

На правах рукописи



ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧЕЙ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АДАПТИВНЫХ
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и
электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Омск – 2021

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

**Официальные
оппоненты:**

Манусов Вадим Зиновьевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

Крюков Андрей Васильевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта».

Шевлюгин Максим Валерьевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта».

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Защита диссертации состоится 12 мая 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.178.12, созданного на базе Омского государственного технического университета, по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте <http://omgtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Гиршин Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Система электроснабжения железнодорожного транспорта Российской Федерации (холдинга «РЖД») является крупнейшей в России в части оказания услуг по передаче и распределению электроэнергии стационарным потребителям.

В соответствии со стратегией развития электросетевого комплекса Российской Федерации, разработанной на период до 2030 года, концепцией единой технической политики холдинга «РЖД», стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года, с приоритетными направлениями «Надежные и гибкие сети», «Распределенная энергетика» Национальной технологической инициативы EnergyNet основным направлением развития систем электроснабжения стационарных потребителей железных дорог является совершенствование методов управления передачей и распределением электроэнергии в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем на основе технологических решений автоматизации и управления цифровых тяговых подстанций и интеллектуальных электрических сетей, в том числе связанных с координацией и адаптацией характеристик распределённых устройств регулирования параметров режима, источников генерации (накопления) и потребления электроэнергии для обеспечения снижения потерь, повышения качества электроэнергии и надежности снабжения потребителей.

Реализация технологических решений для автоматизации и управления цифровых тяговых подстанций и системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог требует решения комплекса научных проблем, связанных с разработкой и созданием методов, принципов, алгоритмов и средств функционирования интеллектуальных электрических сетей железнодорожного транспорта. Согласно утвержденной в 2020 г. концепции цифровой тяговой подстанции (п. 6.5) системы ее оперативно-технологического управления должны обеспечивать поддержку следующих технологий: управление тяговым и нетяговым электроснабжением, в том числе и электроснабжением сторонних стационарных потребителей в части идентификации состояния режима, управления переключениями коммутационных аппаратов (реконфигурация электрической схемы) в автоматическом режиме и (или) в режиме советчика энергодиспетчера (в том числе после аварийных отключений); автоматическое и (или) автоматизированное изменение схемы питания и секционирования и (или) схем электроснабжения линий электропередачи и (или) схем электроснабжения сторонних потребителей и (или) схемы внешнего электроснабжения; автоматическое управление нагрузкой по активной мощности накопителей, генераторов, управление спросом активных потребителей; автоматическая диспетчеризация оперативного управления электросетевыми контроллерами просьюмеров и режимами работы электрических сетей, включающей объекты микрогенерации, в условиях неполноты информации с использованием искусственного интеллекта; автоматическое координированное поддержание оптимальных (квазиоптимальных) уровней напряжения в тяговой и распределительных сетях системы электроснабжения; возможность выполнения как централизованной, так и распределенной оптимизации режима по напряжению и активной/реактивной мощности с учетом измеренных потерь, в том числе за счет активных потребителей/тяговых нагрузок; автоматическое координированное интеллектуальное управление средствами регулирования напряжения и средствами компенсации реактивной мощности, системами FACTS, системами накопления электроэнергии, генерацией/рекуперацией, активными потребителями для ведения нормальных, аварийных и

послеаварийных режимов в реальном времени; автоматическое управление спросом активных потребителей и отключениями/ограничением нагрузок по логическим условиям для управления нормальными и послеаварийными режимами; применение алгоритмов самоорганизации, экспертных систем и алгоритмов прогнозирующего управления распределенными энергообъектами на основе обработки больших данных.

Реализация утвержденной концепции цифровой тяговой подстанции позволит автоматизировать управление двумя основными технологическими процессами в системе электроснабжения железных дорог: передача и распределение электроэнергии на тягу поездов и нетяговым потребителям для повышения надежности и энергетической эффективности системы электроснабжения; оперативное управление и техническое обслуживание объектов системы электроснабжения. Одной из базовых технологий интеллектуальных систем цифровой тяговой подстанции являются многоагентные интеллектуальные системы управления для создания адаптивных самовосстанавливающихся систем электроснабжения железных дорог.

К настоящему времени научная проблематика в рамках реализации указанной концепции находится на этапе разработки и имеет значительный потенциал развития.

Данная работа посвящена совершенствованию методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог для реализации функций системы оперативно-технологического управления согласно концепции цифровой тяговой подстанции и интеллектуальных электрических сетей.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в разработку методов снижения потерь, повышения качества электроэнергии, управления режимами в системах электроснабжения, внесли ученые Аввакумов В. Г., Агунов А. В., Арзамасцев Д. А., Бородулин Б. М., Бадер М. П., Бардушко В. Д., Бартоламей П. И., Бурков А. Т., Веников В. А., Гамм А. З., Горнштейн В. М., Демирчян К. С., Дынькин Б. Е., Дрехслер Р., Ермоленко Д. В., Жарков Ю. И., Жежеленко И. В., Железко Ю. С., Зиновьев Г. С., Карякин Р. Н., Крогерис А. Ф., Кучумов Л. А., Ли В. Н., Лурье Е. С., Мамошин Р. Р., Мельников Н. А., Маевский О. А., Манусов В. З., Пантелеев В. И., Тимофеев Д. В., Хрущев Ю. В., Черемисин В. Т., Шидловский А. К. и другие ученые.

Вопросы оценки эффективности применения накопителей энергии в системе тягового электроснабжения железнодорожного транспорта и метрополитена, расчет их параметров, мест установки, методы оптимизации режимов исследованы в работах Гречишников В. А., Шевлюгина М. В. Широкий круг задач, связанный с разработкой алгоритмов управления локальными регуляторами напряжения, устройствами компенсации реактивной мощности, устройствами продольной компенсации системы тягового электроснабжения и стационарных потребителей железных дорог, в том числе с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и распределенной генерацией, решаются в работах ученых Аржанникова Б. А., Германа Л. А., Закарюкина В. П., Крюкова А. В. и других ученых.

Научные исследования в области разработки активных энергетических комплексов, системы электроснабжения с применением ВИЭ и накопителями электроэнергии, включая разработку системы предиктивного управления зарядом и разрядом батарей на основе прогнозов генерации и потребления, обеспечение устойчивости в электрических сетях с источниками распределенной генерации (просьюмеров) при их параллельной работе с сетью, тенденции развития электроэнергетики на базе распределенной генерации, технико-экономические проблемы использования нетрадиционной энергетики, управление напряжением с источниками распределенной генерации в

электроэнергетических системах, противоаварийное управление с опережающим делением электрической сети с источниками распределенной генерации, разработки гибридных автономных систем электроснабжения с ВИЭ, с ветро-дизельными установками выполняют ученые Волошин А. А., Воропай Н. И., Велькин В. И., Елистратов В. В., Лоскутов А. Б., Лукутин Б. В., Подковальников С. В., Фишов А. Г. и другие.

Вопросы создания интеллектуальных электроэнергетических систем нашли отражение в работах зарубежных ученых Budenau C., Moore W., Niknam T., Zare M., Aghaei J., Morattab A., Akhrif O., Saad M., Alobeidli K., Moursi S., Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. и др.

Несмотря на значительное количество работ и научных исследований по отдельным аспектам проблем функционирования интеллектуальных электроэнергетических систем, в том числе железнодорожного транспорта, комплексные вопросы создания информационно-управляющих систем в рамках реализации принятых концепций «Цифровая тяговая подстанция», «Цифровая железная дорога» имеют значительный потенциал развития, особенно в части создания адаптивных методов и технологий цифровых тяговых подстанций и интеллектуальных электрических сетей применительно к системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

Данная работа посвящена совершенствованию методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог для реализации функций системы оперативно-технологического управления согласно концепции цифровой тяговой подстанции и интеллектуальных электрических сетей.

Цель работы – повышение эффективности функционирования системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог путем совершенствования методов управления передачей и распределением электроэнергии, основанных на адаптивных технологиях цифровых тяговых подстанций и интеллектуальных электрических сетей.

Задачи исследования.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Выполнить системный анализ текущего состояния системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог и обосновать требования к перспективным интеллектуальным методам управления передачей и распределением электрической энергии.

2. Разработать метод управления системой электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на базе мультиагентного подхода.

3. Усовершенствовать метод адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях железных дорог.

4. Создать методы управления потоками мощности для снижения потерь электроэнергии, повышения пропускной способности транспортных каналов и восстановления нормального режима в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

5. Разработать интеллектуальные электронные устройства на основе усовершенствованных методов в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

6. Выполнить имитационное моделирование и апробацию разработанных методов в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог и оценить технико-экономическую эффективность предлагаемых технических решений.

Объект исследования – система электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с трансформаторными и тяговыми подстанциями, распределительными электрическими сетями среднего и низкого уровня напряжений, источниками генерации (накопления) мощности.

Предмет исследования – разработка методов координированного управления устройствами регулирования параметров режима, источниками генерации (накопления) активной и реактивной мощности в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе адаптивных технологий цифровых тяговых подстанций и интеллектуальных электрических сетей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода, дополненный средствами прогнозирования изменений параметров режима и самоорганизации (адаптации) с изменяемой зоной ответственности.

2. Усовершенствован метод адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях железных дорог, основанный на определении величины воздействий в виде приращений активной и реактивной мощности путем координации распределённых источников генерации (накопления) электроэнергии, разнотипных регуляторов напряжения и мощности с учетом их технических особенностей (ступенчато, плавно-регулируемые).

3. Предложен метод управления потокораспределением и повышением пропускной способности транспортных каналов системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, основанный на реконфигурации электрических схем без расчета установившихся режимов, оптимальной выработки (накопления) активной и реактивной мощности и управления спросом активных потребителей.

4. Предложены схемные решения и получены законы управления регулируемым силовым трансформатором, позволяющие снижать потери холостого хода при малых нагрузках.

5. Разработан алгоритм управления спросом активных потребителей с привязкой к технологическому процессу ремонтного железнодорожного предприятия во взаимосвязи с генерацией, накоплением электроэнергии и дифференциацией нагрузок по значимым факторам.

6. Усовершенствован метод восстановления нормального режима системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающий дифференциацию подключенных нагрузок на всем контролируемом участке электрической сети путем деления-реконфигурации схемы его питания с корректировкой параметров режима источниками генерации (накопления) мощности.

7. Предложен новый подход к построению интеллектуальных электронных устройств для регулирования напряжения, мощности, автоматического восстановления нормального режима в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, основанный на наличии в указанных устройствах модулей координации и доказана работоспособность предложенных устройств и алгоритмов в условиях действующих предприятий.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют собой новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, направленные на повышение энергоэффективности системы электроснабжения стационар-

ных потребителей железных дорог на основе технологий автоматизации и управления цифровых подстанций, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что:

1. Метод управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода может быть использован при создании системы оперативно-технологического управления цифровыми тяговыми подстанциями.

2. Методы и алгоритмы автоматического управления напряжением, потоками мощности, восстановлением нормального режима за счет реконфигурации электрических схем, координированного управления выработкой активных (накопители, генерация) и реактивных мощностей и спросом активных потребителей позволяют усовершенствовать информационно-технологические и управляющие системы электроснабжения железных дорог и электросетевых компаний.

3. Подходы к управляемому снижению потерь холостого хода в силовых трансформаторах с учетом их загрузки послужили основой для разработки схемных решений секционирования обмоток силовых трансформаторов, которые могут найти применение в системах электроснабжения.

4. Усовершенствованные методы управления передачей и распределением электроэнергии позволили создать прототип интеллектуального электронного устройства в виде программно-технического комплекса, применение которого позволит повысить энергоэффективность адаптивных систем электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

Практическая значимость работы подтверждается актами об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве.

Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы проверена и подтверждается совпадением результатов имитационного и численного моделирования с результатами физических экспериментальных данных, полученных с использованием сертифицированного оборудования, приборов по измерению показателей качества электрической энергии (расхождение результатов не превышает 5 %), а также положительными результатами внедрения предложенных методов и технических решений на действующих объектах.

Теоретические результаты получены на основе корректного использования известных методов расчета установившихся режимов, методов оптимизации и математического аппарата мультиагентных систем, специализированного программного обеспечения.

Методы исследования.

Решение поставленных задач базировалось на использовании расчета установившегося режима электрической сети методом узловых напряжений в форме баланса мощностей, интегрального и дифференциального исчисления, метода ветвей и границ, численных методов аппроксимации экспериментальных данных, теории графов, мультиагентного управления, прогнозирования на основе регрессионного анализа, методов имитационного моделирования с использованием программных пакетов Matlab, AnyLogic, C++.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения железных дорог на основе мультиагентного подхода.

2. Метод автоматического регулирования напряжения в распределительной

электрической сети железных дорог на основе координированного управления распределенными регуляторами с учетом их технических особенностей.

3. Метод управления потоками мощности в распределительных электрических сетях железных дорог.

4. Метод восстановления нормального режима системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

5. Схемные решения и законы управления регулируемым силовым трансформатором, позволяющие снижать потери холостого хода при малых нагрузках.

6. Предлагаемый подход к построению интеллектуальных электронных устройств для регулирования напряжения, мощности, автоматического восстановления нормального режима в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

Реализация результатов работы.

Научные результаты диссертации апробировались и внедрялись во Входящей, Омской, Барабинской, Новосибирской, Инской, Карасукской дистанций электроснабжения – структурных подразделениях Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», территориальных сетевых организациях ПАО МРСК Сибири – Омскэнерго, АО «ОНИИП», АО «Омкшина», ООО «Таврида Электрик Омск».

Отдельные положения диссертации включены в учебный процесс Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) для аспирантов и слушателей повышения квалификации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

П. 8. Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике.

П. 10. Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов.

П. 13. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались на всероссийских и международных конференциях, тематика которых соответствовала направлению диссертационного исследования, в том числе на международных симпозиумах «Eltrans – 2011, 2017» (г. Санкт-Петербург); международной научно-технической конференции Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, 2009); международных научно-технических конференциях Омского государственного технического университета (Омск, 2010, 2017); международных научно-технических конференциях Омского государственного университета путей сообщения (Омск, 2010, 2013, 2014, 2016, 2018, 2020, 2021); международной научно-технической конференции Уральского государственного университета путей сообщения (Екатеринбург, 2011); международной научно-практической конференции Самарского государственного университета путей сообщения (Самара, 2013); международных научно-практических конференций Иркутского государственного университета путей сообщения (Иркутск, 2014, 2015, 2018, 2019, 2020); международных научно-практических конференциях Юго-Западного государственного университета,

(Курск, 2015, 2017, 2019, 2020); международной научно-практической конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, 2019).

Личный вклад соискателя.

Личный вклад автора диссертации в совместных публикациях с соавторами составляет не менее 60 %. Личный вклад заключается в постановке целей и задач исследований, теоретическом и методическом обосновании путей их решения, обобщении и интерпретации результатов исследования.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 89 печатных работ, в том числе 24 работы в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, 4 патента РФ на полезную модель и 1 патент РФ на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 2 монографии, 11 статей, индексируемых в базе Scopus.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 231 наименований, четырех приложений, содержит 403 страницы машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследования и цель работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен системный анализ текущего состояния системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог и обоснованы требования к перспективным методам управления передачей и распределением электрической энергии, обеспечивающим повышение их энергоэффективности на основе технологий автоматизации и управления цифровых подстанций.

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований качества электрической энергии, отчетных потерь электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, свидетельствующий о недостаточной пропускной способности и перегрузке кабельных, воздушных линий и трансформаторов, высоких фактических потерях электроэнергии и низком ее качестве.

Исследованы особенности построения системы управления электроснабжением железнодорожного транспорта и региональных электросетевых компаний. В настоящее время основой управления параметрами режима системы электроснабжения является оперативно-диспетчерское управление переключениями, выполняемое, как правило, персоналом.

Выполнена сравнительная оценка способов и технических средств повышения качества и снижения потерь электроэнергии в электроэнергетических системах, а также уровня технической оснащенности указанными средствами системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог.

Установлено, что существующие системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог напряжением 110/35/10/6/0,4 кВ, выполненные в виде иерархических структур от источника к нагрузке (рис. 1), имеют низкую наблюдаемость параметров режима, недостаточную оснащенность линейными регуляторами и элементами автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций для повышения энергоэффективности процессов передачи и распределения электрической энергии.

На основе анализа состояния системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обоснования технических требований к перспективным методам управления передачей и распределением электрической энергии с системами накопления, генерации активной и реактивной мощности, активными потребителями в части надежности, быстродействия, функциональности сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Основные требования к адаптивной системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе технологии «умных» сетей:

- высокая надежность электроснабжения и качество электроэнергии;
- высокая наблюдаемость, управляемость процессами и устройствами системы электроснабжения;
- адаптивность к возмущающим воздействиям, включая процессы распределенного накопления (генерации) / потребления активной и реактивной мощности, коммутации и пр. при поддержании оптимальных параметров режима;
- самовосстановление при аварийных ситуациях.

Основная научная проблема, на решение которой направлено исследование, заключается в создании адаптивных самовосстанавливающихся систем электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с распределенными регуляторами различного типа (коммутационное оборудование, компенсирующие устройства, накопители и пр.) в контексте технологий автоматизации и методов управления цифровых тяговых подстанций. Указанная проблема применительно к системам электроснабжения стационарных потребителей железных дорог может быть разрешена на основе решения взаимосвязанных задач диссертационной работы.

Во второй главе разработан метод управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода, дополненный средствами прогнозирования изменений параметров режима и самоорганизации (адаптации) с изменяемой

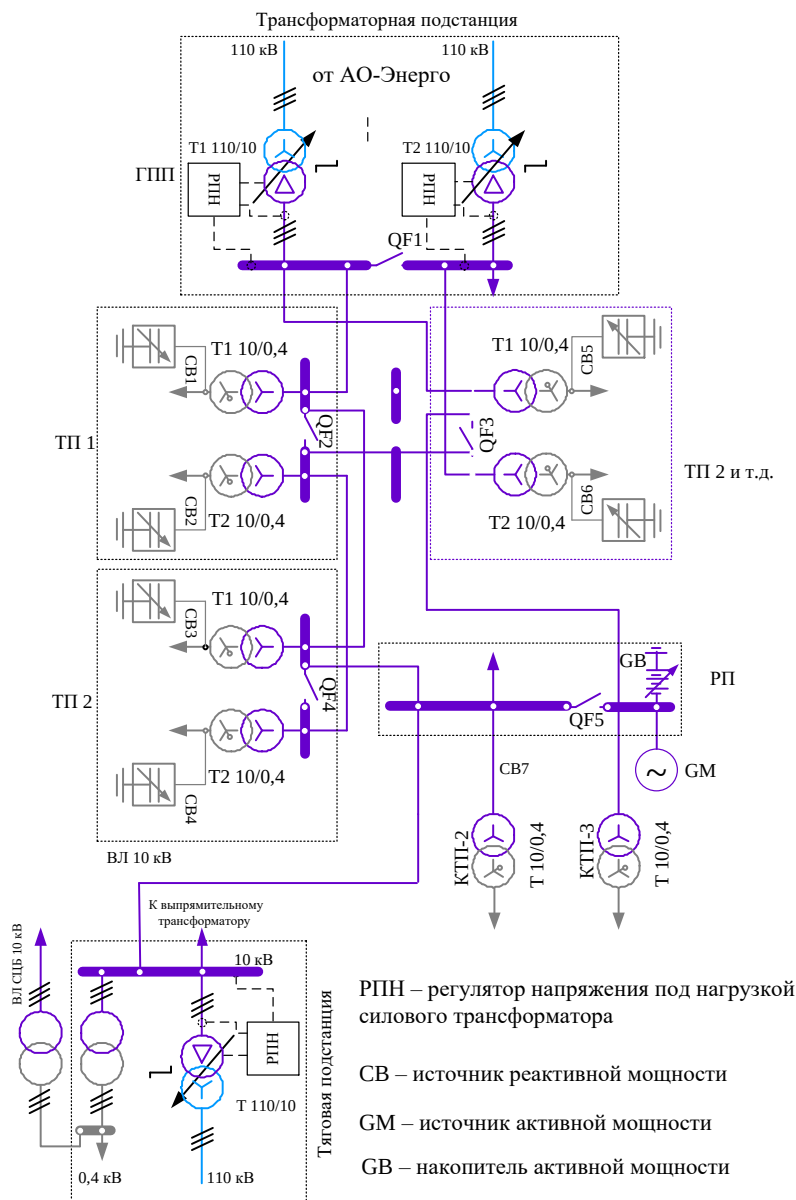


Рис. 1. Система электроснабжения стационарных потребителей железных дорог

зоной ответственности, обеспечивающий получение новых результатов по теме диссертации. Указанный метод защищен патентом РФ на изобретение.

В качестве теоретической базы указанного метода обоснована концепция управления энергообъектами на основе мультиагентного управления. В качестве объектов управления параметрами режима в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог выступают: РПН трансформаторов 110, 35, 10 кВ (при наличии), поперечные устройства компенсации реактивной мощности (плавно и ступенчато регулируемые), вольтодобавочные трансформаторы, устройства силовой электроники, источники распределенной генерации, накопители, коммутационные аппараты, активные потребители.

Разработанный метод интеллектуального управления системой электроснабжения стационарных потребителей железных дорог позволяет реализовывать алгоритмы, функционал информационно-управляющих интеллектуальных систем, соответствующих концепции цифровой тяговой подстанции, основан на мультиагентном подходе. Распределенными управляющими элементами являются локальные агенты и агенты-координаторы в рамках двухуровневой архитектура построения системы управления.

Разработана архитектура управления рассматриваемой системой электроснабжения (рис. 2). Все локальные контроллеры, исполнительные и измерительные устройства, управляющие контроллеры соединены с шиной процесса и станционной шиной, с внешней системой управления и виртуальной моделью сети в границах энергодиспетчерского пункта по стандартным коммуникационным протоколам. Управляющие контроллеры могут быть реализованы в виде программно-технического комплекса (на базе промышленного компьютера), локальные – как правило, на базе контроллера. Предложено разделение агентов-координаторов по функциональному назначению (управление напряжением, потоками мощности и пр.). Это позволяет создавать приоритетные группы локальных агентов для реализации соответствующих функций.

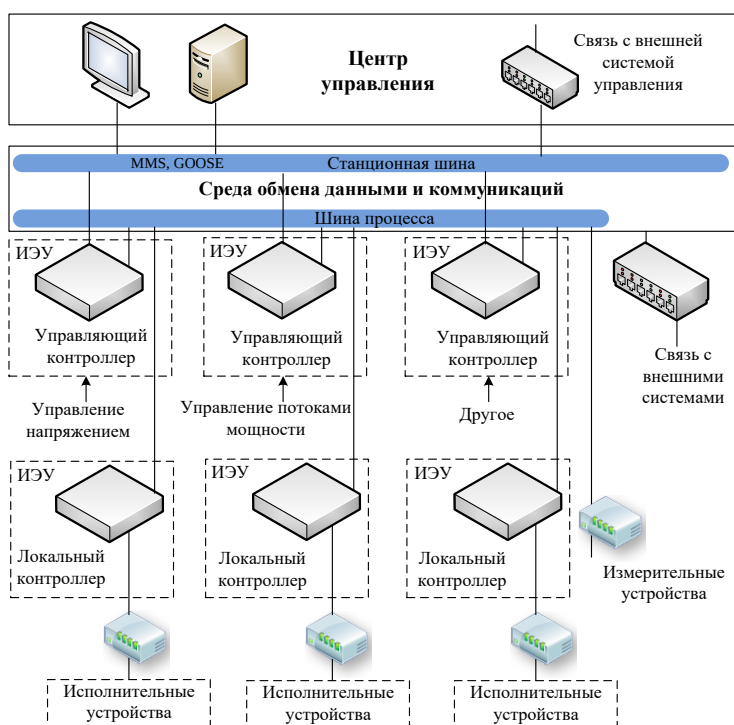


Рис. 2. Архитектура управления рассматриваемой системой электроснабжения

Представлено описание компонентов мультиагентной системы управления применительно к системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, включая модель онтологии. К указанным компонентам отнесены: агенты, агенты-координаторы, множество задач, среда, множество отношений между агентами, множество действий над агентами.

В качестве локальных контроллеров-агентов исполнительных устройств выступают локальные контроллеры оборудования (локальное управление регулирующими компенсирующими устройствами, РПН трансформаторов, накопителями, генерацией, энергоузелами, коммутационными аппаратами и т.д.). Локальные контроллеры могут работать автономно, получая данные непосредственно в месте подключения и (или) из виртуальной модели сети, на основе своих заданных целей и в составе системы управления электроснабжением, получив задание от распределительного контроллера для достижения глобальной цели, т.е. координировано.

Разработана структура управляющего контроллера (рис. 3), который содержит средства обработки данных от датчиков, локальных контроллеров, центра управления и включает в себя оценку состояния – идентификацию параметров сети (топология: путем анализа измерений на наличие соединения линий, параметры элементов схемы), параметров режима – напряжения узлов, потоки мощностей и токи в ветвях, мощности генерации, накопления и потребления в узлах, ограничения; онтологию (базу знаний), содержащую модели процессов, критерии и ограничения, как заложенные, так полученные из опыта и прогнозирования; алгоритмы полезности функционирования энергообъекта; средства координации на основе заданных приоритетов и чувствительности к параметрам режима, а также ранжирования по значениям функции полезности со стороны агентов с учетом истории и прогнозных значений.

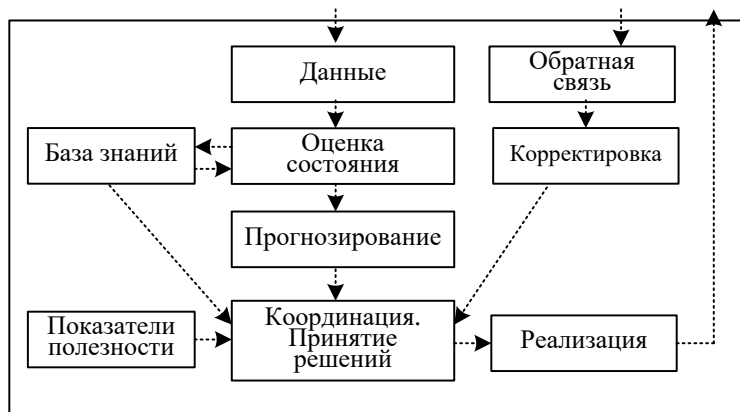


Рис. 3. Структура управляющего контроллера

Управляющий контроллер определяет наилучшее решение на основе поступившей информации и показателей эффективности всех локальных агентов по отношению к решаемой задаче, выбирает наилучшее решение и отправляет его требуемым локальным агентам для реализации исполнительными устройствами. Задача выполняется итерационно.

Предложена математическая модель агентного управления в общем виде:

$$AS = (AG, E, P, S), \quad (1)$$

где $AG = \{ag_1, ag_2 \dots ag_m\}$ – группа агентов; $E = \{e_1, e_2 \dots e_n\}$ – вектор множества состояний среды (в случае дискретного представления); $P = \{p_1, p_2 \dots p_k\}$ – вектор-функция восприятия; $S = \{s_1, s_2 \dots s_q\}$ – вектор-функция изменения состояния (поведения).

Функция действия принимает решение на основе S и производит действие A : $P \times S \rightarrow A$, т. е. в случае дискретных состояний агент содержит входной алфавит P , множество состояний S , выходной алфавит A .

Выполнен сравнительный анализ подходов к взаимодействию, кооперации и координации группового поведения агентов в рамках самоорганизующейся мультиагентной системы управления. Обоснована деятельность каждого агента электрооборудования для реализации заданных локальных задач (показателей полезности) на достижение глобальной функции цели с помощью агентов-координаторов на основе сотрудничества и переговоров по типу «аукцион». На рис. 4, а, б представлен пример распределения агентов электрооборудования (1–4) для достижения общих целей управления (1-2) в результате их координации по типу «аукцион», процедура которой является итерационной и включает в себя последовательность шагов, связанных с формированием «стоимости» K достижения целей каждым агентом, их сортировкой в порядке возрастания цены и выбором победителя (рис. 4, б).

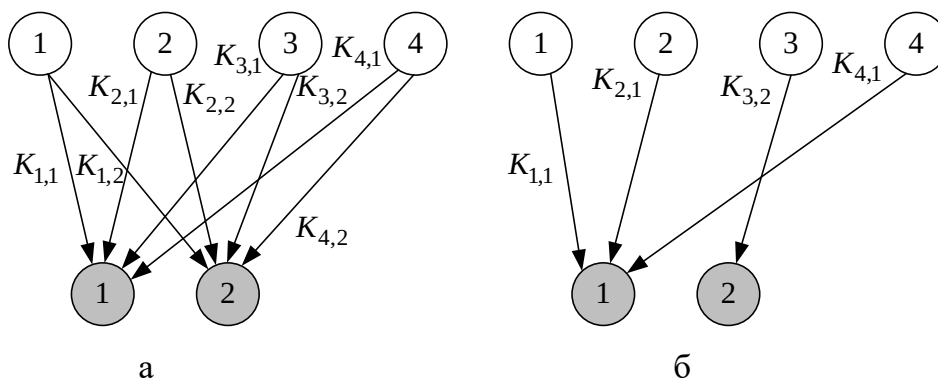


Рис. 4. Распределение агентов для решения общих целей в результате координации

Разработана структура онтологии и базы знаний в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог. Онтология для рассматриваемого метода содержит концепты, атрибуты и отношения применительно к конкретному объекту.

Модель онтологии имеет вид:

$$O=(X, R, F), \quad (2)$$

где X – множество концептов (понятий, терминов, классов, объектов) системы электроснабжения (подстанция, линия, средство регулирования и прочие атрибуты, например, линии: сечение, марка кабеля, ток, мощность, напряжение и т.п.), которую представляет онтология (семантическая сеть, диаграммы классов и ограничений, знания, которые необходимы агенту как для индивидуальной работы, так и для взаимодействия с другими агентами); R – конечное множество отношений (ассоциаций) между концептами (классами) и объектами при управлении системой электроснабжения (имя ассоциации, начальный класс, конечный класс, описание информационных связей объектов – горизонтальные, вертикальные (управление, ведение (различных видов), иерархия)); F – конечное множество функции поведения объектов при управлении системой электроснабжения (например, логика 1-го порядка, пример: если напряжение в узле контроля снизится более чем на 5%, то включится устройство

компенсации реактивной мощности с расчетной емкостью, если на 10 %, то переключатель РПН спустя некоторое время перейдет на следующую ступень и т. д.).

Информационная модель рассматриваемой электроэнергетической системы железных соответствует требованиям существующих стандартов по профилю информационной модели линий электропередачи и электросетевого оборудования и т.д.

Исследованы и обоснованы подходы к распределенному динамическому оцениванию состояния и автоматическому краткосрочному прогнозированию параметров режима для целей оперативного управления системой электроснабжения стационарных потребителей железных дорог. Представлен подход к структурному анализу топологии сети по результатам измерений.

Предлагаемое оценивание состояния цифровой информационной модели системы электроснабжения включает в себя оценку топологию сети, режимов расчетной схемы, параметров расчетной схемы (напряжения и фазы напряжений узлов, перетоки активной и реактивной мощности и токи в ветвях (связях), мощность генерации и графики потребления в узлах и т. д.).

В качестве метода оценки наиболее вероятного состояния системы электроснабжения на основе локально измеренных величин принят метод максимального правдоподобия с декомпозицией, т.е. с делением расчетной электрической схемы на подсистемы с граничными узлами или ветвями.

В соответствии с указанным методом в качестве «наиболее правдоподобного» значения параметра берут значение, максимизирующее вероятность получения при опытах данной выборки.

Функция $f_m(z)$ результатов измерений z_i представляется в виде:

$$L = \log f_m(z) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i, \quad (3)$$

где μ_i – среднее значение z_i ; σ_i – стандартное отклонение z_i .

Целью рассмотренного метода является максимизация функции логарифмического правдоподобия путем изменения среднего значения μ_i и стандартного отклонения σ_i функции плотности распределения, что приводит к задаче

$$\log f_m(z) \rightarrow \max \quad (4)$$

$$\text{или } J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{z_i - h_i(x)^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \rightarrow \min, \quad (5)$$

при условии, что $z_i = h_i(x) + r_i$; $i = 1, \dots, m$, где x – вектор состояния системы; $h_i(x)$ – нелинейная функция измеренных значений x_i – вектор состояния; r_i – остаток от измерения z_i ; R – дисперсию вектора ошибки измерения,

$$R = \text{diag} \{ \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2 \}. \quad (6)$$

Проведенные исследования параметров случайных процессов изменения нагрузок с учетом влияния тяговой сети показали, что электрические нагрузки при оценивании состояния системы электроснабжения являются стационарными, не эргодическими.

Обоснованы алгоритмы для эмпирической модовой декомпозиции графиков мощности (линия 1 на рис.5) в соответствии с техническими особенностями применяемых технических средств компенсации реактивной мощности (КУ), генерации, накопителей на постоянную (неизменную) составляющую (линия 2 на рис.5), низко-

частотную (ступенчатый график 3, ступенчато-регулируемые устройства), высокочастотную (линия 4 на рис.5), вызванную резкими изменениями, флуктуациями параметров режима (быстродействующие устройства).

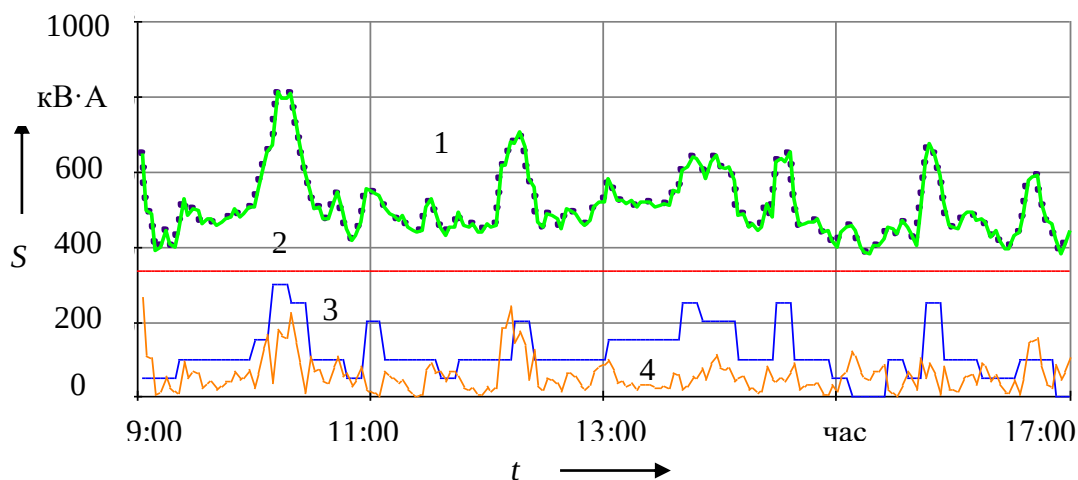


Рис.5. Разложение графика мощности в соответствии с особенностями применяемых технических средств

Для целей оперативного управления в реальном времени на этапе разработки и испытания математических моделей реализован механизм аппроксимации и квантования графиков нагрузки, а также выработки активной и реактивной мощности для их представления в виде математических функций в аналитическом виде.

Обосновано прогнозирование графиков нагрузки методом статистической экстраполяции на суточном временном диапазоне, как достаточно быстрым и малозатратным по вычислительным ресурсам с допустимой погрешностью прогнозирования.

В третьей главе усовершенствован метод адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях железных дорог, основанный на определении величины воздействий в виде приращений активной и реактивной мощности путем координации распределённых источников генерации (накопления) электроэнергии, разнотипных регуляторов напряжения и мощности с учетом их технических особенностей (ступенчато-регулируемые, быстродействующие).

На основе сравнительного анализа обосновано преимущество методов группового регулирования напряжений в распределительных электрических сетях. Исследованы основные методы сенсорного анализа для определения чувствительности узлов электрической сети к внешним возмущениям в установившихся режимах.

Обосновано определять величину необходимых управляющих воздействий с целью минимизации потерь мощности на основе генетического алгоритма, а для стабилизации напряжения в распределительной электрической сети в виде приращений активной и реактивной мощности для линейных регуляторов и активных потребителей (при необходимости) на основе сенсорного анализа.

Решаемая задача стабилизации напряжения может быть поставлена в виде минимизации приращений управляющих воздействий на распределенные объекты управления, включая источники активной и реактивной мощности, регулятор РПН в центре питания при условии обеспечения заданных ограничений по контролируемым параметрам и обеспечении заданного приращения напряжений от приращений указанных управляющих воздействий:

$$F = \left[\sum_{j=1}^{m_i} (k_P \Delta P_j + k_Q \Delta Q_{j,}) \right] + k_T \Delta T \rightarrow \min, \quad (7)$$

где

$$\begin{cases} \left[\sum_{j=1}^{m_i} (\alpha_{jk} \Delta P_j + \beta_{jk} \Delta Q_{j,}) \right] + \gamma_T \Delta T + \delta_B \Delta I_{\Delta} = \Delta U_k; \\ T^{\min} \leq T^0 + \Delta T \leq T^{\max}; \\ P_j^{\min} \leq P_j^0 + \Delta P_j \leq P_j^{\max}; \\ Q_j^{\min} \leq Q_j^0 + \Delta Q_j \leq Q_j^{\max}; \\ \forall j = 1, \dots, m_i. \end{cases} \quad (8)$$

$T^0, T^{\min}, T^{\max}$ – настройка регулятора (ответвлений) трансформатора с РПН и его ограничения (в о. е.); k_P, k_Q – весовые коэффициенты по активной и реактивной мощности («стоимость» регулирования); k_T – весовой коэффициент для управления действиями регулятора РПН, характеризующий чувствительность напряжения на шине k ТП при изменении шага регулятора РПН трансформатора на ВН/СН; δ_B – весовой коэффициент влияния тяговой нагрузки на питающее напряжение; γ_T – весовой коэффициент влияния регулятора РПН на напряжение; ΔI_{Δ} – приращение тягового тока (в о.е.); P_j, Q_j – активная и реактивная мощность (генерация и (или) потребление), задается с учетом разнотипности технических средств и их характеристик (в том числе ступенчато-регулируемые, быстродействующие); α_{jk}, β_{jk} – коэффициенты чувствительности по напряжению для активной и реактивной мощности.

Управление напряжением предлагается выполнять в виде подчиненного регулирования: внешний контур – регулятором РПН трансформаторов в центре питания, внутренний – местное регулирование распределенными локальными устройствами.

Таким образом, из выражения (8) для первой ступени регулирования

$$\left(\frac{k_P}{\alpha_{jk}} \Delta P_j + \frac{k_Q}{\beta_{jk}} \Delta Q_{j,} \right) = \Delta U_k - \delta_B \Delta I_{\Delta}. \quad (9)$$

Определение управляющих воздействий на источники активной, реактивной мощности выполняется на основе уравнений установившихся режимов. В процессе работы системы электроснабжения изменяется топология электрических сетей, изменяются нагрузки, параметры режима и мощность регуляторов, поэтому чувствительность узлов по напряжению к изменению инъекций активной и реактивной мощности обновляется в виде частных производных в темпе изменения текущего режима.

Уравнения установившегося режима в узлах электрической сети:

$$\begin{cases} U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \cos(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = P_i; \\ U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \sin(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = Q_i \end{cases} \quad (10)$$

по независимым параметрам, связанным с чувствительностью напряжений на шинах, принимают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n U_i U_j [b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j [b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i g_{ii} + \sum_{j=1}^n U_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n U_i U_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = 2U_i b_{ii} - \sum_{j=1}^n U_j [b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \\ \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = -U_j [b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]. \end{array} \right. \quad (11)$$

Приращения мощности в узлах связаны с приращениями напряжений:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $J_{P\delta}, J_{PU}, J_{Q\delta}, J_{QU}$ – элементы матрицы Якоби:

$$J_{P\delta} = \frac{\partial P}{\partial \delta}; \quad J_{PU} = \frac{\partial P}{\partial U}; \quad J_{Q\delta} = \frac{\partial Q}{\partial \delta}; \quad J_{QU} = \frac{\partial Q}{\partial U}.$$

Наличие линеаризованной обновляемой матрицы чувствительности параметров режима позволяет обеспечить высокую скорость ее расчета за несколько итераций, а малые приращения измеряемой режимной информации обеспечивают достаточно высокую точность.

Разработан метод автоматического регулирования напряжения в распределительной электрической сети на основе мультиагентного подхода, используя скоординированное совместное применения средств местного и централизованного регулирования напряжения, при этом определение величины управляющих воздействий осуществляется в виде приращений активной и реактивной мощности на основе линеаризованных уравнений на основе координации разнотипных линейных регуляторов напряжения и мощности с учетом технических особенностей по скорости работы. Регулирование напряжений должно осуществляться в границах участков электрической сети, имеющих достаточные для регулирования показатели чувствительности. Данный метод основывается на алгоритме, представленном на рис. 6.

На первой ступени регулирования, когда происходит отклонение напряжения на шинах (в том числе от внешних причин), соответствующий агент посылает инфор-

мационное сообщение агенту-координатору. Агент-координатор готовит сообщение для каждого агента в виде заявки с нужным изменением напряжения ΔU . Если у агента есть запас по активной и реактивной мощности, то он в результате решения оптимизационной задачи определяет значения чувствительности своих факторов α_{jk} и β_{jk} и отправляет агенту-координатору, иначе отказывается от управления.

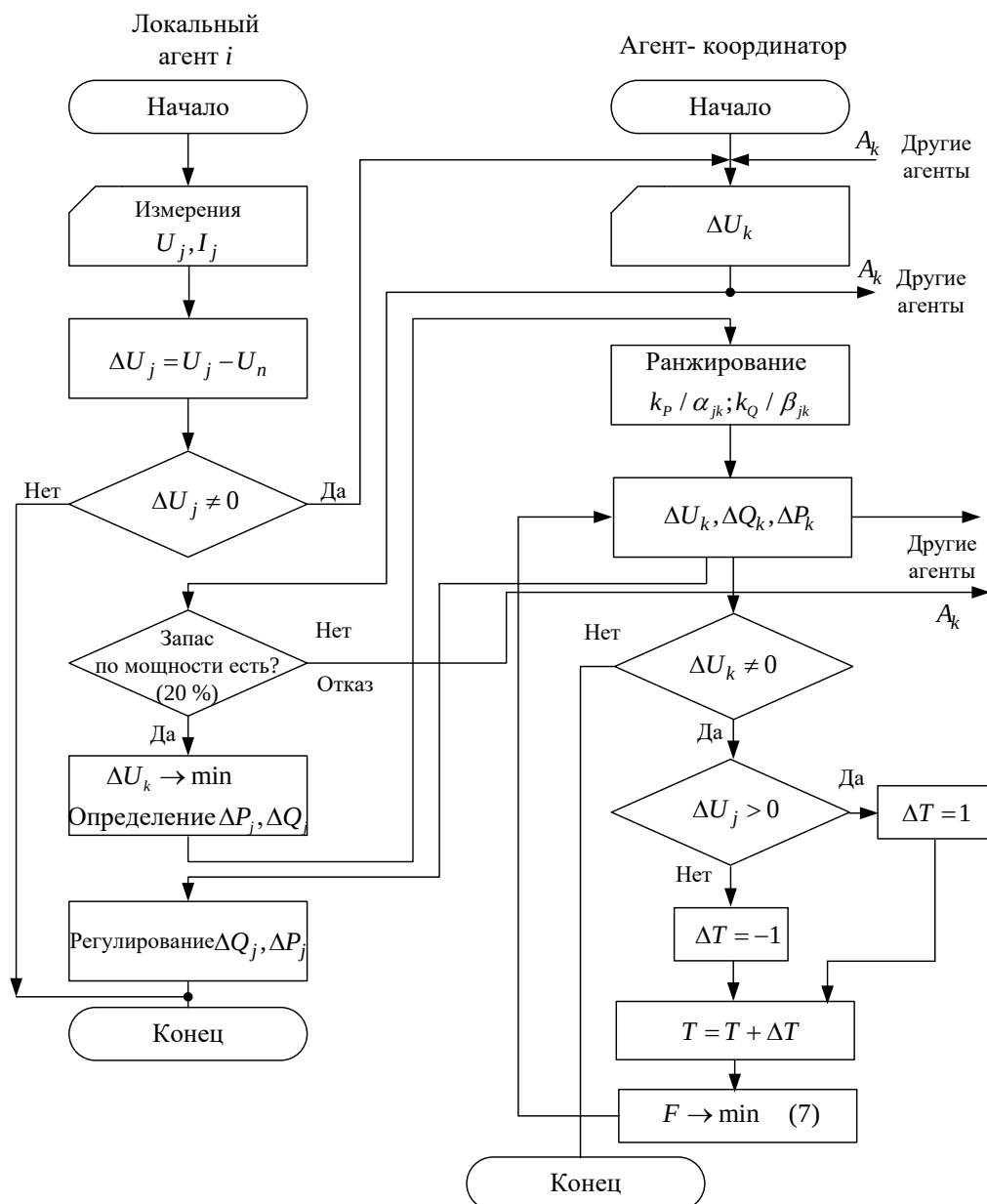


Рис. 6. Алгоритм управления напряжением

Таким образом, сравнение агентом-координатором показателей полезности локального агента – соотношений (k_Q / β_{ik}) и (k_P / α_{jk}) позволяет выбрать наиболее эффективные управляющие воздействия. Агент-координатор принимает решение об отправке управляющих воздействий локальным агентам на основе ранжирования весовых коэффициентов по сравнению с факторами чувствительности. Выбранные агенты принимают поручение и сообщают об этом агенту-координатору. Если какой-то агент неисправен, то остальные агенты опять обновляют значения чувствительности своих факторов без учета выбывшего агента и т. д.

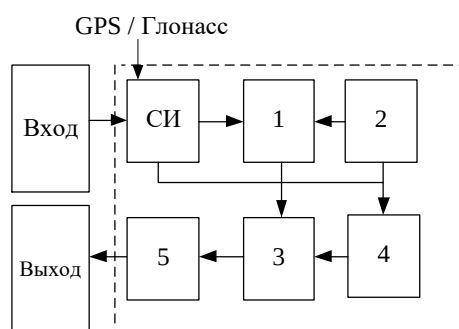
На второй ступени регулирования, если отклонение напряжения на шинах не ликвидировано после автономных управляющих воздействий, агент-координатор посылает сообщение агенту регулятора РПН и остальным агентам для совместных действий. После сбора данных от всех агентов определяется лучшая позиция для устройства РПН.

Показатели полезности локальных агентов (контроллеров объектов управления), как правило, учитывают два основных фактора – во-первых, это электрическая «близость» регулятора к узлу электрической сети, на которое требуется оказать влияние в виде приращения напряжения, и во-вторых, это «стоимость регулирования». Также невозможность принять участие в стабилизации напряжения регулятором может быть связано с ограниченностью ресурсов агента в данный момент времени (ограниченный запас по активной, реактивной мощности).

Адаптивность данного алгоритма заключается в самоорганизации системы управления на основе выбора локальных контроллеров (агентов) с наилучшими показателями полезности в изменяющихся условиях.

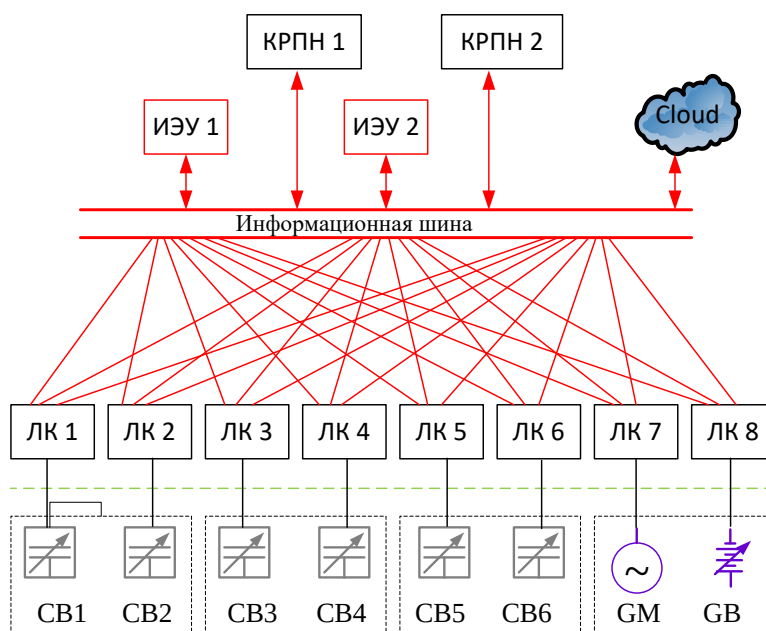
Разработана структурно-функциональная схема устройства регулирования напряжения в контролируемой зоне электрической сети (рис. 7, а), которое позволяет повысить качество регулирования напряжений на шинах трансформаторных подстанций распределительной сети в пределах заданных значений, представлено описание его работы.

Рассматриваемое устройство может быть реализовано в виде интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) на базе промышленного компьютера (рис. 7, б), выполняющего роль двухуровневого контроллера и имеющего следующие преимущества по сравнению с локальными регуляторами: обеспечение возможности устойчивой работы сети по условию стабилизации напряжения с источниками распределенной генерации и накопителями активной мощности; координация выработки (накопления) мощности средствами местного регулирования и как следствие – повышение качества напряжения, снижение потерь электрической энергии в контролируемой зоне; адаптивность регулятора к изменению возмущающих факторов параметров режима и составу источников активной и реактивной мощности.



1 – блок оценки состояния сети; 2 – блок базы знаний; 3 – блок координации, выработки управляющих воздействий; 4 – блок прогнозирования; 5 – блок реализации управляющих воздействий; КРПН – контроллер РПН; ИЭУ – управляющий контроллер; ЛК – локальный контроллер

а



б

Рис. 7. Структурно-функциональная схема предлагаемого ИЭУ (а) и структурная схема регулирования напряжения в электрической сети (б)

Адаптивный регулятор напряжения и программное обеспечение защищены патентом РФ, свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Четвертая глава посвящена созданию метода управления потокораспределением и повышению пропускной способности транспортных каналов системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, основанного на реконфигурации электрических схем без расчета установившихся режимов, оптимальной выработки (накопления) активной и реактивной мощности, управления спросом активных потребителей, а также получению законов управления регулируемым силовым трансформатором при малых нагрузках.

Показано, что оперативное управление потоками мощности в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог в нормальном режиме направлено на решение следующих задач: снижение перегрузки и повышение пропускной способности, оптимизация потерь мощности в электрической сети за счет регулирования уровня напряжения, генерации активной (при наличии) и реактивной мощности, изменением схем питания (реконфигурация) и ограничения спроса на электрическую энергию потребителями.

Представлен подход к определению мест размещения и параметров источников реактивной мощности на основе решения оптимизационной задачи по минимуму потерь активной мощности в распределительной электрической сети, отличительной особенностью которого является нахождение оптимальной емкости для каждой фазы в отдельности.

Разработан алгоритм реконфигурации распределительной электрической сети (рис. 8) для снижения перегрузки, повышения пропускной способности на основе решения задач оптимизации нормальных режимов (статическая реконфигурация) и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию (динамическая реконфигурация), что является отличительными признаками данного подхода, обеспечивающего повышение скорости вычислений и расширение функциональности в заявленной области.

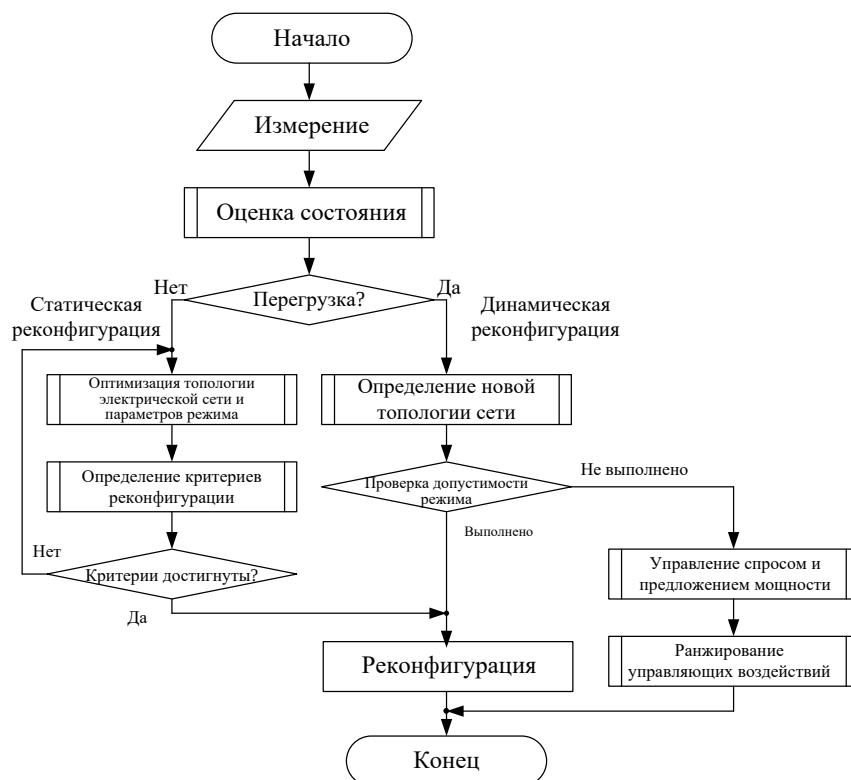


Рис. 8. Алгоритм реконфигурации электрической сети

В качестве критерия оптимизации топологии электрической сети выступает минимальное потребление электроэнергии при эксплуатационных ограничениях по схемам электроснабжения, допустимым параметрам режима, перегрузкам линий и прочее.

Оптимизационная задача динамической реконфигурации имеет вид:

$$\sum_{k=1}^N P_k(\delta_{ij}) \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$\delta_{ij}=0,1 \ (i,j) \in E$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \in N_3}} P_{ij} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \in N_4}} P_{ji} & \begin{cases} \leq P_i^{\text{ист}}, i \in N_1', N_2', N_3', N_4'; \\ \leq -(P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}), j \in N_{\text{н}}; \end{cases} \\ \sum_{i=j} P_j^{\text{ист}} & > \sum_{i=j} (P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}), \Delta P_{ij} = 0; 0 \leq P_{ij} < P_{ij}^{\text{max}}; 0 \leq Q_{ij} < Q_{ij}^{\text{max}}; \\ U_j^{\min} & \leq U_j < U_j^{\text{max}}; \sum_{i \neq j} \delta_{ij} = a, a = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (14)$$

Модель потоков мощности для радиальной электрической сети может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} P &= \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta P_{ij}); \\ Q &= \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (Q_{\text{н}j} - Q_{\text{г}j}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta Q_{ij}), \end{aligned} \quad (15)$$

где $P_{\text{н}j}, P_{\text{г}j}$ и $Q_{\text{н}j}, Q_{\text{г}j}$ – активные и реактивные мощности нагрузки и инъекции (от источников энергии) на шине j ; $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$ – потери активной и реактивной мощности в линиях ij ; P_{ij}, Q_{ij} – перетоки активной и реактивной мощности в линиях ij ; r_{ij}, x_{ij} – активные и индуктивные сопротивления линий ij ; δ_{ij} – двоичная переменная ($\delta_{ij} = 0,1 \ (i,j) \in E$).

На рис. 9, 10 представлены результаты реализации представленного алгоритма при динамической реконфигурации: исходное состояние – $\delta_{34} = \delta_{1213} = \delta_{1415} = 0$, после реконфигурации – $\delta_{45} = \delta_{314} = \delta_{1415} = 0$.

Обоснованы принципы координации выработки активных (накопители, генерация, в том числе со стороны тяговой сети) и реактивных мощностей, и спроса активных потребителей в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе решения оптимизационной задачи по минимизации приращений мощностей генерации, потерь, нагрузок с учетом весовых коэффициентов:

$$\sum_{i \in G} a_i \Delta P_{Gi} + \sum_{i,j \in T} b_{ij} \Delta P_{Tij} + \sum_{i \in L} p_i \Delta P_{Li} \rightarrow \min \quad (16)$$

при условии

$$\begin{aligned} \sum_{i \in G} P_{Gi} &= \sum_{i,j \in T} P_{Tij} + \sum_{i \in L} P_{Li}; P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}; P_{Tij} \leq P_{Tij}^{\max}; \\ P_{Gi} &= P_{Gi0} + \Delta P_{Gi}; P_{Tij} = P_{Tij0} + \Delta P_{Tij}; P_{Li} = P_{Li0} + \Delta P_{Li}; U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \end{aligned}$$

где P_{Gi} , P_{Tij} , P_L — мощность генерации, потери мощности в электрической сети, мощность нагрузки; a_i , b_{ij} , p_i — весовые коэффициенты на генерацию, передачу и приоритет нагрузки.

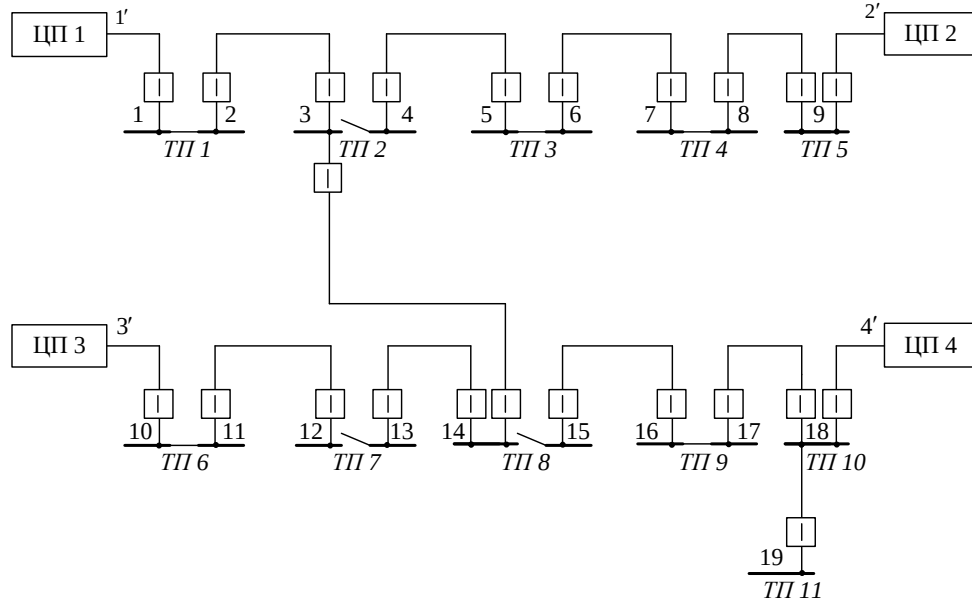


Рис. 9. Расчетная электрическая схема

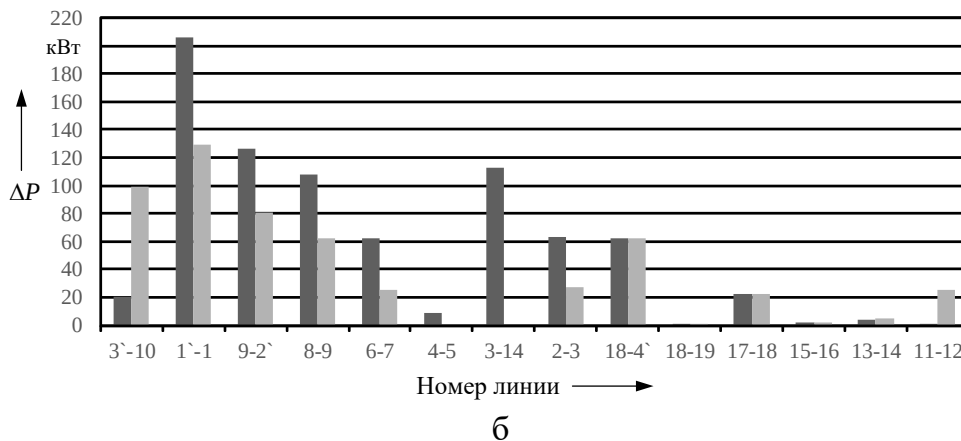
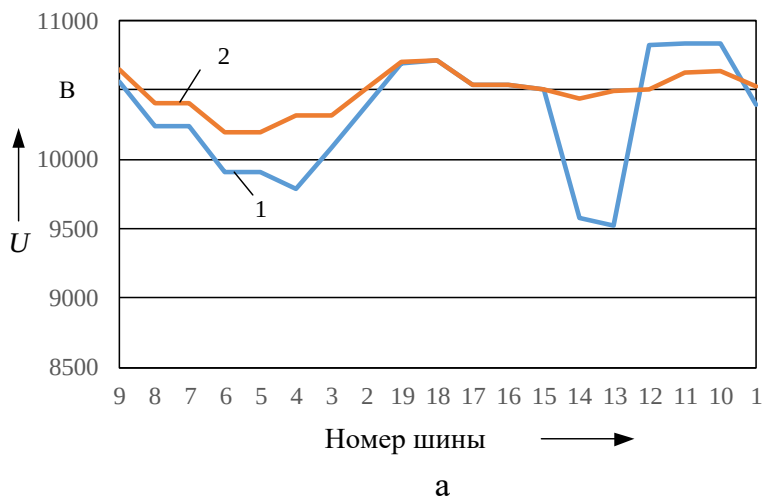


Рис. 10. Напряжение на шинах до (линия 1) и после (линия 2) реконфигурации (а), потери активной мощности (б) до (левый столбец) и после (правый) реконфигурации

Разработаны силовой трансформатор, защищенный патентом на полезную модель, и законы управления для автоматического снижения потерь холостого хода при малых нагрузках (рис. 11).

При загрузке трансформатора, близкой к номинальной, первичные и вторичные катушки (слои), на которые разделены обмотки, соединены параллельно с помощью коммутационных аппаратов, обеспечивая номинальные параметры трансформатора, в том числе магнитный поток.

Получено математическое выражение снижения суммарных потерь в трансформаторе ΔP за счет изменения схемы секционирования первичной и вторичной обмоток с параллельной ($a=1$) на последовательную ($a=2$), последовательно-параллельную ($a=4$) при изменении нагрузки:

$$\Delta P(\kappa_n) = (a^2 - 1) \left[\frac{P_0}{a^2} - \kappa_n^2 P_k \right], \quad (17)$$

где P_0, P_k – потери х.х. и к.з. трансформатора.

В качестве основного метода управляемого отключения потребителей при управлении потоками мощности распределительной электрической сети предлагается использовать чувствительность потоков мощности в линиях к изменению нагрузки на шинах и приоритет нагрузки для указания важности нагрузки в какой-то момент времени.

Обоснована модель управления спросом активных потребителей системы электроснабжения железных дорог при заданных ограничениях мощности системным оператором (агрегатором) в заданный период времени в виде максимизации мощности подключенных активных потребителей: отключаемых и с гибким регулированием производительности и мощности с учетом следующих факторов: чувствительность нагрузки фидера к изменению нагрузки потребителей; ценовая характеристика нагрузки; приоритет нагрузки:

$$F = \sum_{i=1}^n p_{1i} \cdot v_i \cdot \Delta \omega_i \cdot x_i + \sum_{k=1}^m p_{2k} \cdot v_k \cdot \Delta \omega_k \cdot y_k \rightarrow \max, \quad (18)$$

$$x_i = 0, 1 (i) \in Z,$$

$$y_{k \min}, y_{k \max} \in (0 - 1.)$$

при ограничениях:

$$P^t \cdot k_t \leq P_{op}^t, \quad t \in (t_1 - t_2),$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = a, \quad y_{k \min} \leq y_k < y_{r \max},$$

$$\Delta P_{k \min} \leq p_{2k} \cdot y_k \leq P_{k \max},$$

$$p_{1i}, x_i \in B; G,$$

где v_i, v_k – приоритет нагрузки, определяется путем ранжирования потребителей по важности нагрузки (в диапазоне 0 – 1); $\Delta \omega_i, \Delta \omega_k$ – чувствительность нагрузки по при-

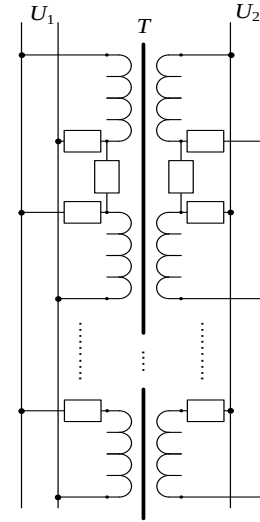


Рис. 11. Схема секционирования обмоток силового трансформатора

соединению ТП к изменению нагрузки потребителя (в диапазоне 0 – 1); x_i – двоичная переменная (0 или 1); y_k – непрерывная переменная – коэффициент изменения мощности нагрузки от минимальной до максимальной (в диапазоне 0 – 1); a – целое число, определяющее статус отключаемых электроприемников; n, m – количество электроприемников с возможностью их отключения и с гибким регулированием мощности соответственно; $\Delta P_{k \min}, \Delta P_{k \max}$ – согласованные уровни сокращения нагрузки с гибким регулированием производительности и мощности; B – допустимый набор электроприемников в соответствии технологическим процессом, сетевым графиком работ, прочих логических условий, соответствующий спискам смежности; G – список смежности, описывающий связи электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку.

Выходными параметрами указанной целевой функции являются следующие переменные: x_i – состояние нагрузки (0 или 1, т.е. откл. или вкл.); $p_{2k} \cdot y_k$ – сокращение мощности нагрузки электроприемников с гибким регулированием производительности.

Проведены исследования возможности участия стационарных потребителей железных дорог в управлении спросом. На рис. 12 представлены графики активных нагрузок групп электроприемников и суммарный (1 – суммарный с учетом ограничения мощности; 2 – отключаемых электроприемников; 3 – электроприемников с гибким регулированием мощности; 4 – неконтролируемых и (или) неотключаемых электроприемников), полученные на основе решения оптимизационной задачи управления спросом активного потребителя на примере цеха электровозоремонтного завода

(для периода времени с ограничением мощности). Здесь $\Delta P_1 = \sum_{i=1}^n p_{1i}^t x_i$, $\Delta P_2 = \sum_{k=1}^m p_{2k}^t y_k$ – расчетное снижение активной мощности отключаемых электроприемников и с гибким регулированием производительности в указанный момент времени соответственно. Ограничение мощности принималось $P_{op} = 460$ кВт, коэффициент запаса $k_t = 1,1$. Выборка графика нагрузки представлена по 170 точкам во времени с 8:00 до 18:00.

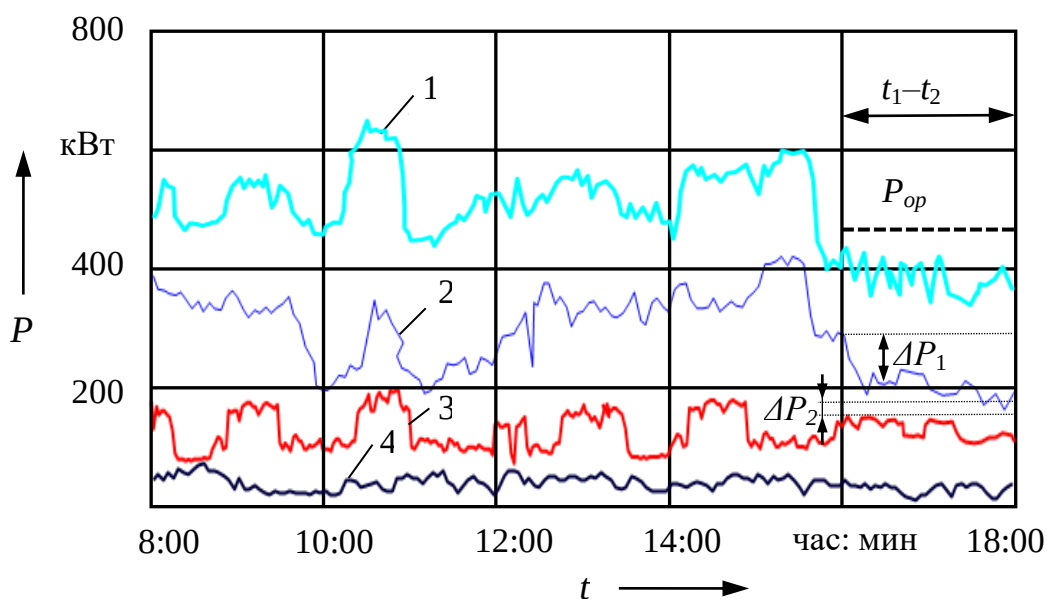


Рис. 12. Графики активной мощности

Разработан алгоритм управления спросом со стороны активных потребителей (рис. 12).



Рис. 13. Алгоритм управления спросом со стороны активных потребителей

Отличительными признаками разработанного метода управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме систем электроснабжения являются: анализ данных электропотребления и режимов работы осуществляется на основе применения современных технических средств измерений, управления и коммутации электроприемников; оптимальный график нагрузки формируется не на основе прогнозируемых наборов комбинаций мощности электроприемников, а путем управления ограничением включения (отключением) и плавным изменением мощности контролируемых электроприемников в реальном времени; в модели потребления мощности нагрузка разделяется на контролируемую (отключаемую и с гибким регулированием мощности) и неконтролируемую, в том числе случайную.

Разработана структурно-функциональная схема устройства регулирования мощности в распределительной электрической сети.

Предлагаемое устройство может быть реализовано на основе разработанных в данной главе алгоритмов в виде интеллектуального электронного устройства и осуществляет регулирование потоков мощности в распределительной сети за счет изменения схем питания (при возможности), управления выработкой реактивной (активной) мощности и ограничения спроса на электрическую энергию потребителями. Указанное устройство защищено патентом РФ на полезную модель.

В пятой главе усовершенствован метод восстановления нормального режима системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающий дифференциацию подключенных нагрузок на всем контролируемом участке электрической сети путем деления-реконфигурации схемы его питания с корректировкой параметров режима источниками генерации (накопления) мощности.

Разработан алгоритм автоматического восстановления нормального режима в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе агентного подхода (рис. 14).



Рис. 14. Алгоритм автоматического восстановления нормального режима в распределительных электрических сетях железных дорог

Обобщены исследования по восстановлению распределительных электрических сетей, основанные на теории графов, искусственных нейронных сетей, комбинаторной математики, мультиагентного управления. Определена последовательность восстановления распределительных электрических сетей после аварии, требования к статической и динамической устойчивости режима. Динамическая устойчивость с инверторными регуляторами мощности обеспечивалась путем введения задержки в системе управления инвертором. В качестве практических критериев обеспечения статической устойчивости режима системы электроснабжения принимались типовые показатели. Алгоритмы работы локальных контроллеров реализованы по существующим показателям устойчивости переходных процессов и типам регуляторов.

Представлена идентификация режима системы электроснабжения на основе сопоставления фактических параметров состояния с параметрами состояния различных режимов в виде бинарных чисел.

Разработаны основные этапы работы мультиагентной системы управления делением-восстановлением электрических сетей, а также структура обмена информационными сообщениями между агентами-координаторами (на контролируемом участке электрической сети) и локальными агентами (на подстанциях) при восстановлении нормального режима (рис. 15).

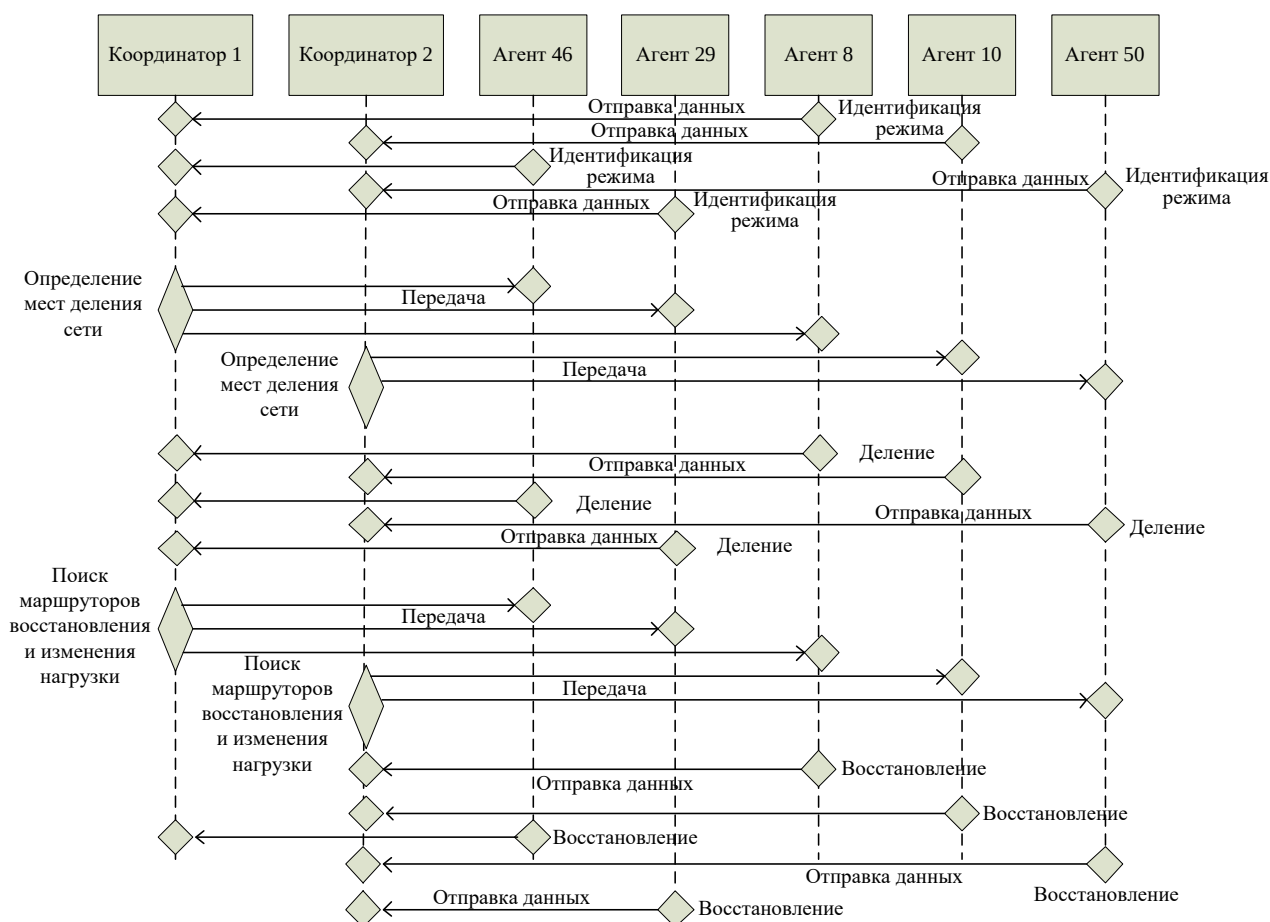


Рис. 15. Обмен информационными сообщениями между агентами-координаторами и локальными агентами при восстановлении нормального режима

Предложен подход к восстановлению схемы электрической сети на основе решения задачи целочисленного линейного программирования по условию минимума потерь мощности без расчета установившихся режимов на основе агентного подхода с ограничением мощности нагрузок/активных потребителей. В данном случае предлагается даже при отсутствии генерации, работающей параллельно с сетью, в качестве принципа работы автоматического включения резерва осуществлять подключение обесточенного участка к другому источнику, не нарушая баланс мощности на втором источнике, путем опережающего деления-реконфигурации схемы его питания.

Выполнен анализ вопросов устойчивости при управлении распределенными энергообъектами в системе электроснабжения железных дорог.

Выполнено имитационное моделирование системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с центрами питания 10 кВ от тяговых подстанций в Matlab Simulink в исходном и восстановленном режимах согласно алгоритму рис. 14. Результатом моделирования являются параметры режима электрической сети при исходной схеме нормального режима до реконфигурации, вызванной возмущениями, которые приводят к переходу в аварийный режим. К указанным параметрам относятся: напряжения, токи, сдвиги фаз, активные, реактивные и полные мощности. Конфигурация схемы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог после восстановления нормального режима (выделено в виде границы области) представлена на рис. 16.

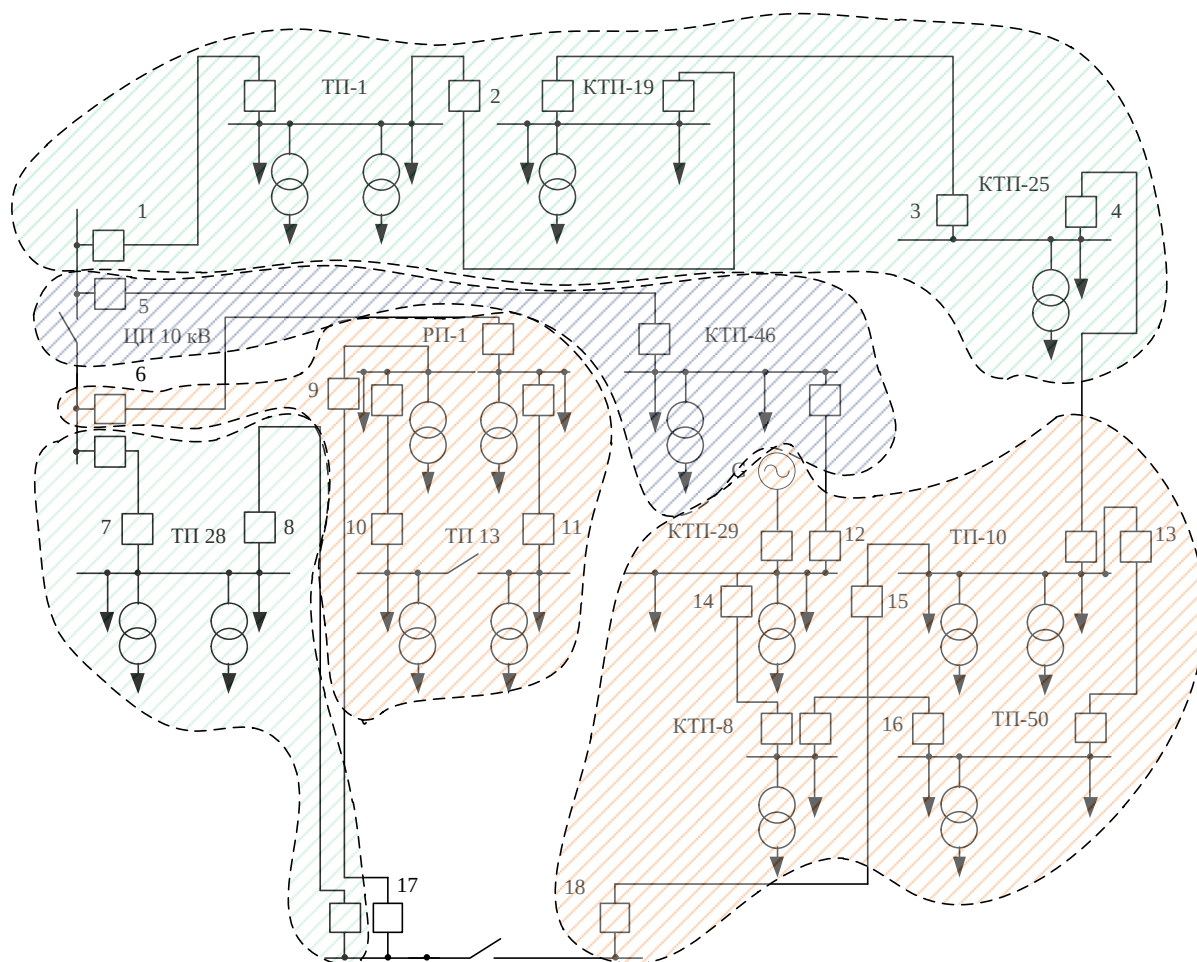


Рис. 16. Конфигурация схемы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог после восстановления нормального режима

В результате действия защиты после трехфазного короткого замыкания отключаются КТП-29 и КТП-8 от ЦП 10 кВ выключателя 5 и подключаются к выключателю 18 (рис. 16). Значение бинарных переменных (выключателей) в исходном нормальном режиме составляет: $\delta_1 = 1$; $\delta_2 = 1$; $\delta_3 = 1$; $\delta_4 = 0$; $\delta_5 = 1$; $\delta_6 = 1$; $\delta_7 = 1$; $\delta_8 = 0$; $\delta_9 = 0$; $\delta_{10} = 1$; $\delta_{11} = 1$; $\delta_{12} = 1$; $\delta_{13} = 1$; $\delta_{14} = 1$; $\delta_{15} = 1$; $\delta_{16} = 0$; $\delta_{17} = 0$; $\delta_{18} = 1$. В результате решения оптимизационной задачи при аварийном отключении линии 12 между КТП-46 и КТП-29 для построения остова дерева электрической сети определены следующие оптимальные значения бинарных переменных: $\delta_1 = 1$; $\delta_2 = 1$; $\delta_3 = 1$; $\delta_4 = 0$; $\delta_5 = 1$; $\delta_6 = 1$; $\delta_7 = 0$; $\delta_8 = 1$; $\delta_9 = 0$; $\delta_{10} = 1$; $\delta_{11} = 1$; $\delta_{12} = 1$; $\delta_{13} = 1$; $\delta_{14} = 1$; $\delta_{15} = 1$; $\delta_{16} = 1$; $\delta_{17} = 0$; $\delta_{18} = 1$.

Полученная по разработанному алгоритму восстановленная электрическая схема электроснабжения обеспечивает питание приоритетных нагрузок в полном объеме и всех остальных с учетом их ранжирования в пределах обеспечения допустимого режима.

На рис.17 представлены результаты имитационного моделирования по напряжению для рассматриваемых схем электроснабжения (исходный (левый столбик) и восстановленный (правый столбик)).

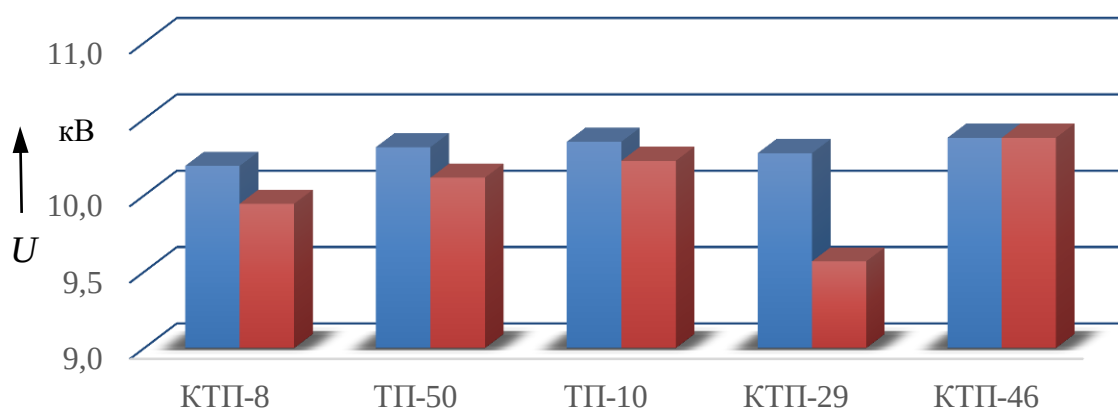


Рис. 17. Напряжения в узлах электрической схемы

Разработана структурно-функциональная схема устройства восстановления нормального режима с возможностью координации и связи с другими подобными устройствами соседних подстанций или центром управления электрической сетью (рис. 18).

На рис. 18: 1 – информационная шина процесса (измерительно-коммуникативный модуль); 2 – модуль контроля и оценки состояния; 3 – вычислительный модуль; 4 – модуль логики реализации технологических функций управления; 5 – модуль выработки управляющих воздействий; 6 – модуль координации; 7 – система управления верхнего уровня (сети); 8 – модуль реализации управляющих воздействий.

Предлагаемое устройство автоматического восстановления нормального режима системы электроснабжения осуществляет реализацию координированных управляющих воздействий в электрической сети (участке сети), связанных с защитными переключениями, перераспределением мощности через другие линии и изменением параметров режима с помощью линейных регуляторов и устройств FACTS в соответствии с разработанным алгоритмом. Указанное устройство защищено патентом РФ на полезную модель.

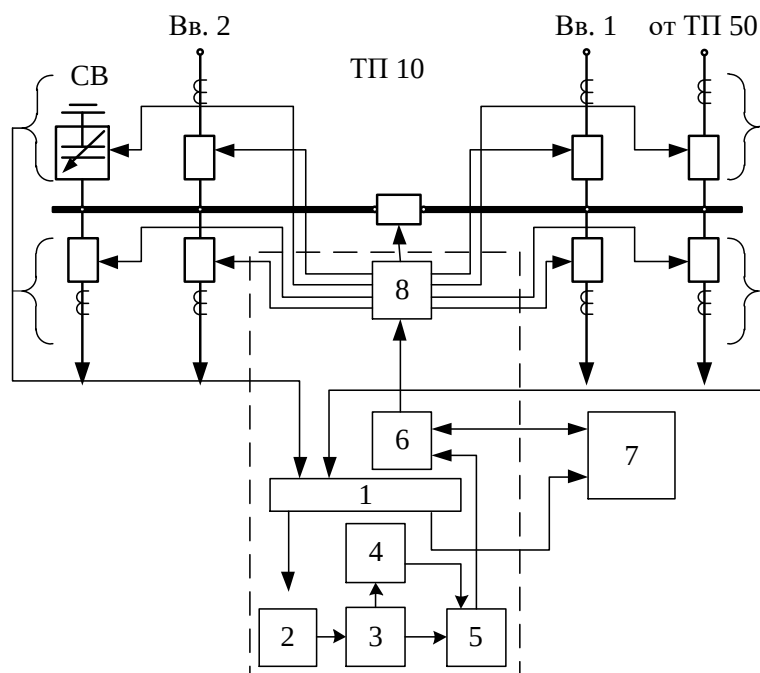


Рис. 18. Устройство автоматического восстановления нормального режима системы электроснабжения

В шестой главе выполнено имитационное моделирование и апробация разработанных методов в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог и технико-экономическая оценка эффективности предлагаемых технических решений с учетом результатов моделирования в программных комплексах Matlab Simulink, MathCAD, а также проведено испытание созданного прототипа интеллектуального электронного устройства.

Приведено описание локальных агентов и агентов-координаторов, базы знаний в системе электроснабжения. Выполнено имитационное моделирование режимов электрической сети с расчетными уставками регуляторов, расчетной топологией электрической сети для целей регулирования напряжения и ограничения перегрузки в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог в Matlab Simulink. Для проверки адекватности математической модели была создана физическая модель двухтрансформаторной подстанции. Сопоставление результатов проведения натурного эксперимента, имитационного и математического моделирования показало, что расхождение с физической моделью составляет около 3 %. Установлено также качественное и количественное совпадение авторских результатов моделирования системы электроснабжения с результатами автоматизированных измерительных систем, полученными в период летних минимумов и зимних максимумов нагрузок.

Моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях состоит в интеграции расчетов параметров режима и имитации работы локальных агентов, агентов-координаторов. Управляющий контроллер реализован в виде диаграмм состояний в Matlab Stateflow.

Полученная имитационная модель представлена на рис. 19.

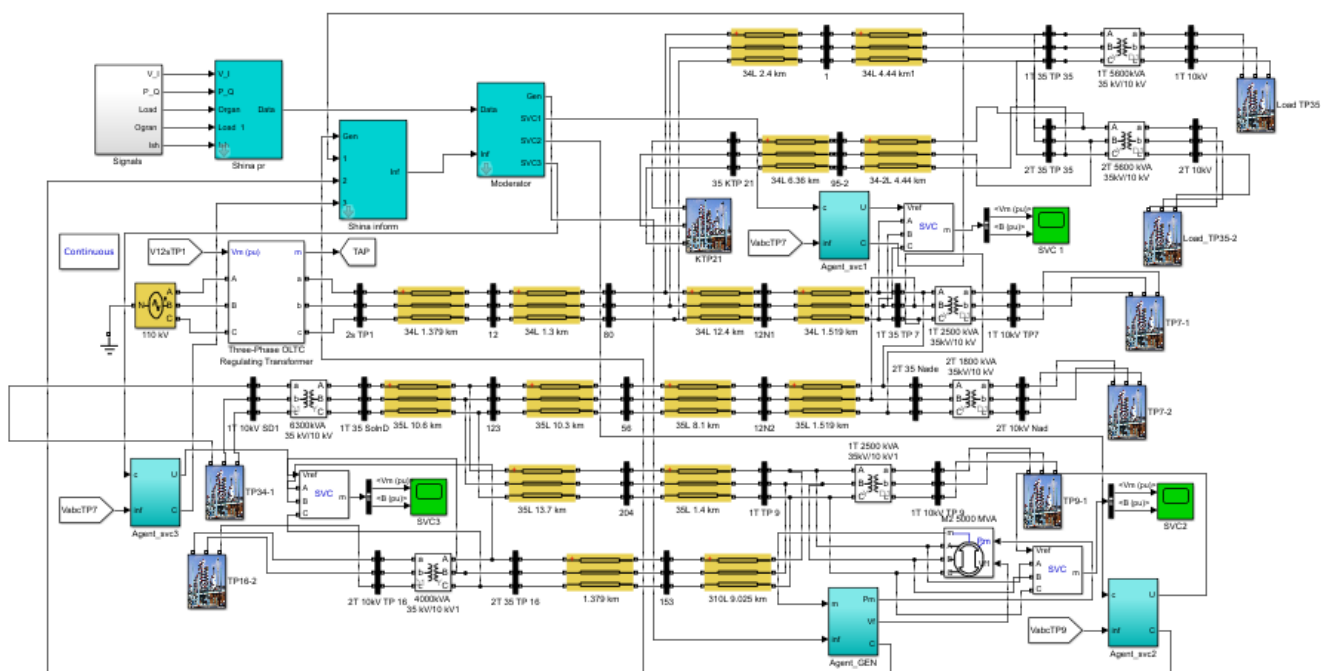


Рис.19. Имитационная модель адаптивного управления напряжением

Определены управляющие воздействия для стабилизации напряжения, оптимизации потоков мощности на основе мультиагентного подхода путем выполнения сенсорного анализа электрической сети (в нормальном и послеаварийном режимах) путем расчета чувствительности узлов электрической сети для оценки границ влияния регуляторов на режим напряжения и оценки фактических и допустимых перетоков мощности по линиям, ограничивающих пропускную способность.

На рис. 20 приведены рассчитанные управляющие воздействия для стабилизации напряжения на шинах ТП 34 за счет источников реактивной мощности на шинах ТП 9, ТП 16 и ТП 7.

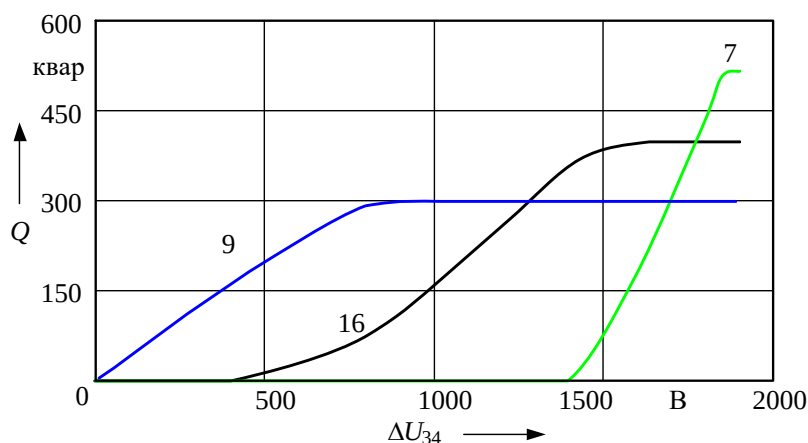
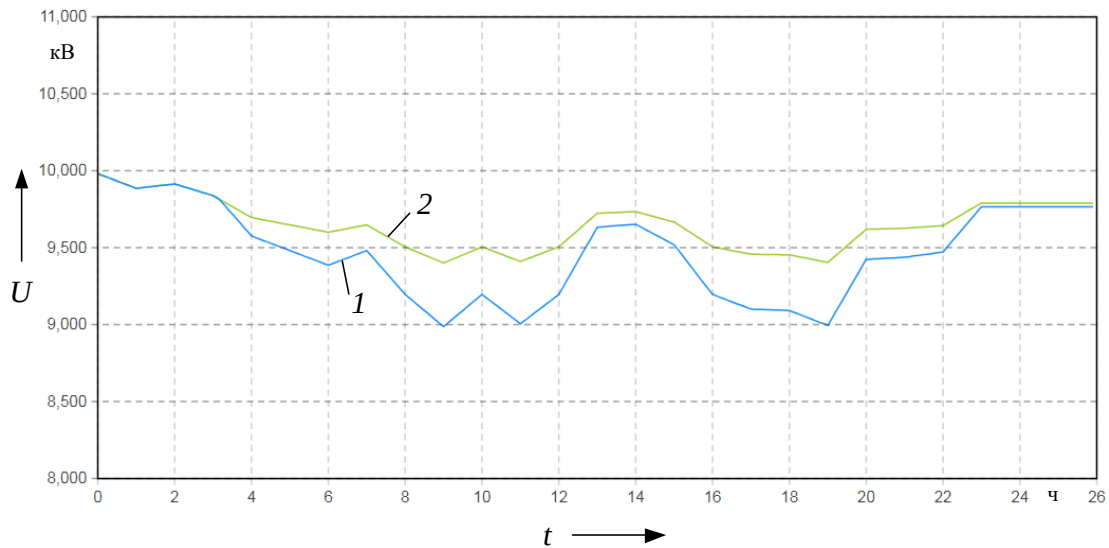


Рис. 20. Управляющие воздействия источников реактивной мощности, подключенные к шинам ТП 9, ТП 16 и ТП 7

Так как решение указанной оптимизационной задачи зависит от множества ограничений параметров режима и переменных нескольких локальных контроллеров, то она решается итерационно, т.е. на каждом шаге итерации контроллеры обменива-

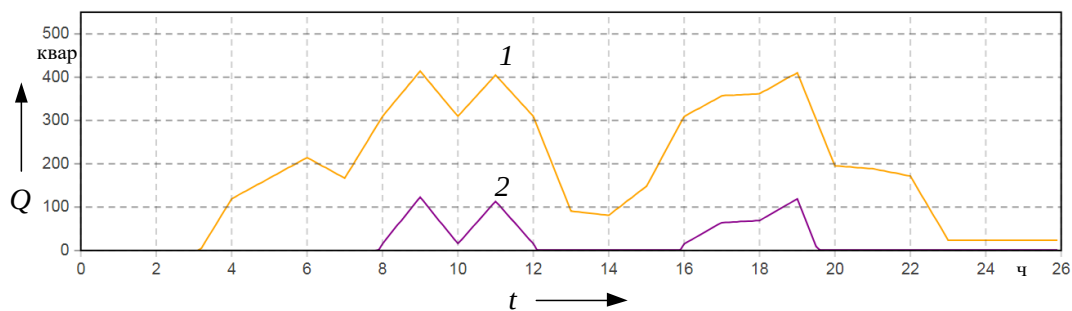
ются обновленными значениями своих переменных. В данном случае расчет выполнен за три итерации и 0,2 с.

На рис. 21 и 22 представлены результаты моделирования мультиагентного управления напряжением на шинах ТП 9 и ТП 16 в электрической сети на основе представленных подходов в программе Simulink.



1 – без стабилизации напряжения; 2 – с управлением с помощью КУ

Рис.21. Результаты моделирования напряжения на шине ТП 16 электрической сети



1 – на шине ТП 16; 2 – на шине ТП 9

Рис. 22. Реактивная мощность, вырабатываемая КУ для стабилизации напряжений на шине 3

Выполнена сравнительная оценка эффективности мультиагентного и централизованного регулирования напряжения в системы электроснабжения (рис. 23).

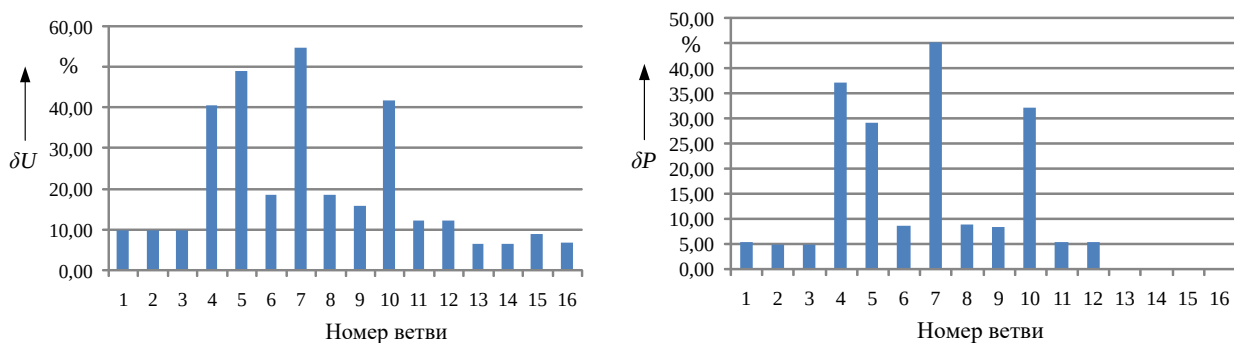


Рис.23. Снижение падений напряжений в линиях и потерь мощности в них

Результаты имитационного моделирования в рассматриваемом энергорайоне системы электроснабжения (рис. 23) свидетельствуют о снижении нагрузочных потерь примерно на 20 %, падений напряжений на 25 % при использовании рассматриваемого метода управления.

Результаты исследований показали практическую реализуемость и эффективность представленных алгоритмов координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в распределительных электрических сетях среднего и низкого уровня напряжений.

На рис. 24 представлена схема информационных связей интеллектуального электронного устройства с локальными ИЭУ 1, 2, N, устройствами сопряжения УСО, коммутаторами сети, контроллерами связи и управления тяговой подстанции на основе типовых решений.

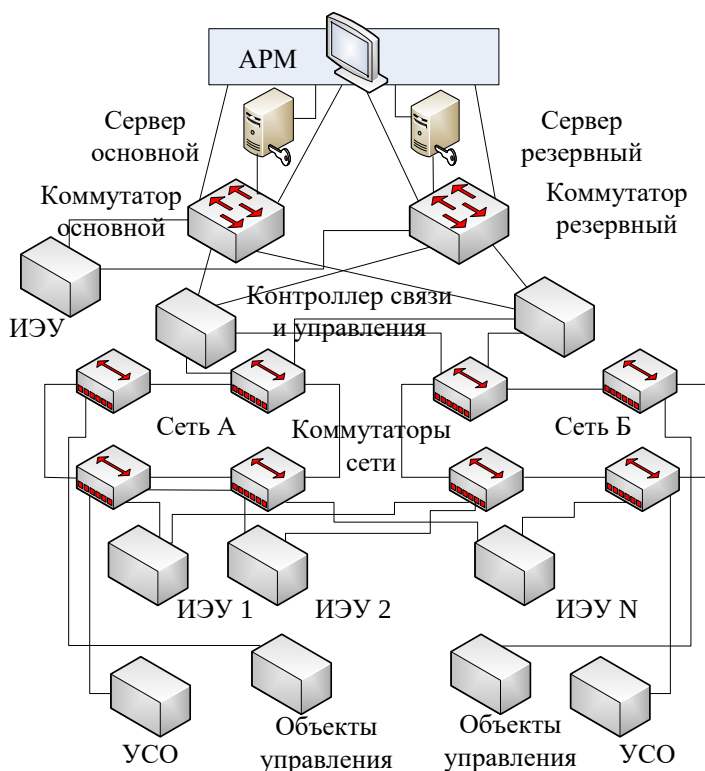


Рис.24. Место ИЭУ в архитектуре подстанции

Для апробации разработанных научно-технических решений и методов интеллектуального управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог был создан опытный образец прототипа программно-технического комплекса (ПТК) интеллектуального электронного устройства, реализующего функции двухуровневого контроллера на базе промышленного компьютера и аппаратных средств подстанции, испытанного с применением физических сигналов токов и напряжений (рис. 25).

Разработанный прототип ПТК ИЭУ обеспечивает идентификацию режимов; автоматическое поддержание оптимальных (квазиоптимальных) уровней напряжения в электрической сети контролируемой зоны; автоматическое координированное управление средствами регулирования напряжения и средствами компенсации реактивной мощности, накопителями, генерацией, активными потребителями, автоматическую реконфигурацию электрической сети в нормальном режиме.

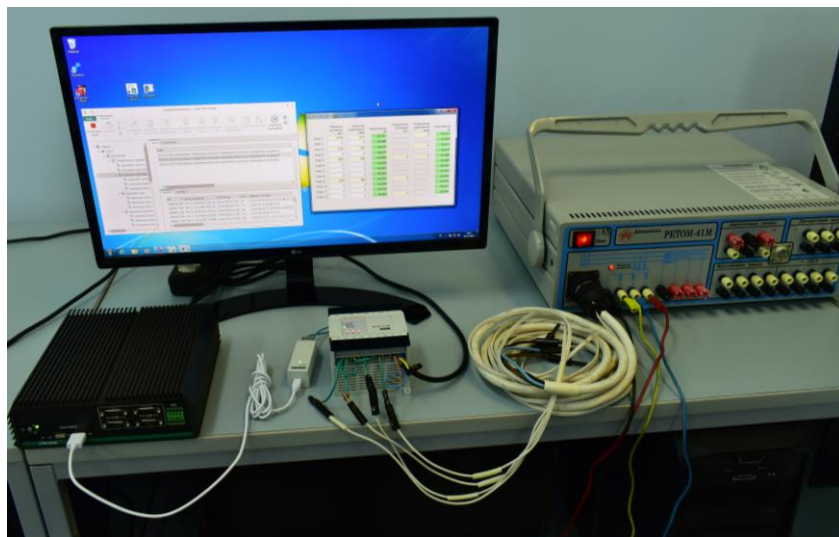


Рис.25. Общий вид прототипа ПТК ИЭУ

ИЭУ подстанционного уровня предназначено для реализации рассматриваемых алгоритмов в качестве управляющего контроллера и может быть выполнено на базе промышленного компьютера в виду отсутствия жестких требований по времени выработки управляющих воздействий и достаточно сложных оптимизационных расчетов и методов обработки данных, требующих значительных вычислительных ресурсов. ИЭУ уровня присоединения имеет свободно программируемую логику, может быть выполнено на базе контроллера и предназначено для реализации алгоритмов автоматизации элементов системы электроснабжения, т.е. выступает в качестве локального контроллера исполнительных устройств (энергообъектов).

Структурная схема испытаний ПТК ИЭУ представлена на рис. 26.

Методика испытаний включала в себя основные этапы:

- 1) Разработка математической модели заданного участка систем электроснабжения в нормальном режиме с полным описанием;
- 2) Задание модуля расчета установившегося режима электрической сети на основе нелинейных уравнений состояния для имитации реакции параметров режима на внешние возмущения;
- 3) Задание модуля базы данных, необходимого для работы программного комплекса;
- 4) Подключение к программному комплексу, имитирующему внешнюю среду, по Ethernet промышленного компьютера с установленным ПТК;
- 5) Подключение к промышленному компьютеру на параллельный порт через поверенный измерительный преобразователь аналоговых сигналов с программно-технического комплекса Ретом 41М;
- 6) Адаптация ПТК под математическую модель электрической сети;
- 7) Программная имитация изменения параметров режима системы электроснабжения по нагрузкам и в виде расчетных напряжений, потоков мощности и прочего на основе математической модели сети;
- 8) Считывание ПТК параметров режима, состояния топологии сети и определение управляющих воздействий по условию стабилизации напряжений;
- 9) Передача управляющих воздействий с ПТК на программный комплекс с математической моделью сети и получение новых параметров режима.

Формирование COMTRADE файла осуществлялось средствами Matlab Simulink.

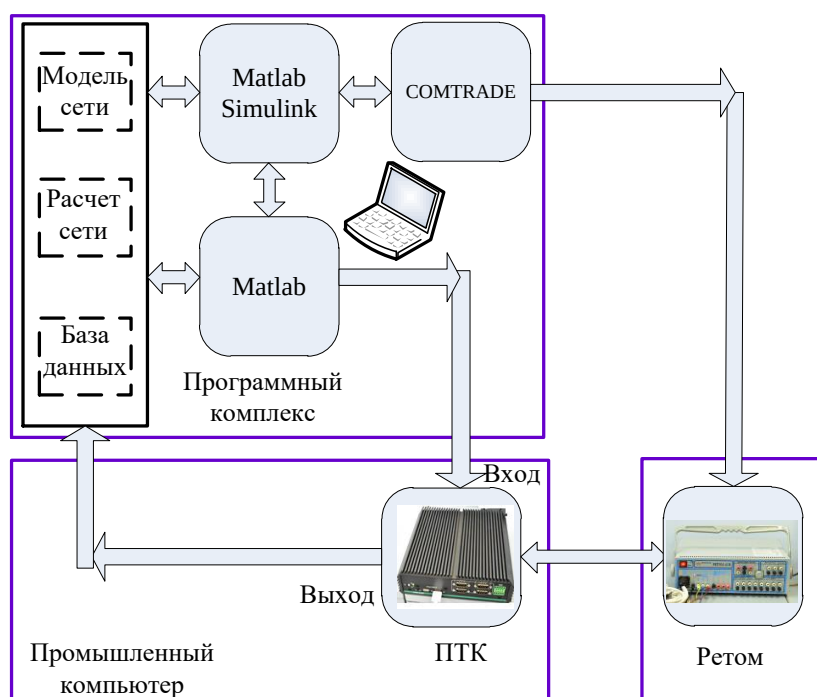


Рис.26. Структурная схема испытаний ПТК ИЭУ

В аппаратно-программном комплексе были интегрированы разработанная программная часть предлагаемого ПТК (на промышленном компьютере), на отдельном компьютере имитировалась среда системы электроснабжения в программной среде Matlab (Simintech и пр.). В этом случае на одном устройстве (ПК) создается математическая и имитационная модель поведения исследуемого объекта управления, а в машине реального времени имитируется физическая работа устройства со своими встроенными алгоритмами работы и реакции на внешние сигналы и возмущения.

Разработана архитектура и структурно-функциональная схема ПТК, обоснована аппаратная часть на базе промышленного компьютера и коммуникационных устройств, разработано программное обеспечение, технические требования к интеграции комплекса в информационно-управляющую систему интеллектуальных распределительных электрических сетей, проведено испытание комплекса в лабораторных условиях с использованием программно-технического комплекса с сигналами реального времени. Выполнена технико-экономическая оценка энергоэффективности предлагаемых технических решений в системе электроснабжения железных дорог на базе цифровых подстанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен системный анализ текущего состояния системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог. Показано, что в настоящее время указанные системы электроснабжения имеют низкую наблюдаемость параметров режима, недостаточную оснащенность линейными регуляторами и элементами автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций.

2. Обоснованы требования к перспективным методам управления передачей и распределением электрической энергии для реализации функций системы оперативно-технологического управления согласно концепции цифровой тяговой подстанции. Перспективы развития электросетевого комплекса железных дорог заключаются во

внедрении цифровых тяговых и трансформаторных подстанций, распределённой автоматизации воздушных (кабельных) сетей, интеллектуальных систем диагностики электросетевого оборудования, систем измерения электрической энергии, информационных систем управления. Одной из базовых технологий интеллектуальных систем цифровой тяговой подстанции являются многоагентные интеллектуальные системы управления для создания адаптивных самовосстанавливающихся систем электро-снабжения железных дорог.

3. Разработан метод управления передачей и распределением электроэнергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода, который позволяет реализовать алгоритмы, функционал информационно-управляющих интеллектуальных систем, соответствующих концепции цифровой тяговой подстанции, основан на мультиагентном подходе. Распределёнными управляющими элементами являются локальные агенты и агенты-координаторы в рамках двухуровневой архитектуры построения системы управления. При этом управляющие контроллеры содержат средства прогнозирования изменений параметров режима и средства самоорганизации (адаптации) на основе оперативной оценки результатов управления и разделены по функциональному назначению, координация управляющих и локальных контроллеров между собой осуществляется через обновляемую виртуальную модель электрической сети с изменяемой зоной ответственности. Указанный метод защищен патентом РФ на изобретение, его внедрение позволяет повысить надежность электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений), снизить потери электроэнергии, повысить пропускную способность, снизить издержки на обслуживание и эксплуатацию относительно текущего состояния дистанции электроснабжения.

4. Усовершенствован метод адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях железных дорог, основанный на определении величины воздействий в виде приращений активной и реактивной мощности путем координации распределённых источников генерации (накопления) электроэнергии, разнотипных регуляторов напряжения и мощности с учетом их технических особенностей (ступенчато, плавно-регулируемые). Указанный метод обеспечивает повышение качества электроэнергии по уровню напряжения для тестового реального участка системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог до 20 %.

5. Предложен метод управления потокораспределением и повышением пропускной способности транспортных каналов системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, основанный на реконфигурации электрических схем без расчета установившихся режимов, оптимальной выработке (накоплении) активной и реактивной мощности, управлении спросом активных потребителей. Разработан алгоритм реконфигурации распределительной электрической сети для снижения перегрузки, повышения пропускной способности, снижения потерь мощности на основе решения задач оптимизации нормальных режимов (статическая реконфигурация) и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию (динамическая реконфигурация) для оперативного управления в реальном времени.

6. Разработан алгоритм управления спросом активных потребителей с привязкой к технологическому процессу ремонтного железнодорожного предприятия во взаимосвязи с генерацией, накоплением электроэнергии и дифференциацией нагрузок по типам (отключаемая, неотключаемая, с плавным регулированием производительности, случайная), по значимым факторам.

7. Предложены схемные решения и получены законы управления регулируемым силовым трансформатором, позволяющие снижать потери холостого хода при

малых нагрузках, которые могут найти применение в системах электроснабжения. Получен патент на полезную модели РФ на регулируемый силовой трансформатор.

8. Усовершенствован метод восстановления нормального режима системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающий дифференциацию подключенных нагрузок на всем контролируемом участке электрической сети путем деления-реконфигурации схемы его питания с корректировкой параметров режима источниками генерации (накопления) мощности.

9. Предложен новый подход к построению интеллектуальных электронных устройств для регулирования напряжения, мощности, автоматического восстановления нормального режима в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе предлагаемых методов и технических решений. Доказана работоспособность предложенных устройств и алгоритмов в условиях действующих предприятий. Получены патенты на полезные модели РФ на указанные устройства. Обоснованы технические требования к интеграции ИЭУ в информационно-управляющую систему цифровых тяговых подстанций.

10. На основе описания математических моделей элементов электрической сети разработана имитационная модель реального времени для управления напряжением и ограничением перегрузки в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с применением программ Matlab Simulink, MathCAD. Результаты исследований показали практическую реализуемость и эффективность представленных алгоритмов координированного управления напряжением, потоками мощности в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог по сравнению с аналогичными на 10 – 20 %.

11. Разработан и испытан прототип ИЭУ в виде программно-технического комплекса, который обеспечивает идентификацию режимов, автоматическое поддержание оптимальных (квазиоптимальных) уровней напряжения в распределительной сети контролируемой зоны, автоматическое координированное управление средствами регулирования напряжения и средствами компенсации реактивной мощности, накопителями, генерацией, активными потребителями, автоматическую реконфигурацию электрической сети в нормальном режиме. ПТК реализует функции двухуровневого контроллера на базе промышленного компьютера и аппаратных средств подстанции, испытан с применением физических сигналов токов и напряжений. Разработано программное обеспечение для ПТК. Получены два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

12. Выполнена технико-экономическая оценка эффективности предлагаемых технических решений в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на базе цифровых подстанций. Ожидаемое повышение надежности электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений) составляет 7 %, снижение потерь электроэнергии – до 23 %, повышение пропускной способности – до 30 %, снижение издержек на обслуживание и эксплуатацию – 11 %. Срок окупаемости на базе цифровых подстанций около 6 лет.

Результаты численных экспериментов на имитационных моделях и физических измерений на действующих объектах электроэнергетической отрасли подтверждают достоверность представленных в диссертации научных и практических положений.

Результаты диссертационной работы создают теоретический и практический задел для разработки программной платформы с открытой архитектурой для интеллектуального управления системой электроснабжения железных дорог в целом, включая тяговые нагрузки, в рамках формирования сквозных цифровых технологий организации перевозочного процесса по проекту «Цифровая железная дорога», что является темой дальнейших исследований автора.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

а) научные работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, вошедших в перечень ВАК РФ:

1. Авилов, В. Д. Применение алгоритмов случайного поиска при оптимизации качества электрической энергии в сетях стационарных железнодорожных предприятий / В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, Ю. В. Москалев. – Текст: непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – № 4, Т.311. – С. 127–131.
2. Аввакумов, В. Г. Определение оптимальных мест размещения и диапазонов регулирования корректирующих устройств при управлении качеством электроэнергии / В. Г. Аввакумов, В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, Ю. В. Москалев. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – Выпуск 7-8. – С. 35–43.
3. Аввакумов, В. Г. Определение оптимальных узлов подключения и параметров нерегулируемых корректирующих устройств в низковольтных распределительных сетях для снижения потерь и улучшения качества электрической энергии / В. Г. Аввакумов, В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, Ю. В. Москалев. – Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. – 2009. – № 11. – С. 22–26.
4. Третьяков, Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 3 (34). – С.50–54.
5. Третьяков, Е. А. Оптимизация выбора компенсирующих устройств в электрических сетях 0,4 кВ при резкопеременных нагрузках / Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (97). – С. 116–120.
6. Третьяков, Е. А. Оптимальный выбор компенсирующих устройств в распределительных сетях / Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева. – Текст: непосредственный // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2012. – № 4(49). – С. 129–136.
7. Авилов, В. Д. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта / В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, А. В. Краузе. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 183–187.
8. Третьяков, Е. А. Совершенствование методов управления качеством электрической энергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта / Е. А. Третьяков, А. В. Краузе. – Текст: непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 350–353.
9. Авилов, В. Д. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей / В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, А. В. Краузе. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 1 (13). – С. 48–54.
10. Третьяков, Е. А. Управление системой электроснабжения железных дорог / Е. А. Третьяков. – Текст: электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1 – URL: <http://www.science-education.ru/121-18566> (дата обращения: 20.04.2015).

11. Третьяков, Е. А. Повышение экономичности и надежности системы электроснабжения железных дорог за счет управления режимами / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 222–225.
12. Третьяков, Е. А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2015. – № 140. – С. 155–159.
13. Черемисин, В. Т. Стабилизация напряжений в перспективных распределительных электрических сетях железных дорог / Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин, Н. Н. Малышева, Г. Е. Головнев. – Текст: непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 2. – С. 268–271.
14. Черемисин, В. Т. Моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог / Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин, Г. Е. Головнев. – Текст: непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 22–29.
15. Галкин, А. Г. Перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в электрических сетях железных дорог / Е. А. Третьяков, Г. Е. Головнев, А. Г. Галкин, Е. А. Сидорова. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 113–124.
16. Третьяков, Е. А. Определение воздействий в интеллектуальной системе управления напряжением в распределительных электрических сетях / Е. А. Третьяков, Г. Е. Головнев. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 4 (36). – С. 95–105.
17. Черемисин, В. Т. Повышение эффективности распределительных электрических сетей железных дорог на основе мультиагентного метода управления режимами / Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин. – Текст: непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 4. – С. 54–63.
18. Черемисин, В. Т. Управление секционированием и режимами потоков мощности в интеллектуальных распределительных электрических сетях железных дорог / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков, Г. Е. Головнев. – Текст: непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 225–237.
19. Третьяков, Е. А. Моделирование группового управления напряжением с источниками активной и реактивной мощности в электрических сетях / Н. Н. Малышева, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2019. – № 31. – С. 22–34.
20. Третьяков, Е. А. Управление спросом со стороны активных потребителей в интеллектуальных электроэнергетических системах / Н. Н. Малышева, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева – 2020. – № 1(128). – С. 75–85.
21. Третьяков, Е. А. Управление спросом активных потребителей в распределительных электрических сетях / Н. Н. Малышева, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 190–202.
22. Черемисин, В. Т. Повышение пропускной способности распределительных электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии путем их реконфигу-

рации / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – № 3 (331). – С. 112–122.

23. Третьяков, Е.А. Разработка методов и средств управления транспортом и распределением электроэнергии в интеллектуальных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63. № 4. – С. 43–50.

24. Третьяков, Е.А. Реконфигурация распределительных электрических сетей / Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева. – Текст: непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. № 1. – С. 38–47.

б) научные работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в библиографическую базу Scopus:

25. Tretyakov, E. A. Advanced methods of transportation and distribution of electrical power in smart power grids of railways / E. A. Tretyakov. – DOI:10.1051/mateconf/201823901010 // MATEC Web of Conferences. – 2018. – vol. 239, 01010.

26. Cheremisin, V. T. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways / E. A. Tretyakov, V. T. Cheremisin. – DOI:10.1051/mateconf / 201823901011 // MATEC Web of Conferences. – 2018. – vol. 239, 01011.

27. Tretyakov, E. A. Modeling of Multi-agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways / E. A. Tretyakov, V. T. Cheremisin, G. E. Golovnev – DOI:10.1007/978-3-030-19756-8_27 // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – vol. 982.

28. Malysheva, N. Optimal choice of technical means for reactive power compensation / N. Malysheva, E. Tretyakov, K. Chernik. – DOI: 10.1109 / ICIEAM.2019.8743085 // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019), IEEE, 25-29 March. – 2019.

29. Tretyakov, E. Voltage control in distribution electric rail networks using reactive power sources based on agent-based approach / E. Tretyakov, G. Golovnev. – DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877620 // Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) – 2019.

30. Tretyakov, E. A. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways / E. A. Tretyakov. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012005 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – vol. 643.

31. Tretyakov, E. A. Control of Idle Losses in Power Transformers of Distribution Electric Networks / E.A. Tretyakov, V.T. Cheremisin. – DOI 10.1007/978-3-030-37919-3 // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. – 2020 – vol. 1.

32. Tretyakov E. Reconfiguration of intelligent electrical distribution networks of railways / E. Tretyakov, V. Cheremisin, G. Golovnev. – DOI: 10.1088/1757-

899X/760/1/012059 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. – 2020. – vol. 760.

33. Tretyakov, E. Demand management by active consumers in intelligent electric power systems / E. Tretyakov. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015705006>. // E3S Web Conf. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019). – 2020. – vol. 157.

34. Tretyakov, E.A. Increase of passage capacity of distributive electric networks with renewable energy sources through their reconfiguration / E.A. Tretyakov, V.T. Cheremisin // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2020. – vol. 3(331). – pp. 112-122.

35. Tretyakov, E.A. Testing the software and hardware complex for managing the power supply system of stationary consumers of railways / E.A. Tretyakov, V.T. Cheremisin. – DOI:10.1088/1757-899X/976/1/012020 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. – 2020. – vol. 976(1).

б) Патенты и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

36. Патент № 2587128 Российская Федерация, МПК В60М 3/02 (2006.01), H02J 13/00 (2006.01), G05B 19/04 (2006.01). Способ управления системой электроснабжения железных дорог: № 2015103358: заявл. 02.02.2015: опубл. 10.06.2016 / Третьяков Е. А.; заявитель ОмГУПС. – 5 с.: ил. – Текст: непосредственный.

37. Патент № 161387 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006.01). Регулятор мощности в распределительной сети: №2015103357: заявл. 08.12.2015: опубл. 27.12.2015 / Третьяков Е. А., Кремлев И. А.; заявитель ОмГУПС. – 3 с.: ил. – Текст: непосредственный.

38. Патент № 158428 Российская Федерация, МПК G05F 1/66 (2006.01). Устройство автоматического восстановления нормального режима системы электропитания: №2015114819: заявл. 20.04.2015: опубл. 27.02.2016 / Третьяков Е. А.; заявитель ОмГУПС. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.

39. Патент № 160078 Российская Федерация, МПК H02J 9/00 (2006.01). Устройство регулирования напряжения в контролируемой зоне распределительной сети: №2015103357: заявл. 02.02.2016: опубл. 20.04.2016 / Третьяков Е. А., Черемисин В. Т.; заявитель ОмГУПС. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.

40. Патент № 176993 Российская Федерация, МПК H02J 9/00 (2006.01). Регулируемый трансформатор: № 2017109203: заявл. 20.03.2017: опубл. 06.02.2018 / Черемисин В. Т., Третьяков Е. А., Петров П. Г.; заявитель ОмГУПС. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.

41. Групповое управление напряжением в электроэнергетических системах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666735. Заявл. 05.12.2019; опубл. 13.12.2019. В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков, А. А. Лаврухин.

42. Управление потоками мощности с энергоузелами в электроэнергетических системах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2019666736. Заявл. 05.12.2019; опубл. 13.12.2019. Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин, И. А. Кремлев.

в) монографии:

43. Третьяков, Е. А. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железных дорог: монография / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный – Омск, 2013. – 198 С.

44. Черемисин, В. Т. Совершенствование методов и средств управления транспортом и распределением электроэнергии в системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог: монография / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный – Омск, 2017. – 187 С.

г) основные научные работы, опубликованные в других изданиях:

45. Третьяков Е. А. Снижение потерь электроэнергии нетяговых потребителей за счет децентрализованной компенсации реактивной мощности / Е. А. Третьяков, Ю. В. Москалев. – Текст: непосредственный // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: Материалы II Всероссийской молодежной научно-технической конференции / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. – С. 34 – 39.

46. Третьяков Е.А. Мультиагентное управление распределением электрической энергии на железнодорожном транспорте/ Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // 120 лет железнодорожного образования в Сибири: Материалы всероссийской научно-практической конференции / Красноярский ин-т железнодорожного тр-та. – Красноярск, 2014. – С. 35 – 39.

47. Третьяков Е.А. Повышение энергоэффективности и надежности системы электроснабжения железных дорог за счет интеллектуального управления режимами/ Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Шестой международной научно-практической конференции / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2015. – С. 618 – 623.

48. Третьяков Е. А. Перспективные методы транспорта и распределения электроэнергии в интеллектуальных электрических сетях железных дорог / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Интеллектуальная энергетика на транспорте: Материалы Международной научно-практической конференции, 4, 5 октября 2018 г. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С.245 – 249.

49. Черемисин В. Т. Имитационное моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Вестник КГТУ им. Раззакова, Бишкек, Кэргыстан. – 2019. – С. 45 – 54.

50. Третьяков Е. А. Адаптивное управление распределенными энергообъектами в системе электроснабжения железных дорог / Е. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы энергетики: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2021. – С. 178 – 182.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своим учителям, научным наставникам д.т.н., профессорам Валерию Дмитриевичу Авилову и Василию Титовичу Черемисину за неоценимую помощь и вклад в работу.