

ОТЗЫВ

официального оппонента - доктора технических наук
Паздерина Андрея Владимировича на диссертационную работу
Косьминой Евгении Владимировны
на тему «**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

Актуальность диссертационной работы Косьминой Е.В. определяется современными тенденциями развития электроэнергетики, в рамках которых распределительные электрические сети переходят от роли пассивных элементов электроснабжения к активным объектам управления. На данном уровне всё более широко внедряются источники распределённой генерации, в том числе ветроэнергетические установки, что приводит к существенному усложнению режимов работы сетей и повышению требований к системам управления. В современных условиях именно гибкость распределительных сетей становится ключевым свойством, определяющим возможность их устойчивого и надёжного функционирования при стохастическом характере генерации и изменяющейся нагрузке.

Следует отметить, что ветроэнергетические установки оказывают специфическое и наиболее выраженное влияние именно на режимы распределительных электрических сетей. В отличие от систем передачи, распределительные сети характеризуются ограниченной пропускной способностью линий, меньшими запасами устойчивости по напряжению, высокой чувствительностью напряжения к локальным изменениям генерации и нагрузки, а также отсутствием развитых механизмов перераспределения потоков мощности. В этих условиях даже относительно небольшие колебания выработки ВЭУ могут приводить к заметным отклонениям напряжения, ухудшению показателей качества электроэнергии, росту потерь и снижению допустимого объёма присоединения новых объектов генерации.

С практической точки зрения указанные эффекты напрямую отражаются на деятельности сетевых компаний. Нарушение нормативных уровней напряжения, увеличение числа переключений регулирующих устройств, рост потерь электроэнергии и ограничение возможности технологического присоединения новых ВЭУ приводят к снижению эффективности эксплуатации распределительных сетей и росту эксплуатационных затрат. В ряде случаев сетевые организации вынуждены либо ограничивать мощность присоединяемых источников генерации, либо реализовывать капиталоемкие мероприятия по реконструкции сети, что не всегда является экономически обоснованным решением.

Особенностью распределительных сетей является также то, что возникающие при интеграции ВЭУ режимные проблемы носят локальный

характер и требуют локальных средств управления, способных оперативно воздействовать на параметры сети вблизи точек присоединения генерации. При этом традиционные средства регулирования напряжения и реактивной мощности, широко применяемые в сетевых компаниях, как правило, ориентированы на квазистационарные режимы и не обеспечивают необходимой гибкости при высокой вариативности режимных параметров.

В этих условиях особую практическую значимость приобретают устройства FACTS как технические средства повышения гибкости распределительных электрических сетей за счёт локального и быстродействующего регулирования напряжения и реактивной мощности. Применение FACTS позволяет сетевым компаниям расширить допустимый диапазон режимов без масштабной реконструкции сети, повысить пропускную способность отдельных участков, снизить потери и обеспечить соблюдение нормативных требований к качеству электроэнергии при высокой доле ветроэнергетических установок.

Вместе с тем эффективность применения устройств FACTS в распределительных сетях в значительной степени определяется используемыми системами автоматического управления. В условиях стохастического характера генерации ВЭУ, нелинейности нагрузок и разнообразия топологий распределительных сетей традиционные алгоритмы управления оказываются недостаточно адаптивными и требуют частой перенастройки. Это снижает эксплуатационную надёжность и увеличивает нагрузку на оперативный персонал сетевых компаний.

Таким образом, задача повышения гибкости распределительных электрических сетей на основе интеллектуального управления устройствами FACTS, ориентированного на реальные условия эксплуатации распределительных сетей и практические задачи сетевых компаний, является актуальной и практически значимой. Диссертационная работа Косьминой Е.В. направлена на формирование научно обоснованных методов и инструментов, позволяющих повысить эффективность эксплуатации распределительных сетей, расширить возможности интеграции ветроэнергетических установок и снизить необходимость капиталоемких мероприятий по развитию сетевой инфраструктуры.

2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Научная новизна диссертационной работы Косьминой Е.В. заключается в разработке и обосновании комплекса методических и алгоритмических решений, направленных на повышение гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок за счёт интеллектуального управления устройствами FACTS. К основным научным результатам, выносимым на защиту, относятся:

1. Обоснование целесообразности применения устройств FACTS в распределительных электрических сетях с высокой долей распределённой генерации в качестве средств активного управления режимами, обеспечивающих повышение гибкости и устойчивости сети в условиях

стохастической выработки ВЭУ.

2. Разработка интеллектуального подхода к синтезу самообучающихся систем автоматического управления устройствами FACTS на основе метода оптимизации проксимальной стратегии (РРО). Предложенный подход позволяет формировать управляющие воздействия в условиях неопределённости параметров сети и изменяющихся режимов без жёсткой параметрической настройки регуляторов.

3. Развитие метода прямого-обратного хода для расчёта установившихся режимов распределительных электрических сетей с учётом нелинейных характеристик нагрузки, сложной топологии (включая слабозамкнутые конфигурации) и влияния управляющих устройств, что расширяет возможности практического применения данного метода.

4. Разработка методики количественной оценки гибкости напряжения на основе системы показателей и интегрального индекса, позволяющей проводить сопоставительный анализ различных стратегий управления и конфигураций сети при высокой доле ВЭУ.

Отличительной особенностью полученных результатов является их ориентация на распределительный уровень электрических сетей, что принципиально отличает представленную работу от значительной части существующих исследований, сосредоточенных преимущественно на магистральных сетях. Совокупность полученных результатов характеризует диссертационную работу Косьминой Е.В. как целостную и завершённую научно-квалификационную работу, направленную на решение актуальной научно-технической задачи.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методов анализа режимов распределительных электрических сетей в условиях высокой доли стохастической генерации, а также в формализации понятия гибкости напряжения и переходе к её количественной оценке. Полученные результаты расширяют представления о возможностях применения интеллектуальных методов управления в электроэнергетике с сохранением физической интерпретируемости моделей.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных алгоритмов и программных средств при проектировании и исследовании систем управления устройствами FACTS в распределительных сетях. Результаты имитационного моделирования демонстрируют потенциальную эффективность предложенных решений при различных сценариях изменения нагрузки и генерации. Наличие программной реализации и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ подтверждает прикладную направленность выполненных исследований.

4. СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе Косьминой Е.В., являются в достаточной степени обоснованными и подтверждёнными результатами теоретических и вычислительных исследований. Работа выполнена на основе системного методологического подхода, в рамках которого каждый этап исследования логически связан с предыдущим и опирается на чётко сформулированные исходные предпосылки и допущения.

Обоснованность результатов обеспечивается, прежде всего, проведённым аналитическим обзором современной отечественной и зарубежной научной литературы, позволившим корректно определить текущее состояние исследований в области управления распределительными электрическими сетями с высокой долей ВИЭ, выявить существующие ограничения и сформулировать научную задачу диссертационного исследования. На основе данного анализа автором последовательно сформирована методическая база исследования, включающая формализацию задачи повышения гибкости распределительных сетей, разработку математических моделей электрической сети, нагрузки, ветроэнергетических установок и устройств FACTS.

Выбор используемых методов и инструментов является аргументированным и методически корректным. В частности, применение модифицированного метода прямого-обратного хода для расчёта установившихся режимов распределительных сетей обосновано его вычислительной устойчивостью и пригодностью для анализа сетей со сложной топологией, нелинейными характеристиками нагрузки и наличием управляющих устройств.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением серии верифицирующих вычислительных экспериментов на модельных схемах распределительных электрических сетей различной сложности. Результаты моделирования демонстрируют улучшение показателей гибкости напряжения, снижение отклонений напряжения и повышение эффективности регулирования по сравнению с базовыми вариантами управления.

Выводы по главам диссертационной работы логично вытекают из представленного материала, адекватно отражают содержание проведённых исследований и в совокупности подтверждают достижение поставленной цели и решение сформулированных задач. Представленные научные положения и результаты обладают внутренней согласованностью, методической целостностью и достаточной степенью обоснованности для их использования в дальнейших научных и прикладных исследованиях.

5. 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).

6. АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Косьминой Е.В. содержит введение, 4 главы и заключение, 2 приложения, изложенные на 162 страницах, и включает в себя 9 таблиц, 55 рисунков и список литературы из 149 наименований. В приложениях приведены сведения об апробации и применении результатов исследования.

Во *введении* представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, формулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит глубокий и систематизированный анализ проблемы гибкости ЭЭС, классификацию средств ее повышения, требований потребителей и современных подходов к управлению устройствами FACTS. На этой основе четко сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2 посвящена формированию методического аппарата. В ней рассмотрены особенности режимов сетей с ВЭУ, средства регулирования напряжения, технология имитационного моделирования. Ключевым результатом главы является разработка модифицированного алгоритма прямого-обратного хода, что составляет важную теоретическую основу для последующих исследований.

Глава 3 является центральной с точки зрения научной новизны. В ней обоснован переход от традиционных САУ к интеллектуальным на базе RL, представлена методика оценки гибкости напряжения, детально рассмотрен принцип синтеза САУ с использованием алгоритма PPO. Изложение материала свидетельствует о свободном владении автором теорией автоматического управления и методами машинного обучения.

Глава 4 представляет экспериментальную часть работы, подтверждающую эффективность разработанных методов на примерах модельных распределительных сетей. Результаты моделирования наглядно иллюстрируют достижение цели работы.

В заключении диссертации констатируется достижение поставленной цели – разработки интеллектуальных систем управления устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных сетей с высокой долей ВЭУ. Кратко суммируются решенные задачи и полученные научные результаты, обладающие новизной: обоснование применения FACTS на уровне распределительных сетей, синтез самообучающейся САУ на основе алгоритма PPO, модификация метода прямого-обратного хода для расчета режимов и разработка методики количественной оценки гибкости напряжения. Подтверждается практическая значимость работы, выраженная во внедрении результатов в учебный процесс и производственную деятельность, а также в регистрации программных продуктов.

Структура и содержание диссертации свидетельствуют о высокой квалификации автора и его способности проводить самостоятельное научное исследование.

7. ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ И АВТОРЕФЕРАТУ

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом Косьминой Е.В. возникли следующие вопросы и замечания:

1. Масштабируемость и вычислительная сложность. Алгоритмы RL, в

частности РРО, требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения. Каковы перспективы применения разработанной САУ в реальных крупных распределительных сетях с точки зрения времени обучения и требуемой вычислительной мощности? Рассматривалась ли возможность использования упрощенных (суррогатных) моделей сети или методов трансферного обучения для ускорения процесса?

2. Валидация на реальных данных. Эксперименты проведены на детальных модельных схемах. Планируется ли дальнейшая валидация алгоритмов на данных мониторинга реальной распределительной сети, содержащей ВЭУ, или на основе опубликованных международных кейсов?

3. Обоснование параметров методики оценки. В формуле для расчета интегрального индекса гибкости напряжения (F_{idx}) весовые коэффициенты (10 и 5) выбраны эмпирически. Возможно ли привести более строгое, например, статистическое или аналитическое, обоснование выбора именно этих коэффициентов, определяющих вклад среднего и стандартного отклонений напряжения?

4. Необходимо уточнить, была ли возможность провести проверку предложенных подходов на тестовых моделях энергосистем IEEE (или модифицировать модели IEEE)?

5. На графиках на рисунке 4.7 и в таблице 4.1 приводится сравнение профилей напряжения, токов и показателей гибкости для случаев отсутствия FACTS и при наличии FACTS при синтезе системы управления с помощью предложенного метода. Были ли рассмотрены результаты моделирования для случая наличия FACTS при определении закона управления классическим способом?

6. На стр. 134 диссертации указано, что классические средства регулирования напряжения не позволяют обеспечить поддержание напряжения в границах режимной надежности. Чем определяются границы режимной надежности в данном случае и каким образом они были оценены количественно?

Отмеченные недостатки несколько не снижают общее впечатление о работе и не влияют на основные теоретические и практические результаты проведенного исследования.

8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа Косьминой Евгении Владимировны является самостоятельным, законченным научным исследованием, в котором решена актуальная научная задача, имеющая значение для развития электроэнергетики, обладающей как признаками актуальности и научной новизны, так и практической значимостью полученных результатов. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

Автор демонстрирует глубокие знания в области теории электрических сетей, устройств FACTS, методов расчета установившихся режимов, а также современных технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Личный вклад соискателя в полученные результаты является определяющим и

очевидным.

Диссертация имеет структуру, четкий стиль изложения. Каждая глава имеет логичные и обоснованные выводы. По результатам работы имеется достаточный объем научных статей. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах (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.

Содержание диссертационной работы отражает последовательность решения поставленных задач. Текст диссертационной работы изложен корректным научным и техническим языком. Материалы диссертационного исследования представлены в достаточном для понимания объеме и форме, а сделанные в диссертационной работе выводы обоснованы и убедительны.

Представленный автореферат диссертации Косьминой Е.В. соответствует диссертационной работе и отражает: цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, актуальность, научную новизну, практическую значимость полученных результатов.

В целом диссертационная работа Косьминой Евгении Владимировны на тему **«Интеллектуальное управление устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок»**, представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является актуальной и научно обоснованной, отличается внутренней логической целостностью и направлена на решение важной научно-технической задачи, связанной с повышением гибкости распределительных электрических сетей в условиях роста доли стохастической генерации. Содержательно диссертационная работа характеризуется комплексным и методически выверенным подходом к исследованию заявленной проблемы. Полученные в работе результаты обладают научной новизной и практической значимостью, основаны на корректном использовании методов математического и имитационного моделирования, теории электрических сетей и современных методов интеллектуального управления. Предложенные автором решения ориентированы на реальные условия функционирования распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок и учитывают особенности стохастической генерации, режимных ограничений и требований к качеству электроэнергии. Диссертационная работа представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой разработаны и исследованы интеллектуальные методы управления устройствами FACTS, ориентированные на реальные условия функционирования распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок. По своему теоретическому уровню, степени обоснованности выводов и практическому значению полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности **2.4.3. Электроэнергетика**, а также требованиям и критериям пунктов 9-14 Положения «О порядке

присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

Автор диссертационной работы **Космина Евгения Владимировна** заслуживает присуждения ей учёной степени **кандидата технических наук** по научной специальности **2.4.3. Электроэнергетика**.

Официальный оппонент
доктор технических наук, заведующий
кафедрой «Автоматизированные
электрические системы»
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»
(620002, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мира 19
+7 (343) 375-44-44, <https://urfu.ru>
contact@urfu.ru)

Паздерин Андрей Владимирович
Тел.: +79122419337
e-mail: a.v.pazderin@urfu.ru

« 06 » февраля 2026 г.

Подпись Паздерина Андрея Владимировича удостоверяю !

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

Почтовый адрес: 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира 19

Телефон: +7 (343) 375-44-44

Адрес сайта: <https://urfu.ru>, адрес электронной почты: contact@urfu.ru

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕК
МОРОЗОВА

ОДОБРЕНО
МОНУКИ