

*На правах рукописи*



Косьмина Евгения Владимировна

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВАМИ FACTS ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ГИБКОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЕЙ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2025

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

**Научный руководитель:** кандидат технических наук  
**Томин Никита Викторович**

**Официальные оппоненты:** **Паздерин Андрей Владимирович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», кафедра «Автоматизированные  
электрические системы», заведующий кафедрой

**Уфа Руслан Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное  
государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», Инженерная  
школа энергетики, отделение электроэнергетики и  
электротехники, доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Иркутский государственный университет путей  
сообщения», г. Иркутск

Защита состоится: «03» марта 2026 года в 9:00 ч на заседании диссертационного совета  
24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии  
наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033,  
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН:  
<https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2025-3/>

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_» 2025 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.118.01,

доктор технических наук, доцент Солодуша Солодуша Светлана Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** С увеличением доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), зависимых от природных условий, включая ветроэнергетические установки (ВЭУ), в электроэнергетической системе (ЭЭС) возникают новые вызовы, связанные с нестабильностью производства электроэнергии. В условиях быстро развивающейся энергетической инфраструктуры, характеризующейся массовым внедрением распределенных энергетических ресурсов (РЭР) на уровне распределительных сетей, наблюдаются двунаправленные перетоки мощности, а также отклонения напряжения за пределы установленных нормативных значений, что негативно сказывается на режимной надежности.

Интеграция труднопрогнозируемых ВИЭ, а также новых типов гибких нагрузок, таких как станции зарядки электромобилей, системы накопления электроэнергии (СНЭЭ), энергоэффективные здания и т.п., создают дополнительные сложности для эффективного управления напряжением в режиме реального времени. Возникает необходимость поиска альтернативных способов компенсации дефицита или перераспределения избытка энергии, что усложняет задачу эффективного регулирования напряжения в распределительной сети с использованием традиционных методов. Современная практика эксплуатации показывает, что в этих условиях традиционные методы управления режимом распределительных сетей оказываются недостаточно эффективными, что требует разработки новых адаптивных подходов, включающих алгоритмы управления на основе искусственного интеллекта (ИИ) и устройств силовой электроники.

В этом контексте актуальным становится применение устройств гибкой системы передачи переменного тока (англ. Flexible Alternating Current Transmission System, FACTS), представляющих собой передовую технологию для повышения режимной надежности, управления перетоками мощности, обеспечения устойчивости и повышения эффективности работы как распределительных, так и передающих электрических сетей. Несмотря на то, что концепция FACTS изначально была разработана для систем передачи электроэнергии, но за последние 10-15 лет ее начали активно применять для улучшения качества электроэнергии, надежности и энергетической гибкости в распределительных сетях низкого и среднего напряжений. При этом предложенные в последние годы системы автоматического управления (САУ) устройствами FACTS позволяют эффективно оптимизировать режимы работы электрических сетей, учитывая различные параметры и условия, такие как изменчивость производства ветровой энергии, нагрузки и другие факторы. Это способствует повышению надежности и эффективности работы сетей, а также улучшению качества поставляемой электроэнергии.

Актуальность данной работы определяется необходимостью обеспечения баланса мощности и надежного электроснабжения потребителей в условиях глобальных изменений в энергетическом секторе. Основой исследования служат современные математические модели и методы машинного обучения, включая обучение с подкреплением.

**Степень разработанности проблемы.** В настоящее время существует ряд работ, посвященных изучению данной проблемы. Вопросы оценки и повышения гибкости электрических сетей рассматриваются в исследованиях ведущих ученых Н.И. Воропая, В.Г. Курбацкого, Д.В. Холкина, И.И. Чаусова, А.П. Соколова, А.М. Глазуновой, А.Б. Осака, Е. Hillberg, F. Bouffard, Р. Грюнбаума и др. Целый ряд и исследований в области управления устройствами FACTS и интеграции ветроэнергетических установок проводились авторами И.Н. Колосок, П.В. Илюшиным, Д.Н. Сидоровым, Р.А. Ситдиковым, О.В. Радионовой, В.Г. Курбацким, Д.А. Панасецким, А. Mousaei, Р. Грюнбаумом, R. Gitibin, J. Oldeen и др., которые рассматривали различные аспекты использования FACTS для повышения гибкости и эффективности распределительных электрических сетей. Другие исследования, проведенные учеными А.В. Симоновым, П.В. Илюшиным, Ю.Н. Кучеровым, П.К. Березовским, F. Bouffard, G.R. Timilsina, M.A. Hannan, K.S. Khan, L. Wang и др. посвящены анализу и оптимизации работы распределительных сетей с высокой долей ВЭУ, что также является важным аспектом для понимания проблемы управления данными системами.

Несмотря на наличие научных исследований, посвященных управлению распределительными электрическими сетями и использованию устройств FACTS, вопросы разработки интеллектуальных методов регулирования для повышения гибкости и адаптивности сетей с высокой долей ВЭУ остаются недостаточно изученными. В связи с этим дальнейшие исследования в области интеллектуального управления устройствами FACTS представляют собой актуальную научную задачу, направленную на совершенствование методов управления режимами работы распределительных сетей в условиях высокой неопределенности.

**Целью** настоящей диссертации является исследование и разработка новых интеллектуальных систем автоматического управления устройствами FACTS для повышения гибкости и эффективности управления режимами распределительных электрических сетей в условиях высокой доли ВЭУ в энергобалансе.

**Задачи исследования** включают в себя:

1. Анализ проблем гибкости современных ЭЭС.
2. Анализ существующих САУ распределительными электрическими сетями и устройствами FACTS.
3. Формирование различных подходов повышения гибкости распределительных электрических сетей с ВЭУ и оценка средств ее повышения.
4. Разработка математических моделей для описания работы распределительных электрических сетей с учетом ВЭУ и устройств FACTS.
5. Моделирование случайных состояний сети и разработка модифицированного алгоритма метода прямого-обратного хода для анализа режимов работы электрических сетей с распределенными энергетическими ресурсами.
6. Разработка методики количественной оценки гибкости напряжения для электрических сетей с распределенными энергоресурсами.
7. Исследование методов оптимизации управления устройствами FACTS для обеспечения устойчивости и гибкости электрических сетей.

8. Синтез САУ устройствами FACTS в электрических сетях на базе метода обучения с подкреплением.

9. Экспериментальная верификация разработанных методов и алгоритмов моделирования и синтеза САУ устройствами FACTS на примере релевантных схем распределительной электрической сети.

**Объектом исследования** являются первичные распределительные электрические сети среднего напряжения с высокой долей ВЭУ, требующие повышения гибкости и эффективности управления режимом в условиях стохастических колебаний мощности и сложных режимов работы.

**Предметом исследования** являются системы автоматического управления устройствами FACTS, использующие алгоритмы обучения с подкреплением.

**Методология и методы исследования.** В работе используется комплексный подход, включающий математическое моделирование и оптимизацию, имитационное моделирование, в том числе экспериментальные исследования на тестовых электрических сетях. Для синтеза САУ устройствами FACTS используются методы обучения с подкреплением и динамического программирования. Для анализа и сравнения применяемых подходов и алгоритмов также используются критерии эффективности и надежности. Программная реализация выполнена с использованием объектно-ориентированного подхода средствами языка Python и Matlab.

**Научная новизна.** В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Обоснована необходимость применения устройств FACTS с САУ на уровне первичных распределительных сетей, включающих различные РЭР, для автоматического регулирования режимов их работы с целью повышения гибкости и надежности электроснабжения. В отличие от традиционного подхода, ориентированного в основном на передачу электроэнергии и централизованное управление, предложено локальное регулирование режимов работы на уровне распределительных сетей, что позволяет значительно повысить гибкость и устойчивость электроснабжения при высокой доле ВЭУ в энергобалансе.

2. Разработан новый методический подход к синтезу самообучающихся САУ устройствами FACTS на основе метода проксимальной оптимизации стратегий (англ. Proximal Policy Optimization, PPO), обеспечивающий адаптивное регулирование напряжения и перетоков мощности в распределительных сетях с высокой долей ВЭУ в условиях стохастической генерации и изменяющейся нагрузки. В отличие от традиционных средств управления устройствами FACTS разработанный подход обеспечивает самообучение системы на основе взаимодействия с моделью сети. Это делает подход более универсальным и устойчивым к изменениям структуры сети и внешних условий.

3. Разработан модифицированный алгоритм метода прямого-обратного хода, учитывающий нелинейные характеристики нагрузки, сложную топологию сетей (включая слабозамкнутые конфигурации) и работу управляющих устройств (FACTS, СНЭЭ, ВЭУ), что обеспечивает точный анализ режимов распределительных сетей с высокой долей стохастической генерации, в отличие от классического метода, применимого только к простым радиальным сетям с

постоянной нагрузкой. Предложенный алгоритм позволяет проводить корректный анализ установившихся режимов в реалистичных условиях.

4. Разработана методика количественной оценки гибкости напряжения на основе комплекса взаимосвязанных показателей (индекс гибкости, среднее и максимальное отклонения), позволяющая сравнивать эффективность различных стратегий регулирования в распределительных сетях с устройствами FACTS и стохастической генерацией. В отличие от существующих подходов, ориентированных на качественную оценку или использование частных метрик (например, коэффициент запаса устойчивости), предложенные показатели позволяют объективно сравнивать различные стратегии управления, что особенно важно при работе с устройствами FACTS и стохастическими источниками генерации.

**Теоретическая значимость работы.** Впервые предложена методика и введены критерии количественной оценки гибкости напряжения в распределительных сетях с ВИЭ. Диссертационная работа развивает теоретические основы использования устройств FACTS в распределительных сетях с высокой долей стохастической генерации (ВЭУ). Обоснованы возможность и эффективность применения устройств FACTS для решения таких задач, как: повышение гибкости сети, стабилизация напряжения, управление перетоками мощности, повышение режимной надежности.

**Практическая значимость работы.** Важной составляющей диссертационной работы является решение актуальных задач цифровизации и адаптации современных энергосистем при интеграции источников распределенной генерации. Разработанный инструмент для моделирования распределительных сетей с ВИЭ позволяет проводить комплексный анализ влияния ВИЭ на режимные параметры сети. Разработанные системы автоматического управления повышают устойчивость и гибкость энергосистем. Комплексный подход позволяет адаптировать существующие сети к интеграции ВИЭ. Предложенные автором методы моделирования позволяют точно оценивать влияние объектов ВИЭ на параметры распределительных сетей.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ потенциала устройств FACTS для повышения гибкости и эффективности управления режимами распределительных электрических сетей и с высокой долей ВЭУ. Исследование возможности применения устройств FACTS для улучшения устойчивости и эффективности режимов работы распределительных сетей при интеграции ВЭУ.

2. Интеллектуальный подход к синтезу самообучающихся САУ для устройств FACTS на основе метода оптимизации проксимальной стратегии (англ. Proximal Policy Optimization, PPO) для адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с высокой долей ВЭУ.

3. Модифицированный алгоритм прямого-обратного хода для моделирования и анализа режимов работы распределительных электрических сетей с использованием устройств FACTS. Проведение комплексного моделирования и анализа режимов работы распределительных электрических сетей с высокой долей ВЭУ с учетом влияния устройств FACTS на параметры системы.

4. Практическая реализация и внедрение разработанных методов управления на базе программного обеспечения с возможностью количественной оценки гибкости напряжения в электрической сети. Оценка возможностей практической реализации разработанных интеллектуальных моделей САУ для устройств FACTS в реальных условиях работы распределительных электрических сетей с высокой долей ВЭУ.

Представленные выше научные положения обосновывают актуальность и значимость исследований в области интеллектуального управления устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ВЭУ и представляют интерес для научного сообщества и практических специалистов в области электроэнергетики.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности ВАК 2.4.3. Электроэнергетика:

Пункт 10. «Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения». В третьей главе диссертации представлен интеллектуальный подход к синтезу самообучающихся САУ для устройств FACTS на основе метода оптимизации проксимальной стратегии для адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с высокой долей ВЭУ (п. 3 научной новизны, положение 2 выносимое на защиту).

Пункт 11. «Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид». В первой главе представлен анализ потенциала устройств FACTS для повышения гибкости и эффективности управления режимами распределительных электрических сетей и с высокой долей ВЭУ. Во второй главе проведено исследование возможности применения устройств FACTS для улучшения устойчивости и эффективности режимов работы распределительных сетей при интеграции ВЭУ (пп. 1, 4 научной новизны, положение 1 выносимое на защиту).

Пункт 14. «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы». Во второй главе разработан модифицированный алгоритм прямого-обратного хода для моделирования и анализа режимов работы распределительных электрических сетей с использованием устройств FACTS. В четвертой главе проведено комплексное моделирование и анализ режимов работы распределительных электрических сетей с высокой долей ВЭУ с учетом влияния устройств FACTS на параметры системы (п.3 научной новизны, положение 3 выносимое на защиту).

Пункт 20. «Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и

управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии». В четвертой главе диссертации выполнена практическая реализация и внедрение разработанных методов управления на базе программного обеспечения с возможностью количественной оценки гибкости напряжения в электрической сети. Проведена оценка возможностей практической реализации разработанных интеллектуальных моделей САУ для устройств FACTS в реальных условиях работы распределительных электрических сетей с высокой долей ВЭУ (п.2 научной новизны, положение 2 выносимое на защиту).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается их соответствием базовым законам электротехники и теории электрических цепей, корректным использованием основных положений теорий математического моделирования и автоматического управления, корректностью математических моделей, соответствием теоретических положений и результатов, полученных в экспериментальных исследованиях. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях и семинарах: VIII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» (Россия, Самара, 2017); Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Россия, Иркутск, 2017, 2018); IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2018» (Россия, Казань, 2018); Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике» (Россия, Иркутск, 2018, 2024); Всероссийский форум научной молодежи «Богатство России» (Россия, Москва, 2018, 2019); X Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2019» (Россия, Иркутск, 2019); 92-е заседание семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Россия, Казань, 2020).

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электротехники и на кафедре электрических станций, сетей и систем в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», а также внедрены в производственный процесс ООО «Смарт Грид» (Приложение А). Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложение Б).

Исследования выполнялись в рамках проектов: 1. Грант РНФ № 19-49-04108 «Разработка инновационных технологий и средств для оценки и повышения гибкости будущих энергосистем», 2019-2020 гг. 2. Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FWEU- 2021-0001 «Теоретические основы, модели и методы управления развитием и функционированием интеллектуальных электроэнергетических систем». 3. Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива»).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 15 печатных работ (включая сборники статей конференций), из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3, 1 – в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, 11 – в иных изданиях. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 4 главы и заключение, изложенные на 162 страницах и включает в себя 9 таблиц, 55 рисунков и список литературы из 149 наименований. В приложениях диссертации приведены сведения об апробации и применении результатов исследования.

**Личный вклад.** Личный вклад автора состоит в исследовании и разработке новых интеллектуальных моделей управления устройствами FACTS для повышения гибкости и эффективности распределительных электрических сетей с высокой долей ВИЭ. Лично автором выполнен анализ существующих систем управления, включая их ограниченные возможности в условиях интеграции ВИЭ и предложены усовершенствованные математические модели, описывающие работу сетей с учетом динамики ВЭУ и возможностей устройств FACTS. Совместно с научным руководителем Томиным Н.В. были сформулированы задачи и цели работы, в результате чего автором были предложены этапы для решения проблем гибкости электроэнергетических систем, а также разработаны и протестированы методы оптимизации и адаптивного управления, что позволило создать САУ на основе алгоритмов обучения с подкреплением. Автор самостоятельно провел экспериментальную верификацию предложенных методов на модельных схемах, результаты которой подтвердили повышение гибкости и эффективности управления режимами распределительных электрических сетей.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна исследований и практическая значимость их результатов, а также структура работы.

В **первой главе** рассматриваются основные проблемы, связанные с гибкостью ЭЭС в условиях высокой доли ВИЭ. Приводится обзор подходов к управлению распределительными сетями и устройствами FACTS. Анализируются факторы, влияющие на снижение гибкости ЭЭС, включая стохастичность генерации ВИЭ, снижение инерционных свойств энергосистем, недостаточную адаптивность традиционных методов управления. Представлен обзор существующих интеллектуальных технологий регулирования режимов работы сетей. Также в первой главе рассматриваются требования потребителей к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии, что играет важную роль для повышения гибкости сети и, соответственно, ее надежности.

Показано, что изменения в энергетической инфраструктуре, связанные увеличением доли ВИЭ, требуют внедрения новых методов управления и повышения гибкости. На основе проведенного анализа сформулированы задачи исследования, направленные на решение проблемы гибкости современных

распределительных сетей и разработки интеллектуальных методов автоматического управления устройствами FACTS для повышения их надежности.

Во второй главе рассмотрены различные подходы к моделированию случайных состояний режима распределительных сетей, связанных со стохастичностью генерации ВЭУ. Описаны традиционные и современные средства регулирования напряжения. Отмечено, что традиционные средства остаются важным инструментом в работе электрических сетей, особенно в условиях стабильной нагрузки и невысокой доли ВИЭ. Однако современные устройства на основе силовой электроники, такие как FACTS, предоставляют значительно более широкие возможности в условиях динамично меняющейся нагрузки и высокой доли ВИЭ в энергобалансе. Они обеспечивают быструю адаптацию, высокую точность регулирования и долговременную надежность, но требуют больших первоначальных инвестиций и технического обслуживания. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на гибкость энергосистем. В главе проведен анализ различных типов устройств FACTS, которые могут использоваться для повышения гибкости и надежности электроснабжения в распределительных сетях с ВЭУ, включая статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) и статический тиристорный компенсатор (СТК).

Для проведения исследований гибкости распределительных электрических сетей с ветроэнергетическими установками и оценки средств ее повышения была применена технология имитационного моделирования, которая включает несколько этапов: 1) определение целей и задач исследования; 2) разработка математической модели электрической сети; 3) создание ее имитационной модели; 4) верификация и калибровка имитационной модели; 5) проведение экспериментов и 6) оценка гибкости распределительной сети.

Для исследования эффективности средств повышения гибкости радиальных и слабозамкнутых распределительных сетей, которые могут включать объекты распределенной генерации, в работе предложена адаптация базового алгоритма метода прямого-обратного хода. Однако основной проблемой данного метода является учет генерирующих узлов и учет замкнутых контуров, которые все чаще появляются в современных распределительных сетях с распределенной генерацией. При учете этих элементов итерационная процедура сходится недостаточно стablyно. Для решения этой проблемы в предложенной модификации  $b/f$  применяется подход приведения сети к радиальному виду на основе метода компенсационных токов. В случае слабозамкнутых сетей для каждой пары узлов, созданных каждым разрезом контура, вводятся два равных и противоположных тока, значение которых определяется путем наложения условия, чтобы разность напряжений между двумя узлами разреза стремилась к нулю.

Для учета регулирующего эффекта нагрузки в узле потребления в алгоритме метода  $b/f$  были учтены статические характеристики нагрузки в виде следующего уравнения:

$$\dot{S}_{c,k} \left( U_k^{(p)} \right) = P_{c,k} \left( U_k^{(p)} \right) + jQ_{c,k} \left( U_k^{(p)} \right) = P_{\text{тек.}} \left( \frac{U_k^{(p)}}{U_{\text{ном}}} \right)^{\alpha_U} + jQ_{\text{тек.}} \left( \frac{U_k^{(p)}}{U_{\text{ном}}} \right)^{\beta_U}, \quad (1)$$

где  $\dot{S}_{c,k}$  – комплексная мощность в узле  $k$  с учетом нагрузки;  $P_{\text{тек.}}, Q_{\text{тек.}}$  – активная

и реактивная мощности при номинальном напряжении;  $U_k$  – текущее напряжение в узле  $k$ ;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение;  $\alpha_U, \beta_U$  – коэффициенты, учитывающие изменение активной и реактивной мощностей при номинальном значении напряжения;  $p$  – номер итерации.

Адаптация алгоритма метода b/f необходима для учета различной топологии сети. В связи с этим необходимо учитывать матрицу инциденций  $\Gamma_{j,k}$ , которая позволяет создать математическую модель, описывающую связь между узлами и ветвями сети. Для корректного учета средств управления активной и реактивной мощностями в алгоритме b/f необходимо учитывать их влияние на режимные параметры сети. В зависимости от типа используемого средства управления возможны различные сценарии регулирования мощности для различных РЭР, включая различные типы FACTS, ВЭУ и СНЭЭ.

С использованием матрицы инциденций  $\Gamma_{j,k}$ , отражающей топологическую структуру сети, выполняется расчет установившихся режимных параметров. В модели корректировка полной мощности  $S_k^{(p)}$  в узле нагрузки  $k$  с учетом средств управления активной и реактивной мощностями описывается следующим уравнением:

$$\dot{S}_k^{(p)} = P_{c,k} \left( U_k^{(p)} \right) + j Q_{c,k} \left( U_k^{(p)} \right) - \left( P_{g,k}^{(p)} + j Q_{g,k}^{(p)} \right), \quad (2)$$

где  $P_{c,k}, Q_{c,k}$  – активная и реактивная мощности нагрузки в узле  $k$ ;  $P_{g,k}^{(p)}, Q_{g,k}^{(p)}$  – активная и реактивная мощности средств управления мощностью в узле  $k$ ;  $p$  – номер итерации.

Из анализа уравнения (2) следует, что использование средств управления активной и реактивной мощностями приводит к изменению напряжения в узле  $\Delta U_k$  на величину падения напряжения в ветви  $\Delta U_{k,j}$ , прилегающей к узлу. Уравнение, описывающее связь падения напряжения в ветви  $\Delta U_{k,j}$  и величины активной и реактивной мощностей при учете средств управления ими, описывается следующим образом:

$$\Delta U_k^{(p)} = \left( \frac{\left( P_{c,k}^{(p)} - P_{g,k}^{(p)} \right) \cdot R_{k,j} + \left( Q_{c,k}^{(p)} - Q_{g,k}^{(p)} \right) \cdot X_{k,j}}{U_{k,j}^{(p)}} \right) + j \left( \frac{\left( P_{c,k}^{(p)} - P_{g,k}^{(p)} \right) \cdot X_{k,j} - \left( Q_{c,k}^{(p)} - Q_{g,k}^{(p)} \right) \cdot R_{k,j}}{U_{k,j}^{(p)}} \right), \quad (3)$$

где  $Q_{c,k}, Q_{g,k}$  – реактивная мощность нагрузки и средства управления ею;  $P_{c,k}, P_{g,k}$  – активная мощность нагрузки и средства управления ею;  $U_{k,j}$  – текущее напряжение в ветви;  $R_{k,j}, X_{k,j}$  – активное и индуктивное сопротивления ветви;  $p$  – номер итерации.

С учетом вышеперечисленных предложений по развитию алгоритма разработан модифицированный алгоритм на базе метода b/f, представленный в виде блок-схемы (рисунок 1).

Предложенная модификация превращает метод b/f из узкоспециализированного инструмента для радиальных сетей в гибкий алгоритм для современных систем с распределенной генерацией и средствами управления. Кратко отличия предложенной модификации от классического метода b/f сформулированы в таблице 1.

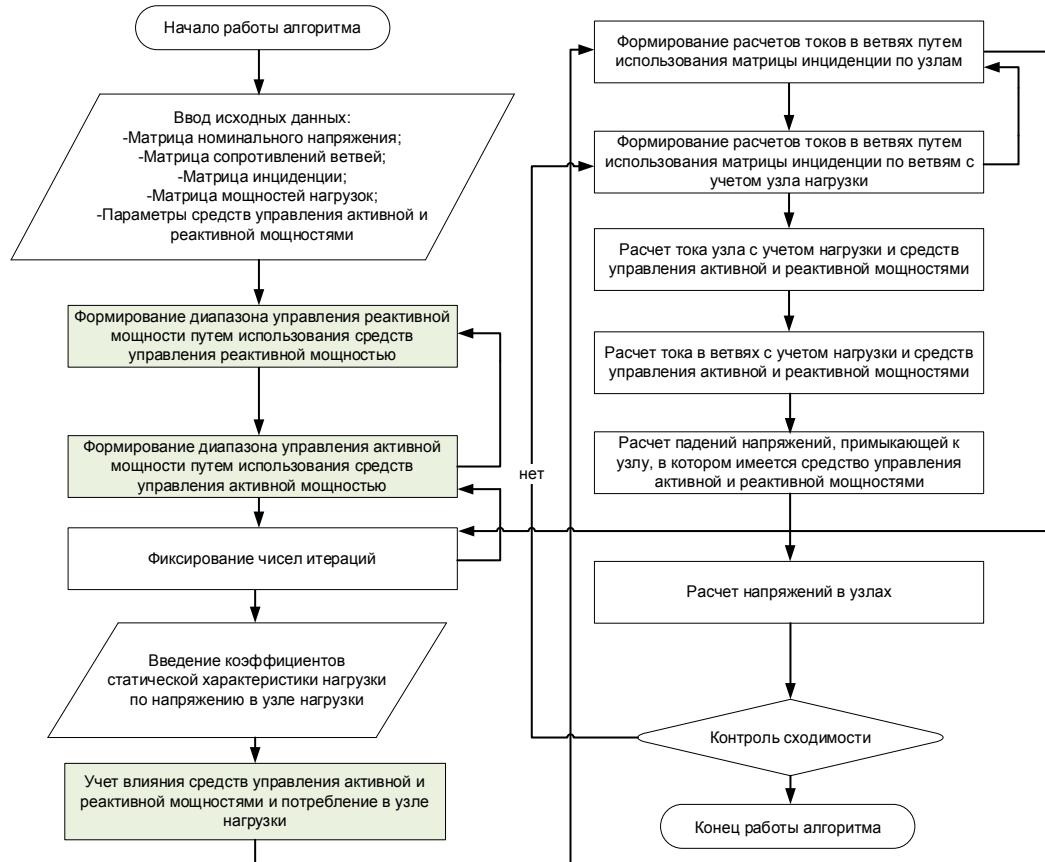


Рисунок 1 – Блок-схема модифицированного алгоритма метода backward/forward для расчета режима электрической сети с учетом средств управления активной и реактивной мощностями

Таблица 1 – Ключевые отличия между классическим и модифицированным методом b/f

Аспект	Классический b/f	Модифицированный b/f
Топология	Только радиальные	Радиальные + слабозамкнутые
Нагрузка	$P, Q = \text{const}$	$P(U), Q(U)$ с регулирующим эффектом
Генерация	Не учитывается	Поддержка ВИЭ, СНЭЭ, FACTS
Сходимость	Только для простых сетей	Стабильна при наличии управляющих устройств

Помимо этого, для оценки эффективности модифицированного метода  $b/f$  в работе была использована 9-ти узловая слабозамкнутая распределительная сеть 110-20-10 кВ промышленного энергорайона, включающая различные объекты РЭР: биогазовую энергоустановку 0,5 МВт, солнечную электростанцию 2 МВт, мини- ТЭЦ 15 МВт и дизельный генератор 0,5 МВт. Сеть питает 2 нагрузки на шинах 10 и 20 кВ через фидеры 10 и 20 кВ (рисунок 2а), а также 8 подстанций через два фидера, которые образуют одно размыкаемое кольцо. Результаты расчета потокораспределения для сети на базе модифицированного метода  $b/f$  визуализированы на рисунке 2б. Было также проведено сравнение времени сходимости режимов с использованием разных методов расчета УР для рассмотренной сети в зависимости от состояния кольца схемы (таблица 2).

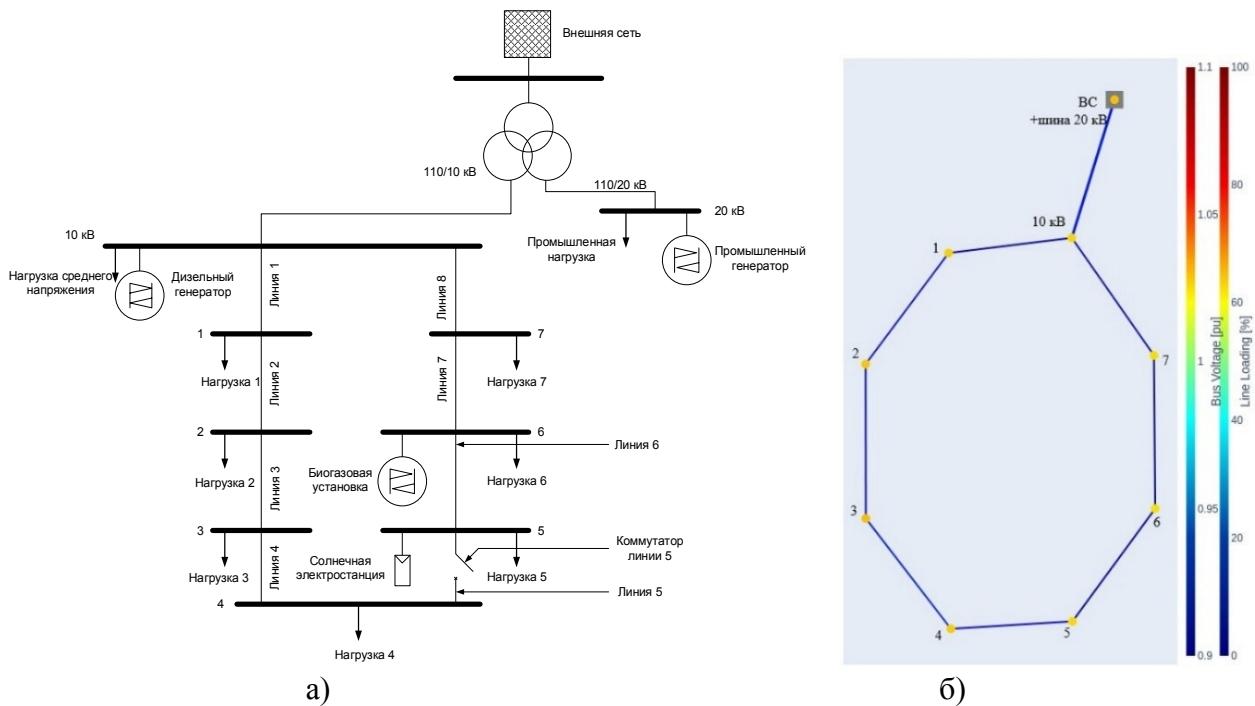


Рисунок 2 – Схема распределительной сети 110-20-10 кВ промышленного энергорайона и результаты расчета потокораспределения модифицированным методом  $b/f$

Также в главе отмечено, что интеграция ВЭУ в распределительные сети может приводить к проблемам стабильности и качества электроснабжения. В этой связи рассматривается использование устройств FACTS, таких как СТАТКОМ и статический компенсатор (СТК), для обеспечения гибкости в сетях с ВЭУ. Эти устройства играют важную роль в стабилизации напряжения и потока мощности в реальном времени. Показано, что применение распределенных устройств FACTS позволяет уменьшить потери и улучшить качество электроэнергии в распределительных сетях с высокой долей ВЭУ. Важным аспектом использования устройств FACTS является их управление. Для этого могут быть использованы различные алгоритмы управления, такие как ПИ-регуляторы, подходы на основе динамической оптимизации и др. Подчеркнуто, что выбор алгоритма управления зависит от конкретной задачи и характеристик ЭЭС с ВЭУ.

Таблица 2 – Сравнение времени сходимости расчета режимов для 9-ти узловой распределительной электрической сети 110-20-10 кВ на базе разных методов

Метод расчета	Состояние кольца схемы	
	Замкнуто	Разомкнуто
Ньютон-Рафсон	0,06290	0,06030
Гаусс-Зейдель	0,11714	0,11191
Fast Decoupled Load Flow	0,01318	0,00975
Модифицированный b/f	0,02533	0,00972

Дополнительно была оценена эффективность модифицированного метода  $b/f$  для сложнозамкнутой распределительной сети 110-35 кВ, включающей различные

ВИЭ (ВЭУ и солнечные фотоэлектрические преобразователи), которая может быть приведена к радиальному виду посредством выключателей нагрузки. Сравнение методов расчета показало, что модифицированный метод b/f обеспечивает наилучшую сходимость и точность, особенно при автоматическом регулировании режимов, превосходя по эффективности другие методы расчета (рисунок 3).

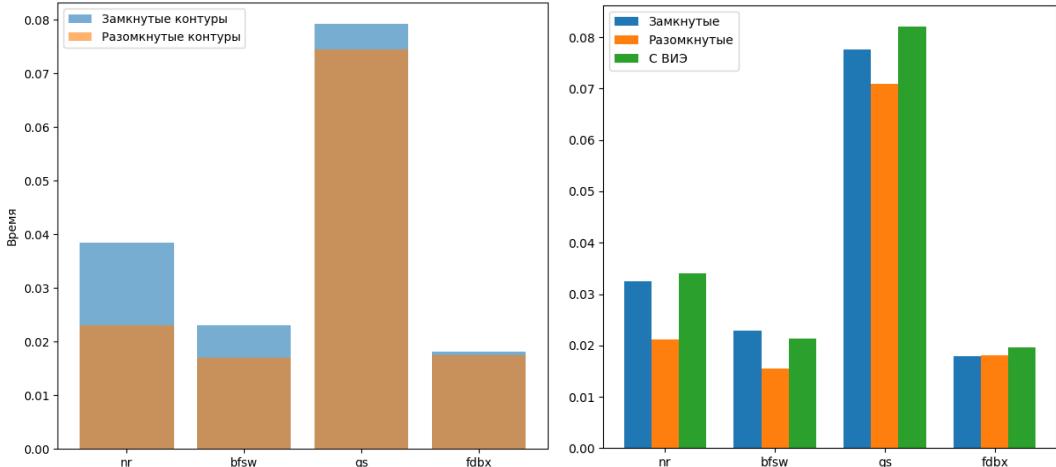


Рисунок 3 – Время сходимости расчета режима на базе разных методов расчета потокораспределения для сценариев разомкнутых и замкнутых контуров, где nr – стандартный метод Ньютона-Рафсона, bfs – модифицированный метод bf, gs – метод Гаусса-Зейделя, fdbx - упрощенная версия метода Ньютона-Рафсона

В третьей главе предложена методика комплексной оценки гибкости напряжения в распределительных сетях с высокой долей ВИЭ, в том числе ВЭУ, основанная на системе взаимосвязанных показателей, позволяющих количественно оценить способность сети поддерживать стабильные параметры напряжения в условиях стохастического характера генерации ВИЭ. Методика интегрирует три ключевых аспекта: соответствие нормативным требованиям, анализ амплитудных отклонений и интегральную оценку гибкости. Основу методики составляет коэффициент соответствия нормам  $C_s$ , отражающий процент времени нахождения напряжения в допустимом диапазоне 0,95-1,05 отн.ед. во всех узлах сети, который дополняется анализом локальных отклонений по отдельным узлам и фазам. Для оценки динамических характеристик введены показатели среднего и максимального отклонения напряжения  $\Delta U_{max}$ , а также стандартное отклонение  $\sigma_U$ , характеризующее колебания параметров. Для комплексной оценки введен интегральный индекс гибкости напряжения  $F_{idx}$ , объединяющий все перечисленные показатели в единую безразмерную величину:

$$F_{idx} = \frac{1}{1 + 10\Delta U_{avg} + 5\sigma_U}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_{avg}$  – среднее отклонение напряжения,  $\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N \cdot T} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (U_{n,t} - \bar{U})^2}$ .

Разработанная методика прошла валидацию на численных сценариях моделирования и может быть использована в инженерной практике для выбора и настройки устройств FACTS, оценки состояния электрических сетей и обоснования

решений по повышению их гибкости. Для интерпретации полученных значений предложена следующая шкала оценок (таблица 3).

Таблица 3 – Критерии оценки показателей гибкости напряжения

Показатель	Высокая гибкость	Средняя гибкость	Низкая гибкость
$C_s$	$> 95\%$	85 – 95 %	$< 75 \%$
$F_{idx}$	$> 0,9$	0,7 – 0,9	$< 0,5$
$\Delta U_{max}$	$< 5\%$	5 – 10%	$> 10\%$

В первой части главы также предложен подход к синтезу самообучающихся САУ для устройств FACTS на базе методов обучения с подкреплением (англ. Reinforcement Learning, RL), представляющих собой область машинного обучения, связанную с созданием автономных самообучающихся агентов, способных находить эффективные стратегии управления в динамично-изменяющейся среде. Во второй части главы подробно описывается методология RL как подход, который может эффективно решить задачи адаптивного управления в реальном времени. В базовом варианте RL взаимодействие агента со средой моделируется методом проб и ошибок как марковский процесс принятия решений (МППР)  $\langle S, A, P, R \rangle$ , где  $S$  – множество наблюдаемых переменных, определяющих пространство состояний системы,  $A$  – множество действий, которые может совершать агент,  $P: S \times A \times R \rightarrow [0,1]$  – стохастическая функция перехода, а  $R$  – функция вознаграждения, которая оценивает значение результата перехода. Цель RL заключается в том, чтобы агент научился изучать среду через экспериментальные испытания и относительно простую обратную связь, чтобы научиться принимать лучшие действия в данном состоянии. Он собирает вознаграждения из различных переходов состояния-действие и интегрирует их для максимизации долгосрочного вознаграждения.

Таблица 4 – Сравнительная оценка эффективности САУ для управления обратным маятником на основе разных алгоритмов RL

№	Алгоритмы RL	Метрики				
		Среднее вознаграждение	Среднее отклонение	Энерго-затраты	Среднее время стабилизации	Процент успешных эпизодов
1	DDPG	-152,4	3,089	77,902	33,5	1,0
2	PPO	-133,9	2,846	129,233	65,2	1,0
3	A2C	-1331,0	3,133	0,554	0,3	0,1
4	SAC	-1096,7	3,120	42,761	45,5	0,5

Методы RL успешно применяются для синтеза нового класса самообучающихся САУ, которые эффективно адаптируются и самостоятельно оптимизируют свою стратегию в сложных, динамически изменяющихся средах. Для оценки эффективности такого подхода в главе проведены экспериментальные испытания различных методов RL: Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG),

Proximal Policy Optimization (PPO), Soft Actor-Critic (SAC) и Advantage Actor-Critic (A2C) для синтеза самообучающихся САУ в типовой задаче стабилизации системы обратного маятника. В итоге алгоритм PPO показал наилучшую эффективность (таблица 4). Он достиг максимального среднего вознаграждения (-133,9) и успешно стабилизировал маятник в 100% случаев (процент успешных эпизодов).

На основании этого был разработан интеллектуальный подход к синтезу самообучающихся САУ для устройств FACTS на основе алгоритма PPO для задачи адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с высокой долей ВЭУ. Принцип синтеза такой САУ заключается в том, чтобы система не только адаптировала параметры и структуру на основе текущих условий, но и использовала опыт для улучшения алгоритмов управления. Предложенный принцип показан на рисунке 4.

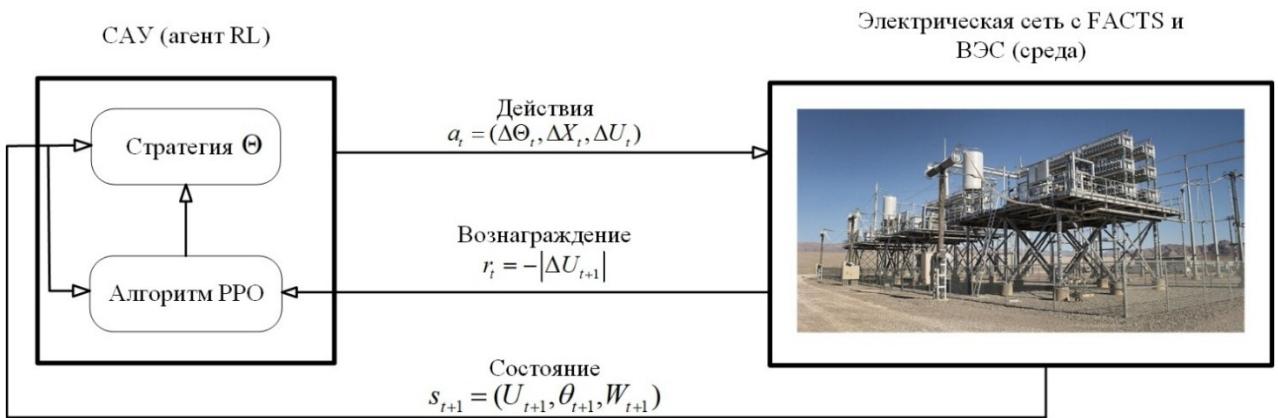


Рисунок 4 – Предложенный принцип синтеза самообучающейся САУ устройствами FACTS на базе метода RL, где  $\Delta\theta_t$  – изменение угла открытия тиристора,  $\Delta X_t$  – изменение реактивного сопротивления реактора, а  $\Delta U_t$  – изменение напряжения на выходе,  $U_{t+1}$  – новое измеренное значение напряжения на шине,  $\theta_{t+1}$  – новое значение угла открытия тиристора,  $W_{t+1}$  – новое значение скорости ветра

Алгоритм PPO позволяет быстро находить оптимальные стратегии управления, учитывая ограничения и требования безопасности. Математически это достигается за счет использования специальной функции оценки «преимущества» действий  $\widehat{A}_t$  и метода градиентного подъема, который обновляет параметры стратегии для максимизации ожидаемой суммы вознаграждений:

$$\hat{g} = E_t [\nabla_\Theta \pi_\Theta(a_t | s_t) \widehat{A}_t], \quad (5)$$

где  $\nabla_\Theta$  – градиент по параметрам  $\Theta$  стратегии;  $\pi_\Theta$  – вероятность выбора действия  $a_t$  в состоянии  $s_t$  при параметрах  $\Theta$  стратегии.

В предложенном подходе, функция вознаграждения агента PPO, основана на классической постановке управления FACTS, например, в случае СТК для ступенчатого входного сигнала:

$$\Delta U_{\text{СТК}}(t) = \frac{K_N}{K_N + K_I} \Delta U_{\text{вход.}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_W}} \right), \quad (6)$$

где  $K_N, K_I$  – коэффициенты усиления и интегрирования ПИ-регулятора соответственно;  $\Delta U_{\text{вход.}}$  – изменение входного напряжения, необходимое для компенсации отклонения от заданного опорного значения;  $T_w$  – постоянная времени, определяющая скорость реакции системы.

Тогда, согласно (5), функция вознаграждения агента описывается следующим образом:

$$r_t = -E \left[ \sum_{t=0}^T \gamma^t (U_{ref} - U_t)^2 + R(a_t) \right], \quad (7)$$

где  $U, U_{ref}$  – текущее и заданное значение опорного напряжения на шине, соответственно;  $R(a_t)$  – штраф за управляющее воздействие,  $\gamma$  – коэффициент дисконтирования.

В рамках предложенного подхода для синтеза САУ FACTS определяется среда обучения агента PowerGridEnv, специально разработанная в этой работе и основанная на открытой библиотеке OpenAI Gym. Среда моделирует различные режимы работы распределительной электрической сети, включающей ВЭС и устройства FACTS, как МППР и позволяет агенту управлять определенными параметрами. В данном случае цель агента – поддерживать напряжение на шинах в определенном диапазоне. Математически среду PowerGridEnv можно описать следующим образом: пусть  $U_{ref}$  – заданное значение опорного напряжения на шине, а  $U$  – текущее измеренное значение напряжения на этой шине. В каждый момент времени  $t$  агент может выбирать действие  $a_t = (\Delta\theta_t, \Delta X_t, \Delta U_t)$ , где  $\Delta\theta_t$  – изменение угла открытия тиристора,  $\Delta X_t$  – изменение реактивного сопротивления реактора, а  $\Delta U_t$  – изменение напряжения на выходе. Он это делает на основе наблюдения  $o_t = s_t$ , где  $s_t = (U_t, \theta_t, W_t)$ . При выборе действия агент передает его в среду. Далее среда принимает действие агента и моделирует работу электрической сети на протяжении некоторого времени. На каждом шаге среда возвращает новое состояние  $s_{t+1} = (U_{t+1}, \theta_{t+1}, W_{t+1})$ , где  $U_{t+1}$  – новое измеренное значение напряжения на шине,  $\theta_{t+1}$  – новое значение угла открытия тиристора, а  $W_{t+1}$  – новое значение скорости ветра.

В основе принципа моделирования среды лежит, в частности, уравнение (6), которое описывает итерационный процесс обновления переменных состояния (углов напряжения, амплитуд напряжения и управляющих переменных устройств FACTS) для следующей итерации ( $p + 1$ ) в модифицированном методе б/f. В результате переменные состояния, представляющие настройки управления устройствами FACTS (например, угол открытия тиристора  $\alpha$ ), формируются в векторе управляющих переменных  $x$  вместе с векторами амплитуд  $U$  и углов напряжения  $\delta$  в одном расчете потока мощности методом б/f:

$$\begin{bmatrix} \delta^{p+1} \\ U^{p+1} \\ x^{p+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^p \\ U^p \\ x^p \end{bmatrix} + (J^p + J_M^p)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^p \\ \Delta Q^p \\ \Delta F_X^p \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $J_M$  – модифицированная матрица Якоби, учитывающая влияние управляющих переменных устройств FACTS;  $J$  – исходная матрица Якоби, содержащая частные

производные невязок по переменным состояния (углам и амплитудам напряжения);  $\Delta F_x$  – дополнительные невязки в общем векторе невязок, связанные с управляющими переменными устройств FACTS.

Такой подход позволяет одновременно рассчитывать установившийся режим сети и настройки устройств FACTS (например, угол открытия тиристора) в одном итерационном процессе.

Применительно к разработке самообучающейся САУ для устройств FACTS обучение по методу РРО состоит из итеративных циклов, в которых выполняются следующие шаги:

1. Определяем общий целевой функционал согласно функции вознаграждения (7).

2. Задаем квазидинамическую модель системы согласно (8), которая, в рамках МППР, может быть описана последовательностью состояний  $s_t = (U_t, \theta_t, W_t), s_{t+1} = (U_{t+1}, \theta_{t+1}, W_{t+1}) \dots s_{t+N} = (U_{t+N}, \theta_{t+N}, W_{t+N})$ .

3. Собираем данные: Агент взаимодействует со средой, выбирая действия на основе текущего состояния и получает новое состояние и вознаграждение. В процессе этого взаимодействия агент записывает пары  $(s_t, a_t, r_t(a_t, s_t), s_{t+1})$ , для последующего обучения.

4. Обновление политики: используя собранные данные, алгоритм РРО вычисляет «преимущество»  $\widehat{A}_t$  для каждой пары  $(s_t, a_t)$ . Преимущество показывает, насколько хорошо выбранное действие отличается от ожидаемого значения. Затем выполняется оптимизация параметров политики для минимизации так называемой «суррогатной» функции потерь  $L^{\{CLIP\}(\theta)}$  со стохастического градиентного спуска, которая определяется по следующему выражению:

$$L^{\{CLIP\}(\theta)} = \mathbb{E}_t [\min(r_{t(\theta)} \cdot \widehat{A}_t, \text{clip}(r_{t(\theta)}, 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) \cdot \widehat{A}_t)], \quad (9)$$

где  $CLIP$  означает ограничение на отношение вероятностей действий текущей стратегии к старой стратегии;  $r_t(\theta) = \frac{\pi_\theta(a_t|s_t)}{\pi_{\theta_{\text{old}}}(a_t|s_t)}$  – отношение новых и старых вероятностей действий;  $\widehat{A}_t$  – оценка функции преимущества;  $\epsilon$  – параметр для сужения.

В данном случае, функция потерь  $L^{\{CLIP\}(\theta)}$  задает ограничения на изменение параметров стратегии  $\theta$  с помощью применения отсечения (англ. clipping) к градиентам. Этот механизм обеспечивает более стабильное и устойчивое обучение путем ограничения изменений в стратегии на каждом обновлении.  $CLIP$  в РРО помогает избежать слишком больших изменений в стратегии, что может привести к нестабильности или расхождению процесса обучения.

5. Выполняем синтез самообучающейся САУ: совместная оптимизация политики управления  $\pi$  на основе накопленного опыта  $D = \{(s_i, a_i, r_i, s_{i+1})\}_{i=1}^N$  с целью максимизации функции ценности (8).

Данный цикл в процессе обучения агента повторяется множество раз до достижения требуемого уровня производительности или количества итераций обучения. Таким образом, конечной целью алгоритма РРО является эффективное обучение модели агента, представлявшего собой САУ устройством FACTS, в

задаче управления режимами электрической сети, чтобы он мог выбирать действия, которые минимизируют отклонение напряжения на шине от заданного значения и обеспечивают эффективную работу системы.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности предложенной самообучающейся САУ устройствами FACTS на базе алгоритма РРО, направленные на повышение гибкости и надежности электрических сетей, включающих ВЭУ. Для проведения испытаний было разработано программное обеспечение на языке программирования Python с привлечением открытых библиотек pandapower, gym, и stable-baselines, которое позволяет обучать агента RL при квазидинамическом моделировании режимов работы электрической сети, представленной как МПР. Рассмотрены несколько тестовых схем распределительных сетей, которые, в том числе включали ВЭС в качестве одного из основных источников питания. Для упрощения моделирования все нагрузки в примерах приняты постоянными.

В первой группе экспериментов рассмотрена электрическая сеть (рисунок 5а), которая включает ВЭС (шина B2) и устройства FACTS (шина B7). Выходная мощность ВЭС определяется профилем задаваемой ветровой энергии (рисунок 5б). На рисунке 6а представлены профили узловых напряжений, полученные в результате квазидинамического моделирования режимов сети в течении суток для случая, когда в схеме нет установленных устройств FACTS. На рисунке 6б представлены результаты расчета установившегося режима модифицированным методом  $b/f$  для одного из интервалов моделирования. Хорошо видно, что на линии B1-B8 наблюдается значительная токовая перегрузка, а в узлах сети видно различные уровни профилей напряжения. Очевидно, что присутствие ВЭС в энергобалансе снижает гибкость электрической сети, что, в частности, ограничивает доступные возможности регулирования напряжения и мощности.

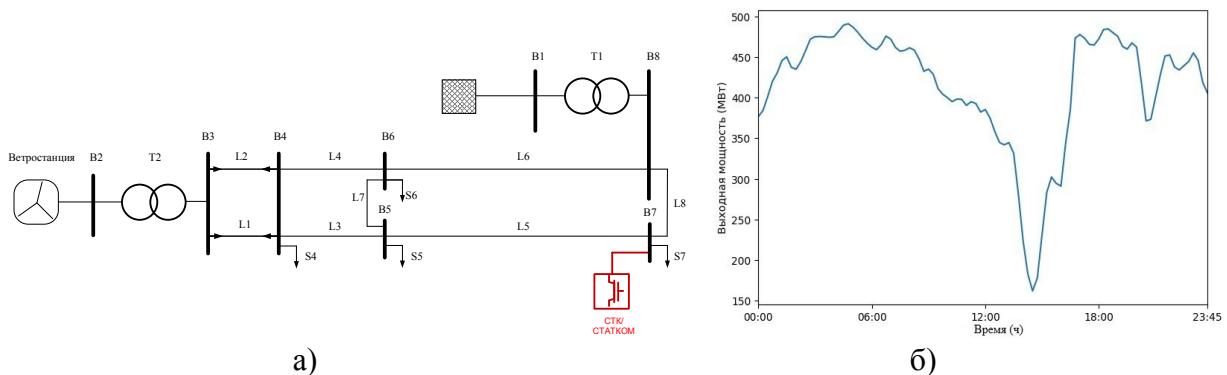


Рисунок 5 – Схема распределительной сети среднего напряжения 35 кВ с ВЭС (а) и выходная мощность ВЭС, подключенной к шине B2, в течении суток (б)

В связи с этим, рассмотрена установка и управление следующими устройствами FACTS – СТК и СТАТКОМ, подключенные к шине B7 в разных сценариях, для целей повышения гибкости сети и повышения качества регулирования напряжения. На рисунке 7 представлены рассчитанные в течение суток узловые напряжения в результате анализа потокораспределения в разных сценариях квазидинамического моделирования. На рисунке 7а рассмотрен вариант

без устройств FACTS в узле B7.

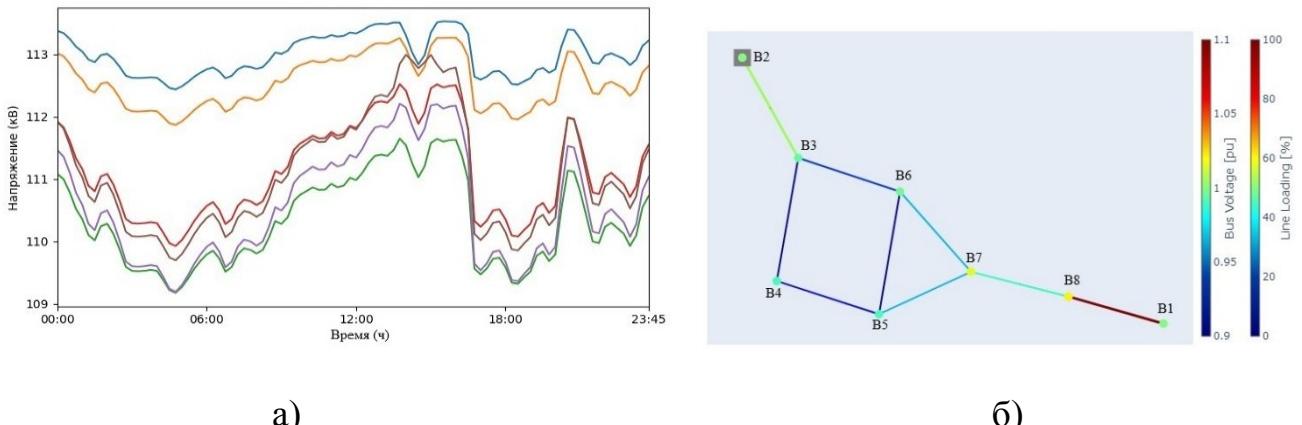


Рисунок 6 – Профили напряжения в узлах сети в течении суток для случая, когда не установлены устройства FACTS (а) и визуализация расчета режима для электрической сети 35 кВ для случая, когда не установлены устройства FACTS (б)

Также представлены смоделированные напряжения в узлах сети с использованием самообучающейся САУ для устройств СТК и СТАТКОМ (рисунок 7б, в). Результаты показывают, что автоматическое регулирование напряжений с помощью FACTS значительно снижает колебания напряжения по сравнению с режимом без регулирования. Реализуемое самообучающейся САУ адаптивное регулирование позволяет эффективно и быстро стабилизировать напряжения в условиях нестабильных колебаний активной мощности, создаваемых действиями ВЭС.

Рисунок 8а демонстрирует результат обучения агента РРО в течение 20 000 эпох, показывая, что усредненные значения  $r_t$  последовательно возрастают. Этот рост указывает на успешное уменьшение отклонения  $-\left|\Delta U_{t+1}\right|$  измеренного напряжения на шине от заданного опорного значения.

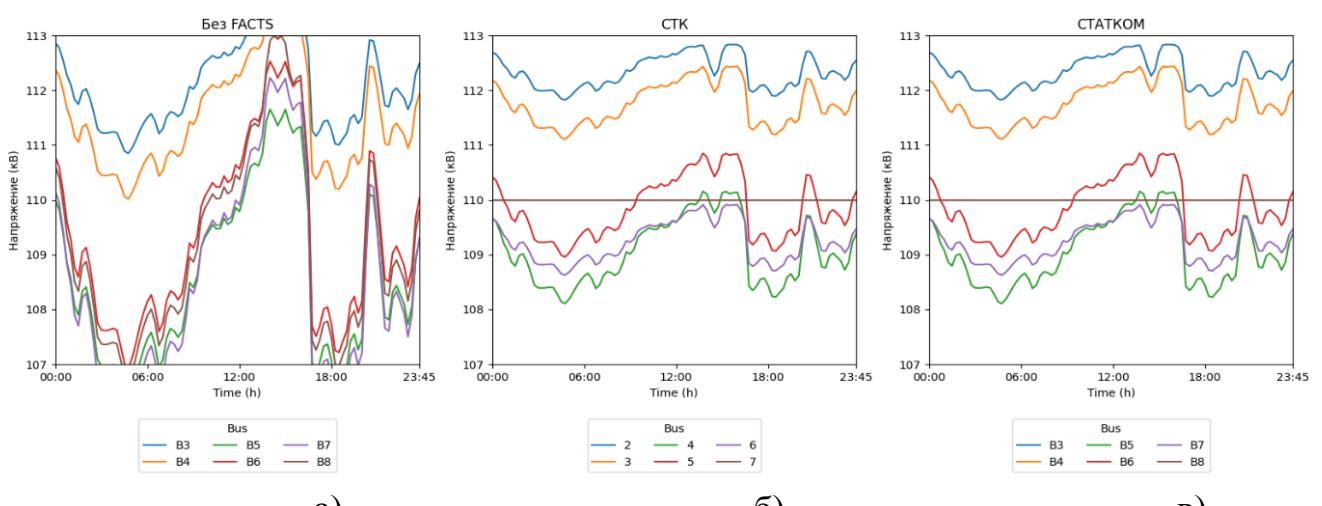


Рисунок 7 – Профили напряжения в узлах тестовой сети в течении суток без учета FACTS (а) и с учетом установленного СТК (б) и СТАТКОМ (в), управляемых самообучающимися САУ

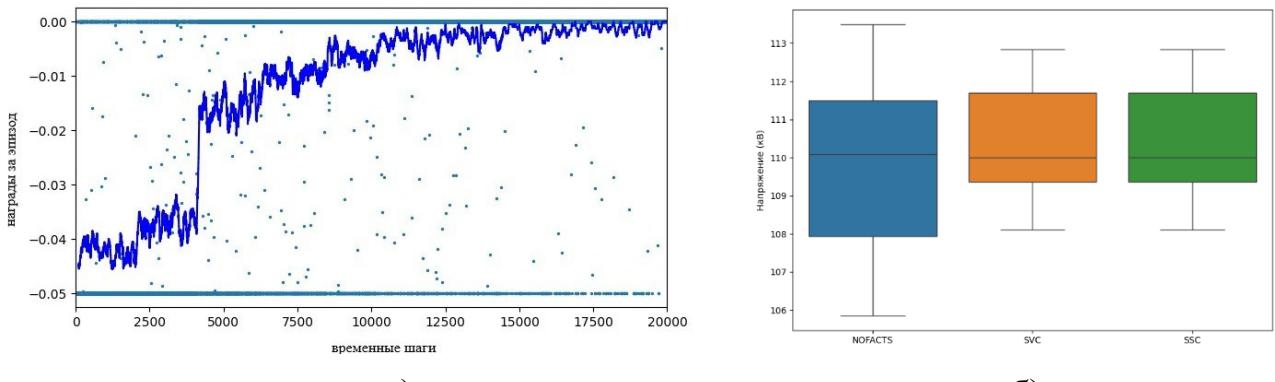


Рисунок 8 – Процесс изменения усредненных вознаграждений агента РРО в результате обучения при синтезе САУ FACTS (а) и распределение уровней напряжений по сценариям (б) для распределительной сети среднего напряжения 35 кВ с ВЭС

Предложенная в Главе 3 методика комплексной оценки гибкости была апробирована на данной тестовой сети (рисунок 5а). Проведенный сравнительный анализ показателей гибкости напряжения для двух сценариев – базовой конфигурации сети и варианта с применением устройств FACTS (СТК и СТАТКОМ) представлен на рисунке 8б и таблице 5.

Таблица 5 – Показатели гибкости напряжения для различных сценариев моделирования схемы

Показатели	без FACTS	с FACTS (СТК, СТАТКОМ)
Соответствие нормам	100 %	100 %
Индекс гибкости	0,853	0,900
Среднее отклонение напряжения	1,20 %	0,72 %
Максимальное отклонение напряжения	3,77%	2,72%

Сравнительный анализ выявил, что оба сценария обеспечивают 100%-ное соответствие нормативным пределам напряжения (0,95-1,05 отн.ед.), однако применение устройств FACTS, управляемых предложенным САУ, демонстрирует качественное улучшение динамических характеристик: индекс гибкости возрастает на 5,5% (с 0,853 до 0,900), среднее отклонение напряжения снижается на 40% (с 1,20% до 0,72%), а максимальное – на 28% (с 3,77% до 2,72%), что свидетельствует о повышении точности регулирования, устойчивости к возмущениям и эффективности использования регулировочного диапазона, а также снижает риски ложных срабатываний защит и увеличивает ресурс оборудования.

Цель второго расчетного примера заключалась в демонстрации не только регулирующих возможностей предложенной САУ для устройств FACTS, но и в целом, эффективности использования этих устройств для управления напряжением в распределительных сетях. Эффективность FACTS сравнивалась с традиционными способами регулирования: регулирование под нагрузкой (РПН) трансформаторов и использование конденсаторных батарей (КБ). В связи с этим

была рассмотрена городская распределительная сеть среднего напряжения 110 кВ, которая включала в качестве основного источника питания ВЭС (25 МВт) на шине 1 и устройство FACTS на шине 2 (рисунок 9а). На рисунке 9б представлена визуализация расчета потокораспределения для городской электрической сети в условиях отсутствия устройств FACTS.

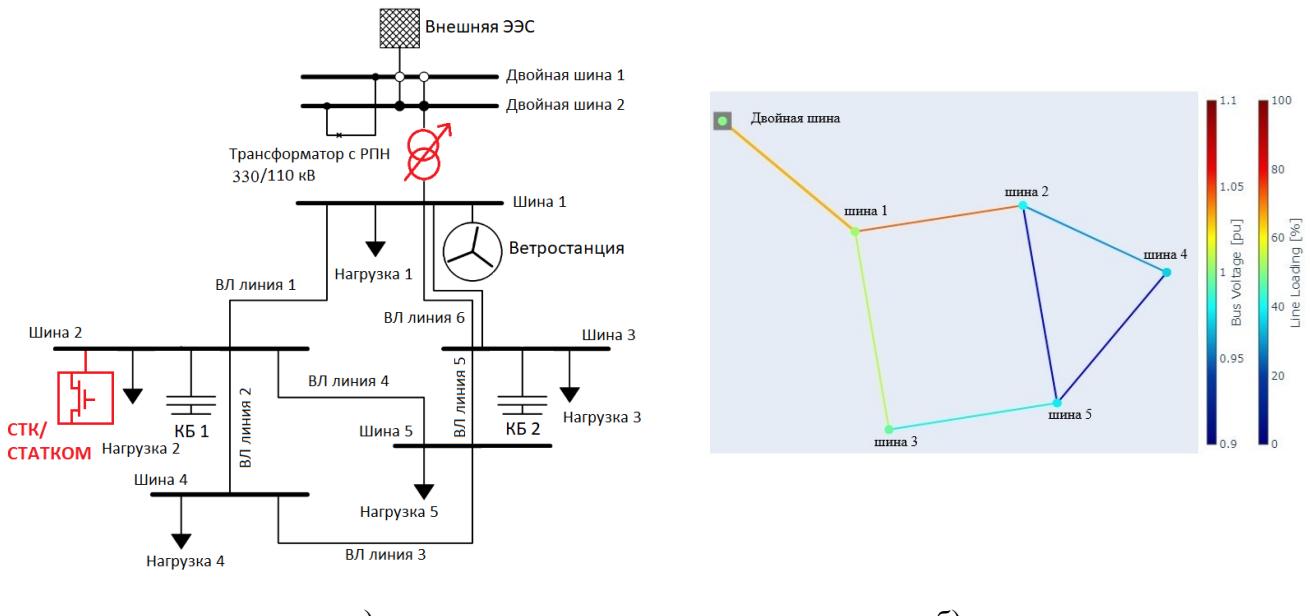


Рисунок 9 – Схема распределительной сети 110 кВ, включающая ВЭС (а)  
визуализация расчета потокораспределения для городской электрической сети с  
ВЭС для случая, когда не установлены устройства FACTS (б)

В разных сценариях моделирования в качестве FACTS рассмотрены устройства типа СТК и СТАТКОМ, управляемые предложенной САУ. Дополнительно к регулированию напряжения привлечены РПН, установленное на трансформаторе 330/110 кВ, а также конденсаторные батареи емкостью 7 МВАр (КБ 1 и КБ 2), подключенные к шинам 2 и 3 соответственно. Выходная мощность ВЭС аналогично предыдущему примеру определяется профилем задаваемой ветровой энергии. На рисунке 10 представлены смоделированные в течении суток узловые напряжения для различных сценариев регулирования в результате расчета потокораспределения с использованием модифицированного алгоритма b/f.

В этом случае рассмотрен вариант без установки СТК или СТАТКОМ на шине 2. Хорошо видно, что традиционные средства регулирования, такие как РПН и КБ «не справляются» с задачей поддержания напряжения в рамках границ режимной надежности (рисунок 10а и б). На рисунке 10 также показано сравнение профилей в узлах рассмотренной сети в течении суток с учетом установленного СТК (рисунок 10в) и СТАТКОМ (рисунок 10г), управляемых САУ. Наглядно виден эффект от применения СТК и СТАТКОМ в виде стабилизации отклонений напряжения, вызванных колебаниями прерывистой генерации от ВЭС. Подобное регулирование позволяет повысить гибкость распределительной системы в случае присутствия ВЭС.

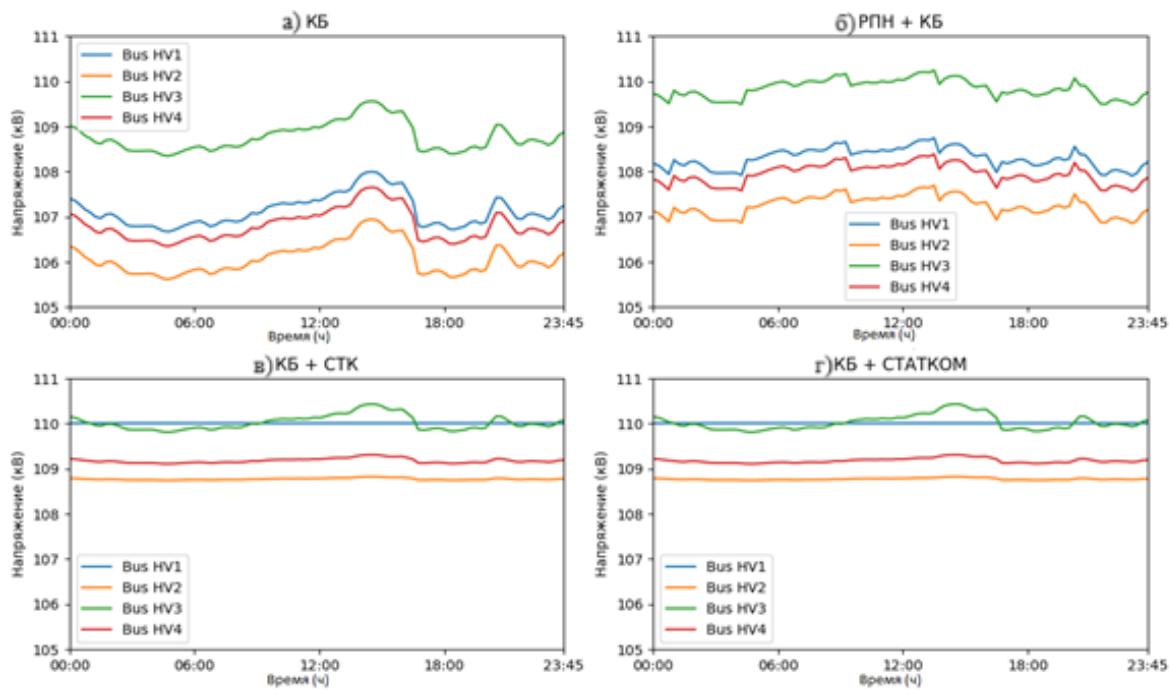


Рисунок 10 – Профили напряжения в узлах городской распределительной сети в течении суток для различных сценариев управления

Эффективность регулирования напряжения на базе FACTS можно оценить по различным количественным показателям. В таблице 6 показан процент напряжений в различных диапазонах для рассмотренных сценариев управления. Хорошо видно, что наихудший вариант регулирования наблюдается для сценария, когда используются только КБ. В этом случае 75% отклонений напряжений находятся в низких диапазонах ( $U \leq 0,98$ ). Лишь 25% значений попадают в диапазон  $0,98 \leq U \leq 1,00$ , и ни одно не достигает уровня 1,00 отн. ед. и выше. Сценарий, где используются РПН и КБ демонстрирует более устойчивое поведение: доля пониженных напряжений  $U \leq 0,98$  снижается до 27,03%, а доля напряжений в диапазоне  $0,98 \leq U \leq 1,00$  существенно возрастает (до 72,97%). Наиболее сбалансированные и близкие к нормативным значениям результаты демонстрируют сценарии, включающие устройства FACTS. С использованием FACTS процент напряжений в диапазонах  $U \leq 0,98$  и  $1,00 \leq U \leq 1,05$  минимален, зато максимален для «нормального» диапазона  $0,98 \leq U \leq 1,00$  составляя более 92%. Это наглядно свидетельствует, что использование устройств FACTS обеспечивает лучшее качество регулирования в пределах номинальных значений напряжения.

Таблица 6 – Распределение напряжений в различных диапазонах для рассмотренных сценариев управления, %

Диапазон, отн. ед.	Сценарий управления, %			
	КБ	РПН+ КБ	КБ + СТК	КБ +СТАТКОМ
$1,00 \leq U \leq 1,03$	0	0	5,21	7,08
$0,98 \leq U \leq 1,00$	25,0	72,97	94,79	92,91
$U \leq 0,98$	75,0	27,03	0	0

Предложенная методика комплексной оценки гибкости была также апробирована на данной тестовой сети (рисунок 9). Проведенный сравнительный анализ рассмотренных стратегий регулирования напряжения – базовой схемы (без дополнительных устройств), комбинации РПН с КБ и применения устройств (СТК/СТАТКОМ) с КБ представлен на рисунке 11б и в таблице 7.

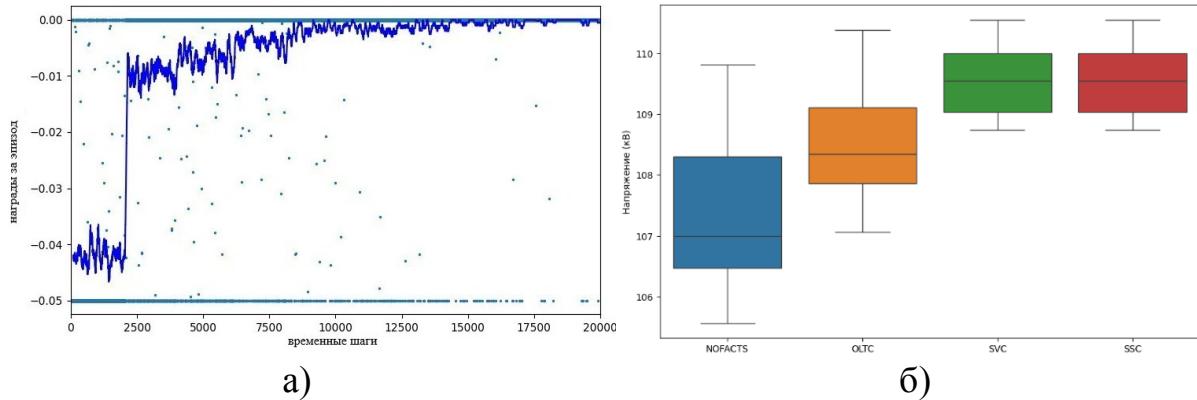


Рисунок 11 – Процесс изменения усредненных вознаграждений агента РРО в результате обучения при синтезе САУ FACTS (а) и распределение уровней напряжений по сценариям (б) для распределительной сети среднего напряжения 110 кВ с ВЭС

Таблица 7 – Показатели гибкости напряжения для различных сценариев моделирования схемы

Показатели	без устройств FACTS	РПН + КБ	с устройствами FACTS + КБ (СТК, СТАТКОМ)
Соответствие нормам	100 %	100 %	100 %
Индекс гибкости	0,805	0,870	0,943
Среднее отклонение напряжения	1,77 %	1,08 %	0,39 %
Максимальное отклонение напряжения	3,77%	2,67%	1,20%

Сравнительный анализ трех стратегий регулирования напряжения выявил существенные различия в их эффективности. Хотя все варианты (базовый, РПН+КБ и FACTS+КБ) демонстрируют 100%-ное соответствие нормативным пределам 0,95-1,05 отн.ед. в нормальных режимах, их динамические характеристики существенно различаются. Наиболее эффективным оказалось решение с устройствами FACTS, автоматически управляемых разработанной САУ, где интегральный индекс гибкости достигает 0,943, что на 17,1% выше базового уровня и на 8,4% превосходит вариант с РПН и КБ. При этом среднее отклонение напряжения снижается до рекордных 0,39% (улучшение на 78% относительно базового сценария), а максимальные отклонения уменьшаются в 3,1 раза – с 3,77% до 1,20%. Такие показатели свидетельствуют не только о высокой точности регулирования, но и о существенном повышении устойчивости сети к возмущениям, характерным для систем с высокой долей возобновляемой

генерации. Особенno важно, что применение устройств FACTS в таких сетях позволяет снизить риск ложных срабатываний защитной автоматики и увеличить ресурс электрооборудования за счет минимизации колебаний напряжения. Эти результаты подтверждают, что предложенный интеллектуальный принцип регулирования на основе FACTS обеспечивает качественно новый уровень управления режимами напряжения в сложных распределительных сетях.

Таким образом, устройства FACTS показали преимущества над традиционными методами регулирования (РПН, КБ), обеспечивая стабильность параметров сети даже при сильных колебаниях генерации. Экспериментальная проверка подтвердила теоретические выводы о том, что использование интеллектуального управления на базе устройств FACTS значительно улучшает гибкость и надежность сети с высокой долей ВЭУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования были решены задачи, направленные на повышение гибкости распределительных электрических сетей с ВЭУ за счет применения адаптивных САУ устройствами FACTS.

1. Проведен всесторонний анализ факторов, влияющих на необходимость повышения гибкости ЭЭС. Были выделены ключевые проблемы, связанные с высокой переменностью генерации ВИЭ, и классифицированы основные средства управления гибкостью, включая устройства FACTS. Это позволило обосновать актуальность применения интеллектуальных моделей управления для современных ЭЭС.

2. Выявлены недостатки существующих систем управления распределительными электрическими сетями и устройствами FACTS, среди которых низкая адаптивность, необходимость постоянной настройки и ограниченная эффективность в условиях переменной генерации ВИЭ. Подтверждена необходимость разработки новых интеллектуальных методов управления.

3. Предложены и апробированы концептуальные подходы к повышению гибкости распределительных сетей с ВЭУ, включающие методы адаптивного регулирования параметров сети, направленные на снижение потерь мощности, увеличение интеграционной способности ВИЭ и обеспечение надежного электроснабжения потребителей. Проведена оценка основных средств повышения гибкости.

4. Разработаны математические модели для описания режимов работы распределительных электрических сетей с учетом ВЭУ и устройств FACTS. В моделях учтены стохастичность выработки ВИЭ, параметры загрузки сети, особенности работы регулирующих устройств и влияние интеллектуальных систем управления на устойчивость и надежность сети.

5. Выполнено моделирование случайных состояний сети и предложена модификация метода прямого-обратного хода, адаптированного для оценки средств повышения гибкости в радиальных и слабозамкнутых распределительных

сетях. Для случая слабозамкнутых сетей рассмотрена процедура приведения сети к радиальному виду на основе метода компенсационных токов.

6. Разработана методика количественной оценки гибкости напряжения, позволяющая оценить способность электрической сети поддерживать напряжение в допустимых пределах при наличии флюктуаций генерации и потребления, обусловленных интеграцией распределенных энергоресурсов (в частности ВИЭ).

7. Исследованы современные подходы методов оптимизации управления устройствами FACTS, повышающие устойчивость и гибкость электрических сетей. Проведенный сравнительный анализ показал, что адаптивные методы на основе машинного обучения превосходят традиционные алгоритмы по эффективности управления параметрами сети.

8. Разработана модель самообучающейся САУ устройствами FACTS на основе метода обучения с подкреплением. Реализация разработанного метода выполнена в виде программного обеспечения в среде Python, что подтверждает возможность его интеграции в существующие энергосистемы.

9. Проведены экспериментальные исследования на примере распределительных сетей среднего напряжения, включающих ВЭУ. Моделирование различных сценариев работы сети на примере тестовых схем подтвердило эффективность предложенной САУ устройствами FACTS в задаче повышения режимной надежности и гибкости электрических сетей.

Разработанные алгоритмы и САУ устройствами FACTS с применением методов машинного обучения позволяют существенно повысить гибкость и надежность распределительных электрических сетей с высокой долей ВИЭ. Предложенные самообучающиеся САУ способствуют минимизации потерь мощности, улучшению качества электроэнергии и повышению устойчивости сети в условиях стохастической генерации. Полученные результаты могут быть использованы в реальных энергосистемах для повышения их гибкости и эффективности эксплуатации.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Воронцов Д.В. Виртуальные станции для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов / Д.В. Воронцов, Е.В. Уколова, И.Н. Шушпанов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №. 9 (116). – С. 86-94.

2. Уколова Е.В. Развитие метода backward/forward для исследования гибкости систем электроснабжения / Е.В. Уколова, Н.И. Воропай // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – С. 24-35.

3. Kosmina E.V. FACTS Devices to Ensure Operational Reliability of Modern Power Systems / E.V. Kosmina, N.V. Tomin // Energy Systems Research. – 2024. – Vol. 7. – №.3. – pp.53-63.

*Публикации в научных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science Core Collection:*

1. **Kosmina E.** Analysis of electricity supply systems flexibility and problems to be investigated / **E. Kosmina**, N. Voropai // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Vol. 216. – P. 01027

*Публикации в других изданиях:*

1. **Уkolova E.B.** Исследования оптимального местоположения накопителей в интеллектуальной энергосистеме / **Е.В. Уkolova**, М.Е. Шушпанова // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2017. – С. 412-419.

2. **Уkolova E.B.** Анализ экономической и экологической эффективности применения источников альтернативной энергии для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов / **Е.В. Уkolova**, И.Н. Шушпанов // Электроэнергетика глазами молодежи-2017. – 2017. – С. 128-131.

3. **Уkolova E.B.** Оценка состояния активных сетей / **Е.В. Уkolova**, И.Н. Шушпанов // Энергия-2018. – 2018. – С. 48-48.

4. **Уkolova E.B.** Алгоритм применения источников альтернативной энергии для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов / **Е.В. Уkolova**, И.Н. Шушпанов // Богатство России. – 2018. – С. 315-316.

5. **Уkolova E.B.** Обзор системы реконфигурации электрической сети на базе искусственного интеллекта / **Е.В. Уkolova**, И.Н. Шушпанов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2018. – С. 418-422.

6. **Уkolova E.B.** Классификация средств обеспечения качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения / **Е.В. Уkolova** // Системные исследования в энергетике. – 2018. – С. 29-33.

7. **Уkolova E.B.** Обеспечение качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения / **Е.В. Уkolova** // Электроэнергетика глазами молодежи-2018. – 2018. – С. 196-197.

8. Осопов Т.А. Управление виртуальными электростанциями / Т.А. Осопов, И.В. Гусевской, **Е.В. Уkolova** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2019. – С. 262-265.

9. **Уkolova E.B.** Энергетическая стратегия применения интеллектуальных энергетических систем / **Е.В. Уkolova**, Н.А. Шамарова, И.Н. Шушпанов // Богатство России. – 2019. – С. 232-233.

10. **Уkolova E.B.** Анализ метода backward/forward для расчета потокораспределения неоднородной радиальной распределительной электрической сети / **Е.В. Уkolova** // Электроэнергетика глазами молодежи-2019. – 2019. – С.84- 87.

11. **Косьмина Е.В.** Анализ причин снижения гибкости электроэнергетических систем и мероприятий по ее повышению / **Е.В. Косьмина**, Н.И. Воропай // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2020. – С. 407- 416.

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*

1. **Уколова Е.В.** Программа выбора оптимальных параметров функционирования активных систем электроснабжения с большой долей частотных преобразователей / И.Н. Шушпанов, К.В. Суслов, **Е.В. Уколова** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614399. Правообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № 2019613115; заявл. 26.03.2019; зарегистр. 04.04.2019. Бюл. № 4.

2. **Косьмина Е.В.** Программа для расчета параметров режима петлевой распределительной электрической сети с активными элементами / И.Н. Шушпанов, К.В. Суслов, **Е.В. Косьмина** // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020665563. Правообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № 2020664330; заявл. 19.11.2020; зарегистр. 27.11.2020. Бюл. № 12.

Подписано в печать 12.12.2025. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,75.

Тираж 110 экз. Зак. 106-106к.

Отпечатано в Издательстве

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 81/12а