

## ОТЗЫВ

официального оппонента – кандидата технических наук  
Уфа Руслана Александровича 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

### **Актуальность темы**

Актуальность диссертационной работы Косьминой Е.В. обусловлена устойчивыми изменениями, происходящими в электроэнергетике на уровне распределительных электрических сетей, которые всё в большей степени превращаются из пассивной инфраструктуры электроснабжения в сложный объект управления. В последние годы наблюдается активная интеграция ветроэнергетических установок (ВЭУ) и других источников распределенной генерации (РГ) именно на распределительном уровне. Это приводит к качественно новым режимным условиям: возрастает изменчивость потоков мощности, усиливается неопределенность баланса активной и реактивной мощности, усложняется обеспечение нормативных показателей качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Особенность ВЭУ заключается в том, что их мощность носит стохастический характер, обусловленный метеорологическими факторами и кратковременными колебаниями ветрового потока. В распределительных сетях такие колебания зачастую оказывают более заметное влияние на режимы, чем в магистральных сетях, поскольку распределительные сети характеризуются меньшей «инерционностью» по напряжению, более выраженной чувствительностью к локальным изменениям нагрузок и генерации, а также ограниченной пропускной способностью отдельных участков. В результате возрастают риски отклонений напряжения, перегрузок, ухудшения режимной надежности, увеличения потерь и снижения допустимого объема присоединения ВЭУ без дополнительных технических мероприятий.

В этих условиях повышается роль технических средств, обеспечивающих гибкость сети и возможность оперативного управления режимными параметрами. Важным аспектом является то, что технологии и устройства FACTS (англ. Flexible AC Transmission Systems) исторически развивались и применялись преимущественно в системах передачи для решения задач регулирования напряжения, управления потоками мощности, повышения статической и динамической устойчивости. Однако современный этап развития электроэнергетики приводит к смещению части аналогичных задач на распределительный

уровень. Возникает объективная потребность в том, чтобы принципы FACTS и соответствующие устройства (в адаптированном виде и с учетом особенностей распределительных сетей) применялись также в распределительных электрических сетях, где требуется локальное и быстродействующее регулирование напряжения и реактивной мощности, повышение пропускной способности элементов сети и поддержание допустимых режимов при высокой доле ВЭУ.

Следовательно, актуальной становится задача адаптации концепции FACTS к распределительным сетям: как с точки зрения выбора архитектуры и параметров устройств, так и – в особенности – с точки зрения разработки эффективных систем автоматического управления (САУ). В отличие от условий систем передачи, на распределительном уровне управление осложняется более выраженной нелинейностью нагрузок, разнообразием топологий (включая слабозамкнутые конфигурации), высокой вариативностью режимов и необходимостью учитывать широкий набор эксплуатационных ограничений. Это требует применения более гибких и «интеллектуальных» методов управления, способных адаптироваться к изменению внешних условий и режимной обстановки.

Таким образом, диссертационное исследование Евгении Владимировны, направленное на разработку и исследование интеллектуальных методов управления устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных сетей при активной интеграции ВЭУ, является своевременным и востребованным. Оно соответствует актуальным направлениям развития электроэнергетики, связанным с цифровизацией управления, ростом доли распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и необходимостью повышения надежности и качества электроснабжения на уровне распределительных сетей.

### **Научная новизна и основные результаты работы**

Научная новизна диссертационной работы Косьминой Е.В. заключается в разработке новых подходов к моделированию и интеллектуальному управлению устройствами FACTS в распределительных сетях при высокой доле ВИЭ и стохастическом характере генерации/нагрузки. Основные результаты, выносимые автором на защиту, включают:

1) Обоснование целесообразности применения устройств FACTS с системами автоматического управления на уровне первичных распределительных сетей, содержащих различные источники РГ, для автоматического регулирования режимов их работы с целью повышения гибкости и надежности электроснабжения.

2) Разработка интеллектуального подхода к синтезу самообучающихся САУ для устройств FACTS на основе метода оптимизации проксимальной

стратегии (англ. Proximal Policy Optimization, PPO) для адаптивного регулирования напряжения (и, как следует из общего контекста, связанных режимных параметров) в распределительных сетях с высокой долей ВЭУ при стохастической генерации и изменяющейся нагрузке. Подчеркивается способность предложенного подхода к самообучению по результатам взаимодействия с моделью сети, что повышает универсальность и устойчивость к изменениям внешних условий и структуры сети.

3) Разработка модифицированного алгоритма метода прямого–обратного хода для моделирования и анализа режимов распределительных сетей, учитывающего нелинейные характеристики нагрузки, сложную топологию сетей (включая слабозамкнутые конфигурации) и работу управляющих устройств (FACTS, систем накопления электроэнергии, ВЭУ). Данный результат представляется важным для корректного расчета установившихся режимов в реалистичных условиях, выходящих за рамки классических постановок для простых радиальных сетей.

4) Разработка методики количественной оценки гибкости напряжения на основе комплекса взаимосвязанных показателей (индекс гибкости, средние и максимальные отклонения и др.), позволяющей сопоставлять эффективность различных стратегий регулирования в распределительных сетях при наличии управляющих устройств и стохастической генерации.

Представленные результаты в совокупности характеризуют диссертацию Косьминой Е.В. как завершённую научно-квалификационную работу, направленную на решение актуальной научно-технической задачи повышения адаптивности и эффективности управления режимами распределительных электрических сетей.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа режимов распределительных сетей при наличии регулирующих устройств и стохастических источников, а также в развитии подходов к синтезу систем управления на базе современных методов обучения с подкреплением. В диссертации отмечено введение критериев и методики количественной оценки гибкости напряжения, что важно для объективного сравнения альтернативных стратегий управления и для обоснования применения устройств FACTS в распределительных сетях.

Практическая значимость определяется тем, что разработанные алгоритмы и программные средства могут быть использованы при проектировании и исследовании систем управления устройствами FACTS и при оценке эффектов интеграции ВИЭ в распределительные сети. В диссертации приведены све-

дения о практической реализации (в т.ч. программной) и внедрении результатов, а также о наличии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложения). Указано использование результатов в учебном процессе, что также подтверждает прикладной потенциал выполненной работы.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений и результатов**

В диссертационной работе отражено, что при выполнении исследования использован комплексный подход, включающий математическое и имитационное моделирование, оптимизационные методы, методы машинного обучения, а также программную реализацию на базе Python и Matlab. Обоснованность результатов обеспечивается корректным применением аппарата теории автоматического управления и математического моделирования, анализом режимов работы распределительных сетей и сопоставлением полученных результатов с известными данными и публикациями.

Достоверность выводов и рекомендаций подтверждается тем, что разработанные подходы апробированы на модельных задачах анализа режимов распределительных сетей, включая учет нелинейных характеристик нагрузки, сложной топологии сети (в т.ч. слабозамкнутых конфигураций) и работы управляющих устройств (FACTS, системы накопления электроэнергии, ВЭУ). В диссертации показано, что полученные результаты логически связаны с поставленными задачами и направлены на достижение сформулированной цели.

### **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).

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 162 страницах, включает 9 таблиц, 55 рисунков, список литературы из 149 наименований.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* посвящена анализу современного состояния и тенденций развития электроэнергетических систем в условиях роста доли возобновляемых источников энергии. Рассмотрены вопросы энергетической гибкости, особенности функционирования распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок, а также выполнен обзор отечественных и зарубежных исследований в области применения устройств FACTS и интеллектуальных методов управления режимами электрических сетей.

*Во второй главе* изложены методические основы исследования режимов распределительных электрических сетей с ветроэнергетическими установками. Рассмотрены подходы к математическому и имитационному моделированию электрических сетей, обоснован выбор инструментальных средств моделирования, а также представлены методы расчета установившихся режимов с учетом распределенной генерации и управляющих устройств.

*В третьей главе* диссертационной работы разработан методический подход к оценке и повышению гибкости напряжения в распределительных электрических сетях с высокой долей ветроэнергетических установок. В данной главе предложена методика комплексной количественной оценки гибкости напряжения и введена система взаимосвязанных показателей, включающая показатели соответствия напряжения нормативным требованиям, среднего и максимального отклонений напряжения, а также интегральный индекс гибкости. Кроме того, в третьей главе разработан интеллектуальный подход к управлению устройствами FACTS на основе алгоритмов обучения с подкреплением, в частности метода Proximal Policy Optimization, обеспечивающий адаптивное регулирование напряжения в условиях стохастической генерации и изменяющейся нагрузки.

*В четвертой главе* представлены результаты имитационного моделирования и вычислительных экспериментов, направленных на верификацию разработанных в третьей главе методических и алгоритмических решений. Экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенного интеллектуального управления устройствами FACTS и разработанной системы показателей при различных сценариях изменения генерации и нагрузки.

*В заключении* сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования, подтверждающие достижение поставленной цели и решение сформулированных задач.

*В приложениях* представлены сведения об апробации и применении результатов исследования.

Структура и содержание диссертации полно и корректно отражает основное содержание диссертационной работы и ее ключевые научные результаты.

## **Замечания по диссертационной работе и автореферату**

1. В диссертационной работе основной акцент сделан на регулировании напряжения в распределительных электрических сетях. Вместе с тем в реальных условиях эксплуатации сетей с высокой долей распределённой генерации (в т.ч. ВЭУ) обеспечение допустимых уровней напряжения тесно связано с перераспределением потоков активной мощности, ограничениями по токам/нагреву элементов сети, а также с предотвращением локальных перегрузок и нарушений режимной надёжности. В этой связи представляется целесообразным в дальнейшем расширить исследования до задач координированного управления напряжением и активной мощностью, что позволило бы полноценно оценить масштабируемость и прикладной потенциал предложенных решений.

2. Автором предложен интеллектуальный подход, реализованный на базе самообучающихся САУ (на основе методов обучения с подкреплением), для управления устройствами FACTS в распределительных сетях, что само по себе является актуальным и перспективным направлением. Вместе с тем для более полного понимания научного вклада и практической ценности предложенного подхода представляется необходимым более чётко и предметно раскрыть, в чём заключаются принципиальные преимущества самообучающихся САУ по сравнению с традиционными схемами автоматического управления (например, ПИД и/или линейно-квадратичными регуляторами). В частности, целесообразно явно указать, какие именно свойства обеспечиваются самообучением (адаптивность к смене топологии и параметров сети, устойчивость к неопределённости генерации и/или нагрузки, снижение потребности в ручной перенастройке, способность работать в широком диапазоне режимов и т.п.).

3. Предложенная методика количественной оценки гибкости напряжения ориентирована преимущественно на показатели, связанные с качеством электроэнергии. Вместе с тем при принятии инженерных решений по применению FACTS в распределительных сетях принципиальное значение имеют также эксплуатационные и экономические аспекты: потери электроэнергии, загрузка и ресурс оборудования, частота и «стоимость» управляющих воздействий, требования к коммуникациям и измерениям, а также эффекты в части повышения пропускной способности и сокращения ограничений присоединения ВИЭ. Включение подобных критериев позволило бы связать получаемые оценки гибкости с технико-экономической эффективностью и существенно расширило бы возможности практического применения разработанного инструментария.

Указанные замечания носят уточняющий характер и не снижают научной и практической ценности работы.

## Общее заключение

Диссертационная работа Косьминой Евгении Владимировны посвящена актуальной и научно значимой задаче повышения гибкости распределительных электрических сетей в условиях роста доли распределённых источников энергии со стохастическим характером генерации. Полученные в работе теоретические и практические результаты отличаются научной обоснованностью, логической завершённой и обладают практической значимостью для современной электроэнергетики.

В диссертации разработан методический и алгоритмический аппарат, направленный на оценку и повышение гибкости напряжения в распределительных электрических сетях с применением устройств FACTS и интеллектуальных систем автоматического управления. Предложенные решения подтверждены результатами имитационного моделирования и вычислительных экспериментов, что свидетельствует о достоверности и состоятельности сделанных выводов.

Полученные соискателем результаты базируются на корректном использовании основных положений теории математического моделирования, устойчивости электроэнергетических систем, корректностью поставленных задач, анализом и сопоставлением полученных результатов с данными, опубликованными другими отечественными и зарубежными авторами, что позволяет сделать вывод о соответствии диссертационной работы паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Содержание диссертационной работы подробно отражает последовательность решения поставленных задач. Текст диссертационной работы изложен грамотным языком, корректным в научном и техническом отношении. Материалы диссертационного исследования представлены в объеме, достаточном для понимания, доступно и репрезентативно. Сделанные в работе выводы и сформулированные рекомендации аргументированы.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы Косьминой Е.В. изложены с достаточной полнотой в 15 печатных научных работах, в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.4.3. Электроэнергетика); 1 публикация в издании, индексируемом в Scopus и Web of Science Core Collection; 22 – в иных изданиях. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В целом диссертационная работа Косьминой Е.В. на тему «Интеллектуальное управление устройствами FACTS для повышения гибкости распределительных электрических сетей с высокой долей ветроэнергетических установок», представленная на соискание ученой степени кандидата технических

наук, является актуальной, обладает научной новизной и практической значимостью полученных результатов, соответствует паспорту научной специальности **2.4.3. Электроэнергетика**. Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача разработки и исследования интеллектуальных методов управления устройствами FACTS в распределительных электрических сетях при высокой доле стохастической генерации. По своему теоретическому уровню и практическому значению она соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно критериям пунктов **9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней»**, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

**Автор диссертации Космина Евгения Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика.**

Официальный оппонент,  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
Инженерной школы энергетики Отделения  
электроэнергетики и электротехники Феде-  
рального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего об-  
разования «Национальный исследовате-  
льский Томский политехнический универси-  
тет» (634050, Российская Федерация, г.  
Томск, проспект Ленина, дом 30. +7 (3822)  
60-63-33, +7 (3822) 60-64-44, <https://tpu.ru/>,  
[tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru))

Уфа Руслан Александрович  
Тел.: +79528892062  
e-mail: [hecna@tpu](mailto:hecna@tpu)

« 26 » 01 2026 г.

Р.А. Уфа

Подпись Уфа Руслана Александровича удостоверяю:

И.о. ученого секретаря

Новикова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Почтовый адрес: 634050, Российская Федерация, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Телефон: +7 (3822) 60-63-33, +7 (3822) 60-64-44

Адрес сайта: <https://tpu.ru/>, адрес электронной почты: [tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru)