



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Иркутский
государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО
ИрГУПС)

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. проректора по научной работе,
ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет путей
сообщения»

кандидат технических наук
Ильин Алексей Владимирович



29 января 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Косьминой Евгении Владимировны «Интеллектуальное управление устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика

1. Актуальность темы исследований

Интеграция возобновляемых источников энергии, в частности ветроэнергетических установок (ВЭУ), в распределительные сети сопряжена с существенными вызовами, такими как стохастичность генерации, ухудшение качества электроэнергии и снижение режимной надежности. В этих условиях традиционные методы управления оказываются недостаточно эффективными, что требует разработки новых интеллектуальных подходов к управлению сетевыми режимами. Применение устройств гибкой системы передачи переменного тока (англ. Flexible Alternating Current Transmission System, FACTS), для повышения гибкости и устойчивости сетей с высокой долей ВИЭ является перспективным направлением. Однако эффективность их использования в значительной степени зависит от применяемых алгоритмов управления. Исследование и разработка самообучающихся систем автоматического управления (САУ) на основе методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности обучения с подкреплением (англ. Reinforcement Learning, RL), представляют собой своевременный и научно значимый ответ на вызовы современной энергетики.

Обеспечение устойчивости энергосистемы является одной из важных задач противоаварийного управления. Поддержание требуемого уровня устойчивости по напряжению требует эффективного регулирования напряжения в ЭЭС, однако принципы функционирования автоматик существующей структуры противоаварийного управления ЭЭС России, как показывает практика, не всегда

позволяют в полной мере корректно выдавать управляющие воздействия во всех режимах ее работы и являются реактивными, реагирующими на измеряемые отклонения контролируемых параметров электроэнергетического режима. В связи с этим возникает необходимость разработки более интеллектуальных и адаптивных комплексов. Таким образом, создание комплексного решения, дополняющего существующую систему противоаварийного управления интеллектуальными комплексами, такими как мультиагентные системы и машинное обучение, которые обладают высокой степенью адаптивности и быстродействия, является востребованной задачей.

2. Научная новизна диссертационного исследования

Научная новизна исследований автора и полученных им результатов состоит в предложенных принципах противоаварийного управления для обеспечения устойчивости по напряжению, а также в реализации предложенных методов в программном обеспечении. Наиболее существенными и новыми научными результатами работы являются следующие:

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.

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.

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.

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.

3. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация объемом 162 страницы состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 149 наименований, 2 приложений.

Во введении показана актуальность работы, сформулирована её цель, определена научная новизна исследований, показана практическая значимость и перечислены области ее применения, представлены положения, выносимые на защиту, 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 энергетическая инфраструктура, в связи с увеличением доли ВИЭ требует новых методов управления и повышения гибкости. В главе сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены методические основы исследования гибкости распределительных сетей с ВЭУ. В главе последовательно раскрыты особенности режимов работы сетей с ВЭУ, включая международный опыт применения функций LVRT/HVRT. Проведен сравнительный анализ традиционных и современных средств регулирования напряжения на основе силовой электроники, показавший преимущества последних. Разработана имитационная технология и описаны этапы моделирования, включая моделирование случайных состояний нагрузки и генерации ВЭУ. Значимым результатом данной главы является развитие метода прямого-обратного хода (backward/forward). Предложенная модификация алгоритма позволяет учитывать нелинейные характеристики нагрузки, сложную (включая слабозамкнутые) топологию сети, а также работу управляющих устройств (FACTS, СНЭЭ, ВЭУ). Эффективность модифицированного алгоритма подтверждена сравнительными расчетами, показавшими его высокую скорость сходимости и универсальность по сравнению с классическими методами. В главе теоретически обосновано применение распределенных устройств FACTS (D-FACTS) и представлена их интеграция в математическую модель сети.

В третьей главе реализован переход от анализа и моделирования к синтезу интеллектуальных систем управления. В параграфе 3.1 рассмотрена проблема ограничения традиционных САУ и обосновывается целесообразность применения методов обучения с подкреплением (RL). Важным методическим вкладом является разработанная методика комплексной оценки гибкости напряжения, основанная на системе взаимосвязанных показателей (коэффициент соответствия нормам, среднее и максимальное отклонения, интегральный индекс гибкости). Предложен и детально описан принцип синтеза самообучающейся

САУ для устройств FACTS на базе алгоритма PPO. Автором разработана специализированная среда обучения PowerGridEnv, формализованы пространство состояний, действий и функция вознаграждения, что свидетельствует о высоком уровне теоретической проработки.

В четвертой главе описаны модели электрических сетей, созданные в пакете Pandapower, включая распределительную сеть среднего напряжения с ветростанцией и городскую сеть с ВЭУ. Эксперименты были направлены на верификацию модифицированного алгоритма прямого-обратного хода и апробацию синтезированной RL-системы управления. Результаты, представленные в виде графиков и сравнительных таблиц, наглядно демонстрируют, что предложенные решения позволяют улучшить профиль напряжения, повысить гибкость и устойчивость сети в условиях стохастической генерации.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Приложения содержат акты внедрения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации работы заключается в развитии теоретических основ использования устройств FACTS в распределительных сетях с высокой долей стохастической генерации. Впервые предложена методика и введены критерии количественной оценки гибкости напряжения в распределительных сетях с ВИЭ.

5. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

п. 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. 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.

п. 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. 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.

6. Обоснованность и достоверность результатов научных исследований 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.

7. Апробация и публикации результатов диссертационной работы

Основные выводы по теме диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 10 научных конференциях и семинарах международного уровня. По теме исследования опубликованы 15 статей, из них 3 публикации уровня К1, К2 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3, 1 публикации, индексируемые в международных базах цитирования в Scopus и Web of Science Core Collection и 11 статей в журналах, индексируемых в РИНЦ. Зарегистрированы 2 программы на ЭВМ.

8. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

1. В работе убедительно продемонстрированы технические преимущества применения устройств FACTS с интеллектуальным управлением. Однако экономический аспект их внедрения раскрыт фрагментарно. Отсутствует сравнительный анализ капитальных затрат на приобретение и установку FACTS-

устройств (СТАТКОМ, СТК) и операционных расходов на их обслуживание с экономическим эффектом от повышения гибкости, снижения потерь и улучшения качества электроэнергии.

2. В работе представлены модифицированный алгоритм «прямого-обратного хода» и алгоритм обучения с подкреплением РРО, показавшие высокую эффективность на тестовых схемах электрических сетей. Однако отсутствует оценка их вычислительной сложности и времени сходимости применительно к крупным распределительным сетям, характерным для реальных энергорайонов. Возникает вопрос о масштабируемости предложенного подхода и его практической применимости в системах оперативно-диспетчерского управления, функционирующих в режиме, близком к реальному времени.

3. Автор справедливо указывает на преимущества метода РРО перед другими алгоритмами RL (DDPG, SAC, A2C) в задаче стабилизации. Однако в работе отсутствует сравнение эффективности предложенной САУ на базе РРО с современными не-RL методами адаптивного и оптимального управления, такими как, например, методы, основанные на нелинейном программировании или модельно-прогнозирующем управлении (MPC). Такое сравнение позволило бы более объективно оценить добавочную ценность применения сложных методов искусственного интеллекта по сравнению с хорошо зарекомендовавшими себя традиционными подходами к синтезу систем управления.

4. В диссертации не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с надежностью и отказоустойчивостью такой системы. Не ясно, как САУ будет вести себя в нештатных ситуациях (например, при выходе из строя датчиков, некорректных данных от измерительных устройств или коммутациях в сети), а также как обеспечивается защита от потенциальных кибератак, которые могут нарушить процесс обучения или спровоцировать дестабилизирующие управляющие воздействия.

Указанные вопросы и замечания не снижают научной и практической ценности, представленной Е.В. Косьминой диссертационной работы и могут рассматриваться как пожелания для дальнейших исследований в данном научном направлении.

2. Заключение

Диссертация Косьминой Евгении Владимировны «Интеллектуальное управление устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, имеющая важное теоретическое и практическое значение для электроэнергетики. Содержание диссертации соответствует заявленной цели и поставленным задачам и детально отражает последовательность их решения. Диссертационная работа оформлена в соответствии со всеми требованиями. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и полностью

отражает основные научные и практические результаты исследований. Отмеченные замечания имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки рассматриваемой диссертационной работы.

Диссертационная работа Е.В. Косьминой полностью соответствует критериям п. 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), а соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 Электроэнергетика.

Отзыв на диссертацию Косьминой Евгении Владимировны «Интеллектуальное управление устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок» обсужден и одобрен на заседании кафедры «Электроэнергетика транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИРГУПС) 23.01.26 г., протокол № 6.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Тихомиров Владимир Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» - Irkutsk State Transport University (ФГБОУ ВО ИРГУПС – ISTU).

664074, Сибирский федеральный округ, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

Тел.: +7(3952) 638-383

E-mail: mail@irgups.ru

Я, Тихомиров Владимир Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Косьминой Евгении Владимировны и их дальнейшую обработку.



29 01 2026 г.