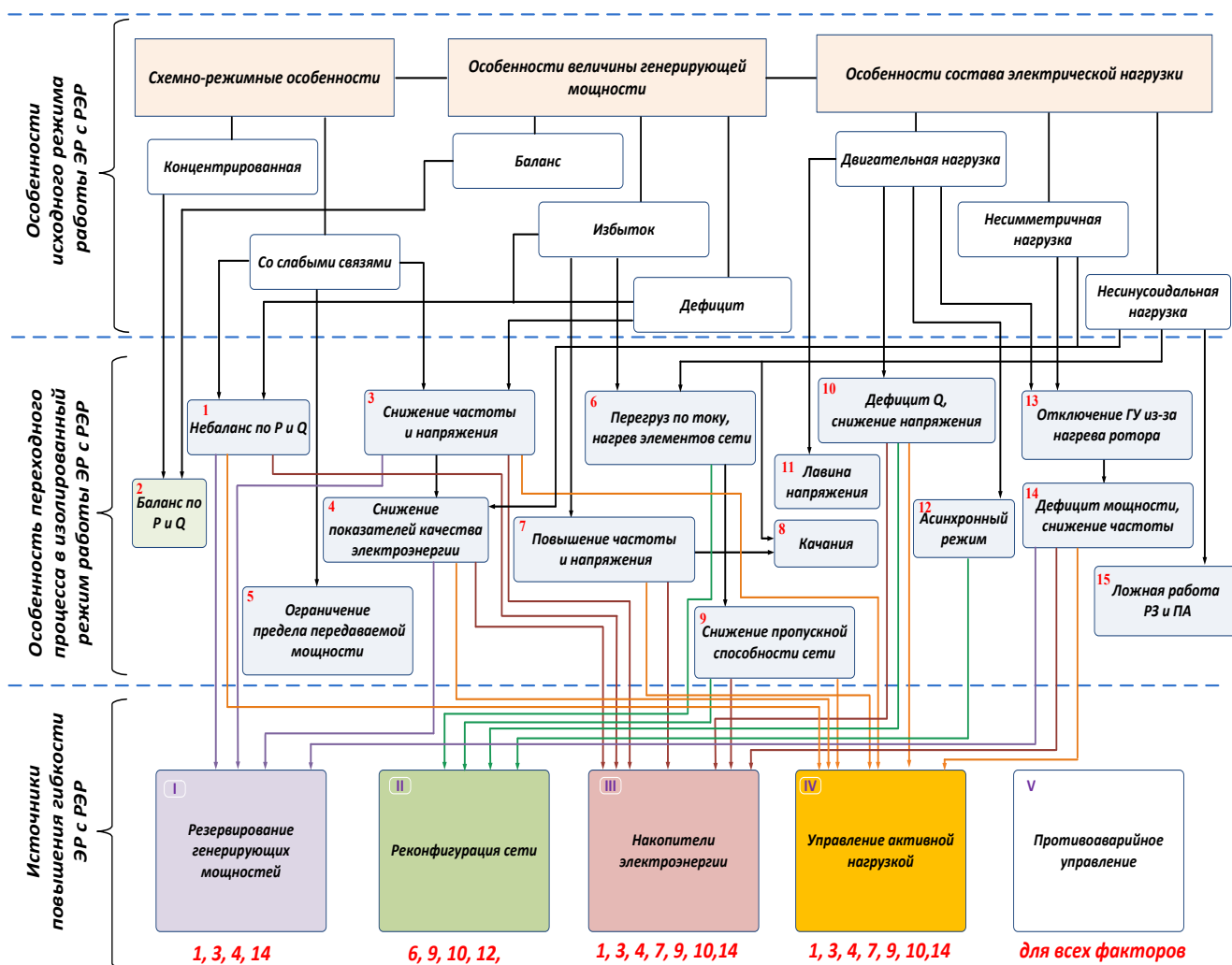


Рисунок 3 – Основные факторы, влияющие на процесс аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу, и источники гибкости, позволяющие обеспечить устойчивую и надежную работу ЭР с РЭР в послеаварийном режиме

3. Выполняется оценка величины недоотпуска от длительности перерыва в электроснабжении, которая зависит от различных факторов. Для оценки недоотпуска в качестве ключевого фактора была принята продолжительность перерыва, который определяет величину прямого ущерба для потребителей.

4. На основе полученных результатов разрабатываются меры по повышению энергетической гибкости ЭР с РЭР, которые позволят ему нормально выполнять свои функции. При этом определяются оптимальные уровни использования и сочетания этих мер.

Порядок разработки мер, направленных на повышение гибкости для обеспечения надежности работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях, реализован в виде алгоритма, представленного на рисунке 4. Алгоритм базируется на анализе последствий влияния факторов, которые воздействуют на надежную работу ЭР с РЭР в послеаварийном изолированном режиме работы.

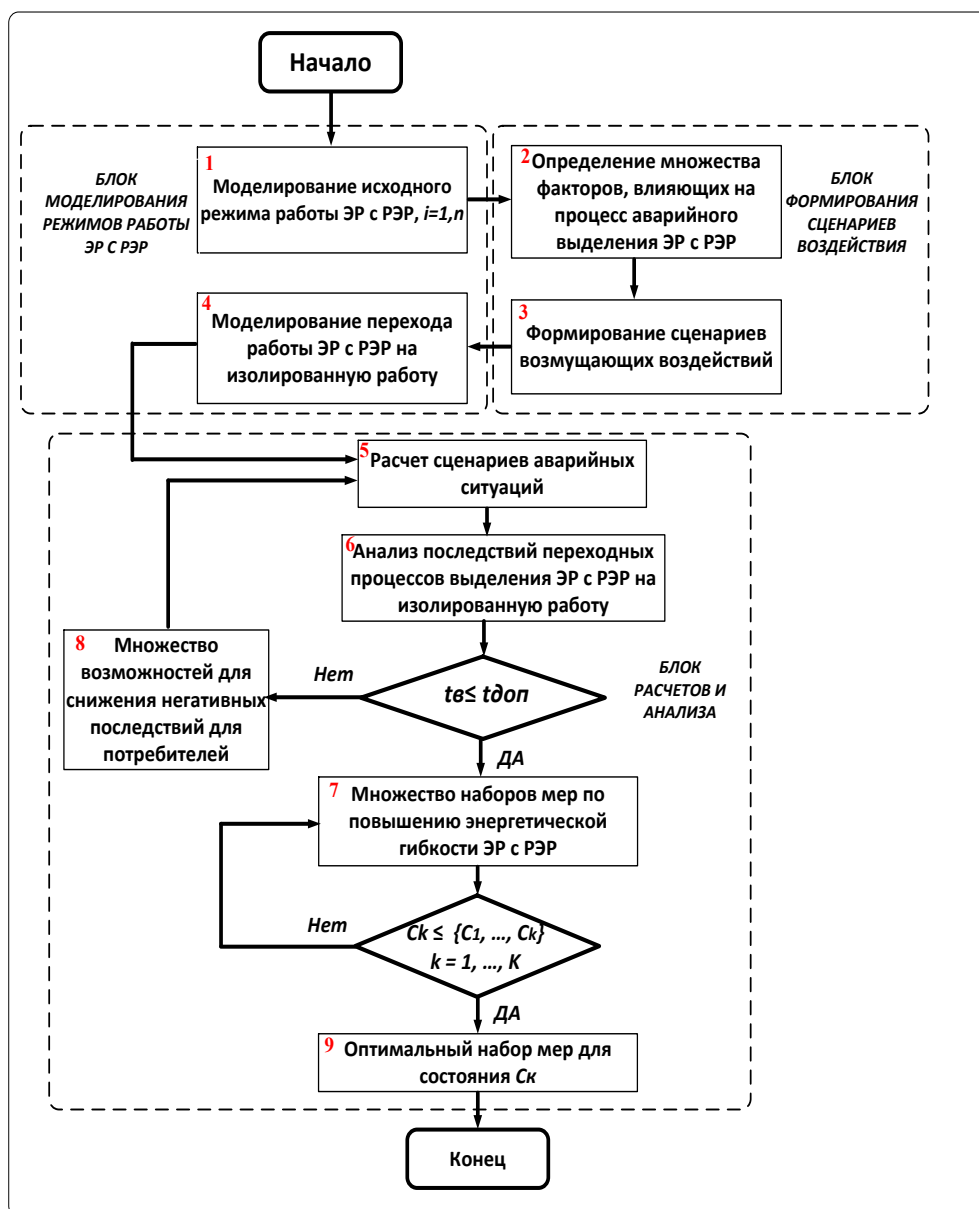


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма формирования мер повышения энергетической гибкости ЭР с РЭР ($t_{\text{в}}$ – время восстановления электроснабжения, $t_{\text{доп}}$ – допустимое время восстановления в зависимости от категории надежности электроснабжения, C_k – стоимость использования набора k -го набора мероприятий из множества K)

Алгоритм включает в себя три блока:

- **Блок моделирования режимов работы ЭР с РЭР** реализует шаги 1,4, описывающие технологические характеристики исследуемой ЭР с РЭР и учитывающие все особенности ее работы в нормальном и аварийном режимах, которые представлены на рисунке 4.

- **Блок формирования сценариев воздействия на ЭР с РЭР** реализует шаги 2 и 3, направленные на разработку сценариев возмущающих воздействий, которые могут негативно влиять на работу ЭР с РЭР. Для этого на шаге 2 определяются факторы, которые могут быть причиной аварии или могут возникнуть в процессе аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу.

▪ **Блок расчетов и анализа** содержит шаги 6, 7, 8 и 9. В этом блоке производится расчет сценариев аварийных ситуаций, при которых ЭР с РЭР переходит в режим изолированной работы, и анализируются последствия этих переходных процессов для потребителей. Затем с учетом возможностей ЭР с РЭР формируются наборы мер повышения энергетической гибкости для обеспечения надежности работы ЭР с РЭР в изолированном режиме и определяется оптимальный из них.

В качестве критериев оценки эффективности разрабатываемых мер в методическом подходе к обеспечению надежной работы ЭР с РЭР приняты *недоотпуск электроэнергии* ($\Delta \mathcal{E}$) и *время восстановления электроснабжения* потребителей ($t_в$). На рисунке 5 показана зависимость недоотпуска от времени восстановления.

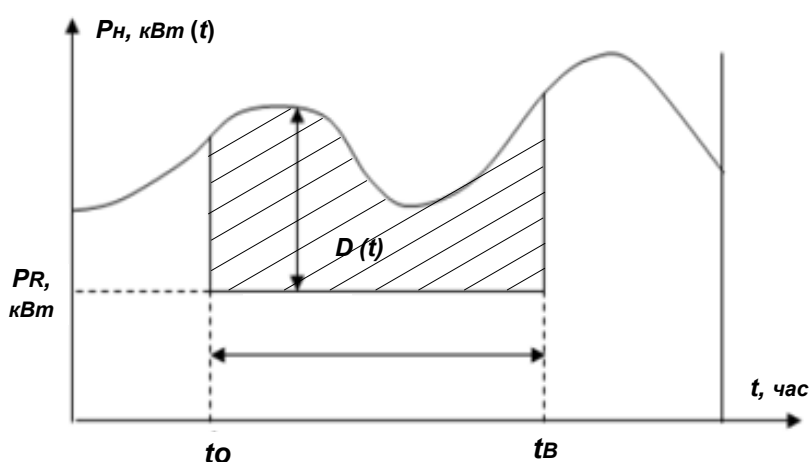


Рисунок 5 – Суточный график потребителя $P_n(t)$

Если отказ произошел в момент t_0 , а восстановление длилось $t_в$, то возникает дефицит $D(t)$, рассчитываемый по формуле (11):

$$\text{при } P_n(t) > P_R, \quad D(t) = P_n(t) - P_R, \quad (11)$$

$$\text{при } P_n(t) \leq P_R, \quad D(t) = 0,$$

где P_R – резервирующая (или сохраненная) мощность.

Тогда недоотпуск электроэнергии определится по формуле (12):

$$\Delta \mathcal{E} = \int_{t_0}^{t_0+t_в} D(t) dt. \quad (12)$$

Таким образом, реализованные в АУНАП принципы технологии управления спросом позволяют обеспечить более гибкие интеллектуальные сценарии использования дополнительной мощности в аварийных режимах работы ЭР с РЭР, тем самым органично дополняя существующие устройства ПА в комплексе ПАУ. Разработанный методический подход к повышению

энергетической гибкости для обеспечения надежности электроснабжения ЭР с РЭР в аварийных ситуациях формирует мероприятия, направленные на оптимальное использование источников гибкости.

В главе 3 проведено экспериментальное исследование предлагаемого метода послеаварийного управления нагрузкой активных потребителей и методического подхода повышения энергетической гибкости ЭР с РЭР на тестовых схемах различного назначения, модифицированных из действующих ЭР ЭЭС Дальнего Востока; проведена серия расчетов переходных процессов аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу с учетом особенностей сценариев данного процесса, рассмотренных в главе 2; проведен комплексный анализ полученных результатов и дана оценка эффективности работы АУНАП; рассмотрены перспективы внедрения АУНАП.

Тестовые схемы включают в себя питающую подстанцию 220 кВ или 110 кВ, которая связывает исследуемый ЭР с РЭР с внешней ЭЭС; источники генерирующей мощности, состоящие из теплоэлектроцентрали, объектов РГ в виде газотурбинных установок различной мощности и СНЭЭ, сети внутреннего электроснабжения с управляемой нагрузкой активных потребителей в классе 10/6/0,4 кВ.

Согласно анализу особенностей каждой тестовой схемы ЭР с РЭР в каждом узле был представлен индивидуальный состав нагрузки, при этом ответственная нагрузка была задана процентом от общей нагрузки.

В качестве примера на рисунке 6 приведена тестовая схема ЭР с РЭР городского назначения, разработанная на базе действующей схемы ЭР г. Благовещенск Амурской области.

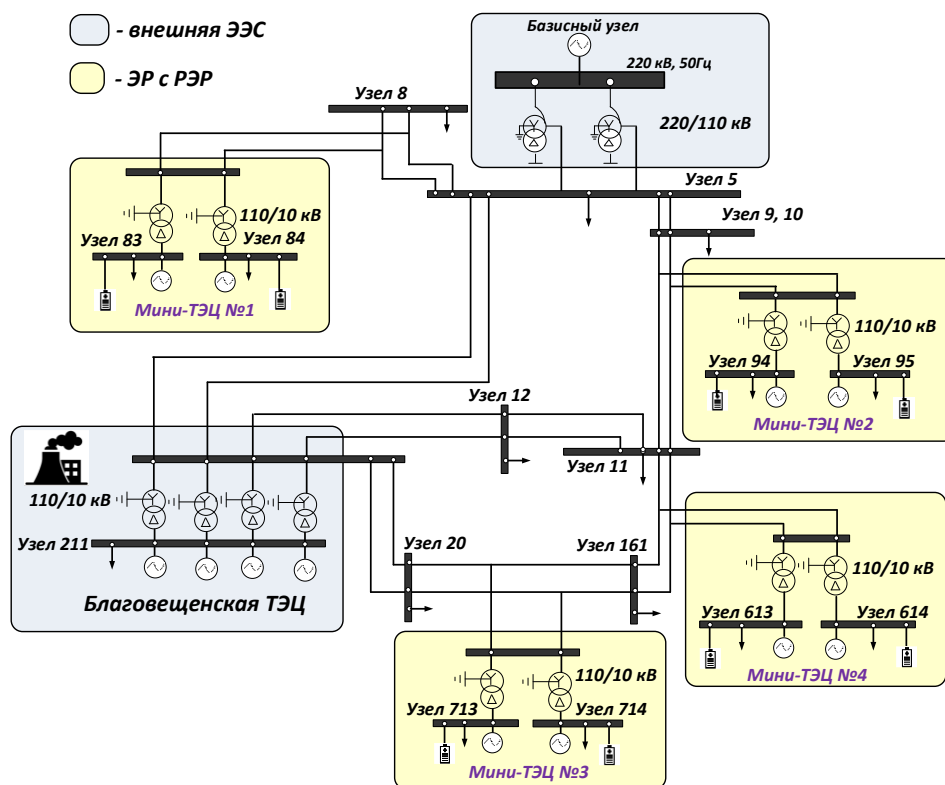
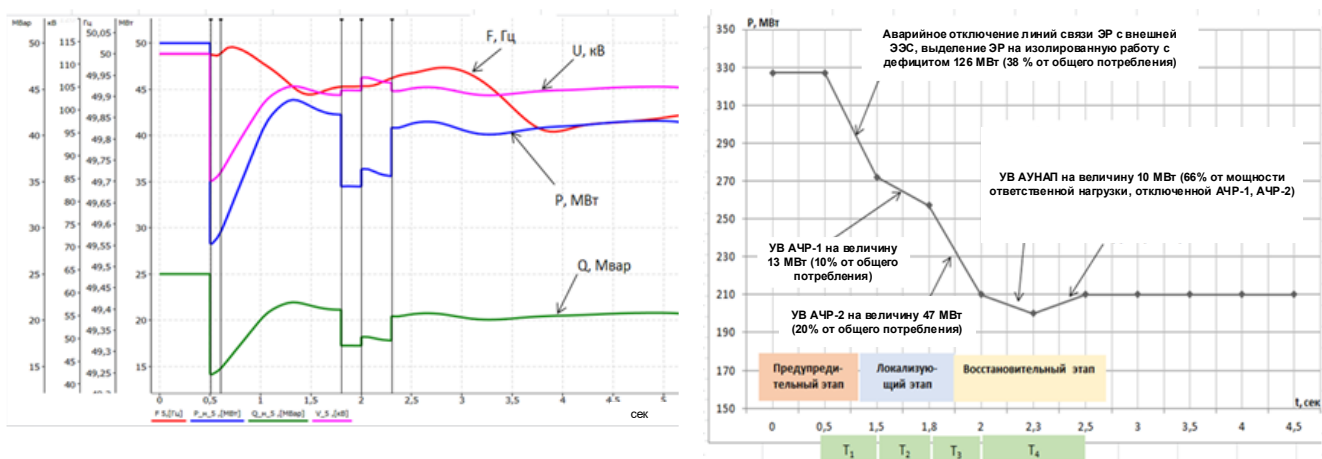


Рисунок 6 – Тестовая схема ЭР с РЭР городского назначения

Моделирование динамических процессов в исследуемых тестовых схемах было выполнено на базе ПК RUStab, квазидинамических процессов – при помощи открытой библиотеки Pandapower, которая представляет собой инструмент на языке Python.

Наиболее показательные сценарии и их результаты приведены ниже. В качестве демонстрации работы АУНАП при аварийном выделении на изолированную работу ЭР с РЭР городского назначения был взят сценарий аварии в г. Благовещенск Амурской области, которая произошла 1 августа 2017 года в результате блэкаута в данном регионе. До момента аварии дефицит мощности в рассматриваемом ЭР составлял 38%, недостающая мощность поступала из внешней ЭЭС.

На рисунке 7 показаны: а) динамика изменения частоты, напряжения и мощности, б) количественный анализ УВ устройств ПА в целом в ЭР с РЭР городского назначения при его аварийном выделении на изолированную работу.



а) диаграмма переходного процесса

б) количественный анализ УВ существующих устройств ПА и новой АУНАП

Рисунок 7 – Динамика изменения мощностей нагрузок и количественный анализ (%) УВ в ЭР с РЭР городского назначения при аварийном сценарии выделения на изолированную работу

Продолжительность (T) аварийного выделения ЭР с РЭР городского назначения на изолированную работу от момента возникновения короткого замыкания до момента установившегося послеаварийного режима работы ЭР в изолированном режиме составила 2 секунды. Временные составляющие переходного процесса приведены: T_1 – 0,5-1,5 секунды – возникновение короткого замыкания, отключение линий связи с внешней ЭЭС, возникновение дефицита мощности в ЭР с РЭР; T_2 – 1,5-1,8 секунд – работа АЧР-1; T_3 – 1,8 -2,0 секунды – работа АЧР-2; T_4 – 2,0-2,5 секунды – работа АУНАП.

На рисунке 8 приведена схема ЭР с РЭР комбинированного назначения, разработанная на базе действующей схемы ЭР г. Уссурийска и Уссурийского городского округа Приморского края. В качестве демонстрации работы АУНАП

при аварийном выделении на изолированную работу ЭР с РЭР комбинированного назначения был взят сценарий аварии, которая произошла в рассматриваемой ЭР 23 января 2023 года. Основные этапы развития данной аварии также показаны на рисунке 8. До момента аварии дефицит мощности в ЭР составлял 25%, недостающая мощность поступала из внешней ЭЭС по линиям связи с ограниченной пропускной способностью.

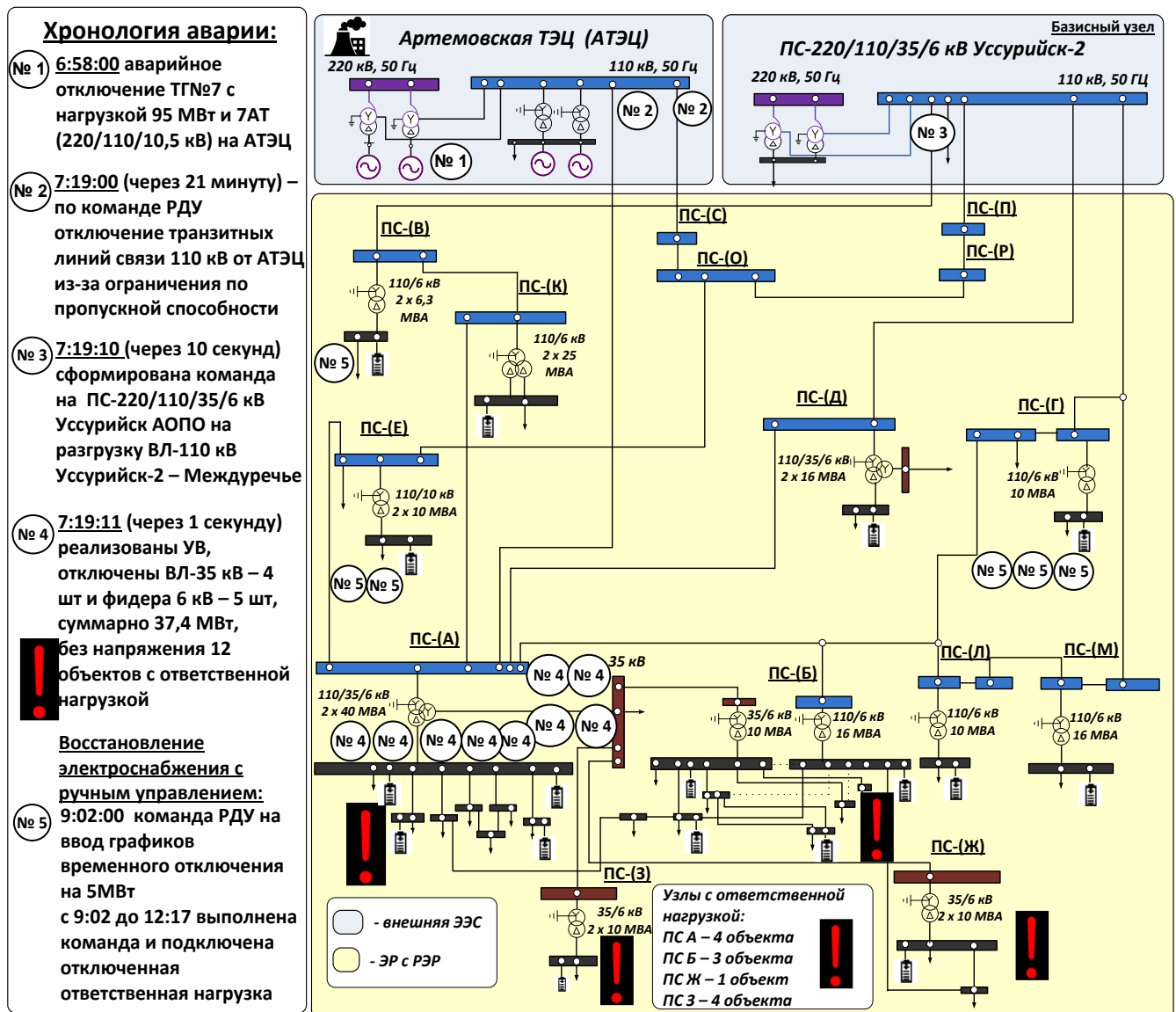
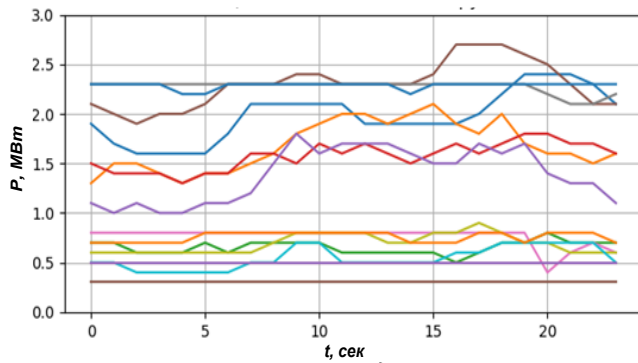


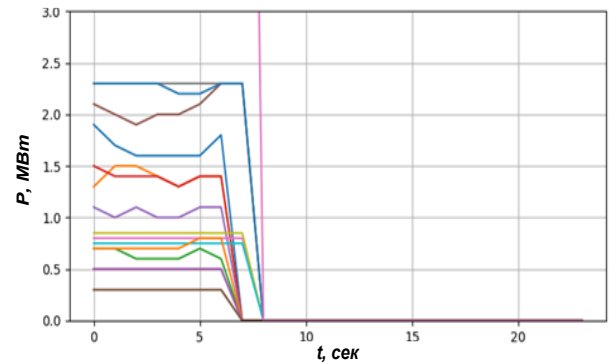
Рисунок 8 – Тестовая схема ЭР с РЭР комбинированного назначения, разработанная на базе действующей схемы ЭР г. Уссурийска и Уссурийского городского округа Приморского края с основными этапами развития и восстановления аварии 23.02.2023 года

На рисунке 9 представлена динамика изменения нагрузок и количественный анализ УВ АОПО в целом в ЭР с РЭР комбинированного назначения при аварийном сценарии с ручным управлением и восстановлением электроснабжения при помощи УВ АУНАП. Суммарное время простоя потребителей с ответственной нагрузкой при ручном управлении составило 4 часа 58 минут и

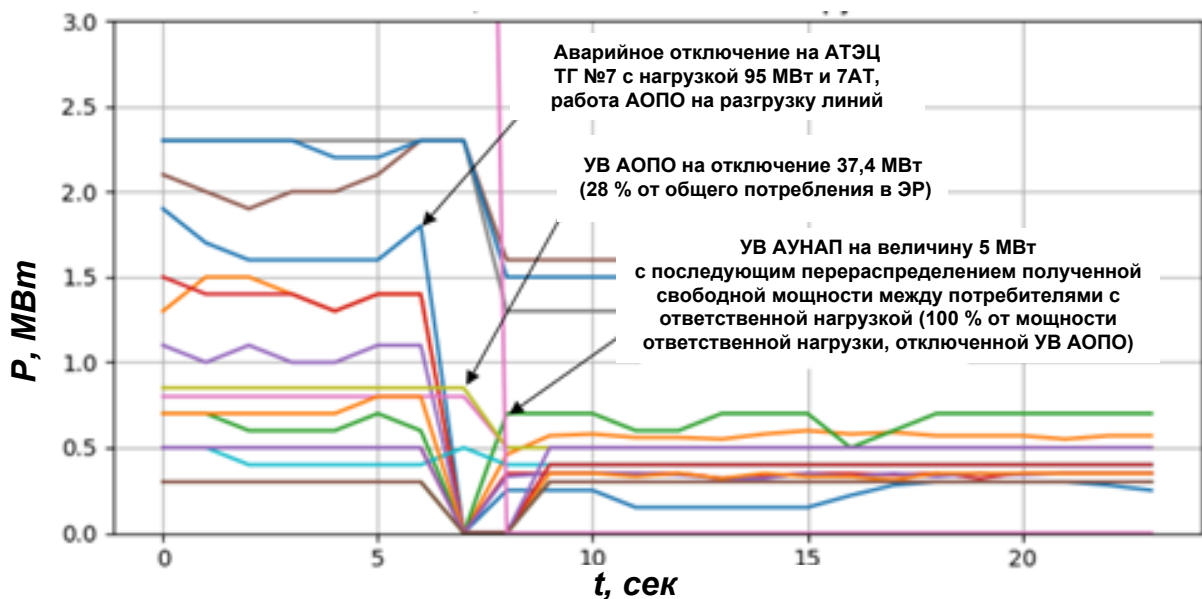
заключалось в получении дополнительной мощности путем ввода ГАО на величину 5 МВт и далее перераспределением этой мощности среди ответственных потребителей действиями дежурного оперативного персонала с временными затратами на проезд от одного объекта электроснабжения до другого. При автоматическом управлении ответственный потребитель был подключен через 8,8 секунд, что показывает эффективность и оперативность применения АУНАП в подобных ситуациях.



а) исходный режим



б) аварийный сценарий с ручным управлением



в) аварийный сценарий с участием АУНАП

Рисунок 9 – Динамика изменения мощностей нагрузок и количественный анализ (%) УВ в ЭР с РЭР комбинированного назначения при аварийном сценарии выделения на изолированную работу.

В целом проведенный расчетный эксперимент направлен на оценку влияния АУНАП на изменение напряжения в ЭР с РЭР при развитии смоделированного аварийного сценария, который представлен таблице 1.

Таблица 1 – Распределение уровней напряжений в рамках квазидинамического моделирования ЭР с РЭР комбинированного назначения для различных сценариев.

Диапазоны напряжений, отн. ед.	Исходный нормальный режим, %	Аварийный сценарий с ручным управлением, %	Аварийный сценарий с управлением АУНАП, %
$1,06 < U < 1,10$	0	2,39	2,35
$1,03 < U < 1,06$	64,3	78,5	73,8
$U < 0,99$	2,3	2,3	2,3
$U < 0,96$	0	0	0

По такому же принципу проведены практические исследования различных сценариев выделения на изолированную работу для тестовых схем ЭР с РЭР промышленного и сельскохозяйственного назначения. В таблице 2 показан комплексный анализ результатов исследований, из которого видно, что наибольшая эффективность АУНАП продемонстрирована в сценариях аварийного изолирования ЭР с РЭР городского и комбинированного назначения, что обусловлено в первую очередь суточными графиками нагрузок этих ЭР и наличием достаточного количества управляемой нагрузки активных потребителей.

Таблица 2 – Анализ УВ АУНАП при аварийном выделении тестовых схем ЭР с РЭР на изолированную работу.

	Сценарии аварийного выделения ЭР с РЭР различного назначения на изолированную работу										
	Городского				Промышленного				Сельскохозяйственного		Комбинированного
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№1
Объем УВ устройств ПА, % от объема общей нагрузки	30	39	20	30	32	35	23	23	20	31	29
Объем УВ АУНАП, % восстановленной ответственной нагрузки, отключенной устройствами ПА	66	66	70	70	20	10	13	40	30	31	100

В целом проведенные исследования в главе 3 подтвердили положительное влияние действий АУНАП на обеспечение надежного электроснабжения потребителей в послеаварийном режиме. Помимо оперативного автоматического восстановления ответственных потребителей, УВ действия АУНАП за счет автоматизированного перераспределения нагрузки сокращает время выхода на устойчивый режим, которое при ручном управлении длится дольше, что

повышает риски повреждения оборудования. В работе принято, что эффективностью работы новой автоматики АУНАП будет считаться время восстановления электроснабжения и объем восстановленной нагрузки ответственных потребителей от общей величины отключенной нагрузки в результате действий другой автоматики.

Сдерживающими факторами внедрения АУНАП является отсутствие утвержденной нормативно-технической документации, регламентирующей требования к разработке схем выдачи мощности объектов РГ в существующие ЭР, которая учитывала бы не только особенности их влияния на режимы работы прилегающей сети, но и рассматривала бы вопросы согласованной работы релейной защиты и ПА в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах функционирования ЭР с РЭР, а также отсутствие достаточной наблюдаемости сетевого оборудования электросетевой компании низкого класса напряжения (0,4/6/10 кВ) и автоматизации технологических процессов.

Основными перспективами реализации АУНАП являются повышение мониторинга режима потребления ответственной и второстепенной нагрузки; автоматическое перераспределение полученной дополнительной мощности в аварийных ситуациях для обеспечения надежного электроснабжения ответственных потребителей; автоматическое формирование графиков аварийного ограничения потребления электроэнергии для реализации команд АО «СО ЕЭС» на их ввод при возникшем дефиците мощности и отключение более избирательно нагрузки потребителей, не затрагивая ответственных потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационной работы являлась разработка принципов и метода автоматического управления нагрузкой активных потребителей для обеспечения надежности электроснабжения. В результате исследований решены следующие задачи:

1. Установлено, что при переходе существующих ЭЭС к ИЭС остается актуальным вопрос обеспечения надежности электроснабжения потребителей при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу. На основании проведенного анализа выявлено, что существующие устройства ПА в комплексе ПАУ имеют ряд несовершенств в части неселективности отключения нагрузки потребителей. Их УВ для сохранения быстродействия направлены на отключение нагрузки высшего класса напряжения (6/10/35/110 кВ) и не учитывают сохранение питания ответственных потребителей от самого низкого класса напряжения (0,4 кВ), что приводит к обесточению ответственных потребителей. В условиях низких зимних температур нашей страны это создает риск выхода из строя важных объектов жизне-, тепло-, водообеспечения населения. Обоснована необходимость в разработке новых методов обеспечения надежной работы ЭР с РЭР в аварийных ситуациях и гарантированного электроснабжения ответственной нагрузки.

2. В качестве нового метода обеспечения надежности электроснабжения потребителей при аварийном выделении на изолированную работу ЭР с РЭР

предложена новая автоматика АУНАП и комплексный методический подход повышения энергетической гибкости ЭР с РЭР, позволяющий оптимизировать работу имеющихся в ЭР интеллектуальных энергетических технологий.

3. На основании анализа мирового опыта использования технологии управления спросом разработаны принципы, математическая модель и алгоритмы работы новой автоматики АУНАП, реализующие более интеллектуальные сценарии отключения нагрузки потребителей. АУНАП реализована на принципе предоставления активными потребителями на договорных условиях дополнительной мощности за счет снижения собственного потребления либо ввода в работу из резерва собственных источников генерации. Разработанная математическая модель решает задачу поиска и перебора вариантов дополнительной мощности для ее перераспределения между потребителями путем минимизации целевой функции с учетом приоритетности подключения ответственной нагрузки.

4. Предложены методические положения согласования действий существующих устройств ПА в комплексе ПАУ и предлагаемой новой автоматики АУНАП при аварийном выделении ЭР с РЭР на изолированную работу, которые на восстановительном этапе ликвидации аварийной ситуации исключают риск повторного нарушения устойчивости по напряжению и частоте при оперировании дополнительной мощностью и обеспечивают селективность работы АУНАП.

5. В качестве основы разработанного методического подхода к повышению энергетической гибкости для обеспечения надежности работы ЭР с РЭР использован анализ последствий для потребителя в результате аварийного выделения ЭР с РЭР на изолированную работу, который выполняется с учетом факторов, определяющих особенности переходных процессов. Предложенный подход был применен в экспериментальной части диссертации при моделировании аварий, происшедших в действующих ЭЭС Амурской области и Приморского края при аварийном выделении на изолированную работу некоторых ЭР в данных регионах. Анализ результатов показал, что предложенный в подходе алгоритм позволил сформировать оптимальный набор источников гибкости и восстановить 66 % нагрузки в тестовой схеме Амурской области и 100 % нагрузки в тестовой схеме Приморского края ответственных потребителей и сократить время восстановления их электроснабжения с нескольких часов до нескольких секунд.

6. Эффективность разработанной новой автоматики АУНАП подтверждена расчетами различных сценариев аварийного выделения на изолированную работу ЭР с РЭР на тестовых схемах различного назначения, модифицированных на основе реальных ЭР ЭЭС Дальнего Востока, с использованием разработанного оригинального инструмента в среде Python, реализующего алгоритмы работы АУНАП.

7. Выполнен комплексный анализ результатов, полученных в экспериментальной части диссертации, на основе которого доказано, что АУНАП обеспечивает надежное электроснабжение потребителей в условиях аварийного дефицита мощности. Помимо оперативного автоматического восстановления

ответственных потребителей УВ действия АУНАП за счет автоматизированного перераспределения нагрузки сокращает время выхода на устойчивый режим, которое при ручном управлении длится дольше, что повышает риски повреждения оборудования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

1. **Чулюкова, М. В.** Анализ развития системной аварии в ОЭС Востока 1 августа 2017 г / Н. И. Воропай, М. В. Чулюкова // *Электричество*. – 2018. – № 5. – С. 28–32.
2. **Чулюкова, М. В.** Противоаварийное управление нагрузкой для обеспечения гибкости электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, М. В. Чулюкова // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24, № 4 (153). – С. 781–794.
3. **Чулюкова, М. В.** Особенности координации систем автоматики в процессе аварийного выделения на изолированную работу систем электроснабжения с распределенной генерацией / В. Г. Курбацкий, М. В. Чулюкова // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2023. – № 2 (77). – С. 86–93.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS и/или Web Of Science:

4. **Chulyukova, M. V.** Transient Stability Problems of Electric Power Systems with Distributed Generation / N. I. Voropai, M. V. Chulyukova // *Сборник докладов 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* – 2018. – P. 8602504.
5. **Chulyukova, M.** Flexibility enhancement in an islanded distribution power system by online demand-side management / N. Voropai, **M. Chulyukova** // *EPJ Web of Conferences – EDP Sciences*. – 2019. – Vol. 217. – P. 01020.
6. **Chulyukova, M. V.** Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems / N. I. Voropai, **M. V. Chulyukova**, A. A. Petrov // *IFAC – PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55. – № 9. – P.12–17.

Публикации в других изданиях:

7. **Chulyukova, M. V.** Some Generalizations of an Analysis of 2016–2017 Blackouts in the Unified Power System of Russia / D.N Efimov, N.I. Voropai, A.B. Osak, **M.V. Chulyukova** // *Energy Systems Research* – 2020. – Vol. 3. – №.20. – P. 5–12.
8. **Чулюкова, М. В.** Системная авария в ОЭС Востока 1 августа 2017: хронология и анализ событий // *Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки*. – 2018. – № 81. – С. 98–101.
9. **Чулюкова, М. В.** Особенности моделирования процессов выделения на изолированную работу систем электроснабжения с распределенной генерацией в

аварийных условиях // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов – Благовещенск, 2019. – С. 212–216.

10. **Чулюкова, М. В.** Современные аспекты противоаварийного управления нагрузкой в условиях трансформации электроэнергетических систем / А. А. Казакул, **М. В. Чулюкова** // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск, 2022. – С. 191–194.

11. **Чулюкова, М. В.** Управление нагрузкой потребителей для обеспечения надежности электроснабжения / В. Г. Курбацкий, **М. В. Чулюкова** // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – №74. – 2023. – С. 329–340.

12. **Чулюкова, М. В.** Актуальные подходы к обеспечению надежности электроснабжения потребителей // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2024. – № 105. – С. 120–125.

13. **Чулюкова, М. В.** Метод автоматического управления нагрузкой активных потребителей для послеаварийного восстановления электроснабжения / **М. В. Чулюкова**, Н.В. Томин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – №. 76. – 2025. – С. 411–423.

Подписано в печать 06.02.2026. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,75.

Тираж 120 экз. Зак. 05-09к.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83