

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук
Илюшина Павла Владимировича на диссертационную работу
Реуцкого Ивана Сергеевича на тему **«Разработка модели интеллектуальной
автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на
основе мультиагентных систем и машинного обучения»**, представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по научной
специальности 2.4.3. Электроэнергетика

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В условиях развития крупных городов, мегаполисов и энергорайонов с промышленной нагрузкой задача обеспечения устойчивости по напряжению становится все более актуальной. Интеграция в ЕЭС России объектов распределенной генерации и электростанций на основе возобновляемых источников энергии, имеющих особенности в отношении выдачи в электроэнергетические системы (ЕЭС) реактивной мощности, требует пересмотра подходов к регулированию напряжения в нормальных, предаварийных, аварийных и послеаварийных режимах. Это требует реализации эффективного регулирования напряжения в нормальных и послеаварийных режимах, а также высокого быстродействия в аварийных режимах.

Решение задач предотвращения возникновения и развития системных аварий с лавиной напряжения возложено на системы противоаварийного управления (ПАУ) в ЕЭС России. Однако используемые принципы построения и алгоритмы функционирования систем ПАУ не позволяют эффективно предотвращать нарушение устойчивости по напряжению в нерасчетных режимах и/или при ненормативных возмущениях. Локальные устройства противоаварийной автоматики не обладают требуемым быстродействием, так как их время срабатывания отстроено от работы устройств релейной защиты, а также могут формировать некорректные управляющие воздействия в нерасчетных условиях функционирования.

Следовательно, выбранная тематика диссертационного исследования, направленная на обеспечения устойчивости по напряжению ЕЭС за счет совершенствования систем ПАУ путем использования интеллектуальных средств, таких как мультиагентные системы, алгоритмы оптимизации и машинного обучения для предотвращения системных аварий является актуальной в современных условиях развития электроэнергетики России.

Анализ достижений российских и зарубежных ученых в рассматриваемой научной области позволил соискателю сформулировать цель и осуществить постановку конкретных задач для своего диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является разработка мероприятий по совершенствованию систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению в ЭЭС с применением интеллектуальных средств, таких как мультиагентные системы, алгоритмы эвристической оптимизации и машинного обучения.

Объектом исследования являются схемы электрических соединений северной части ЭЭС Иркутской области. Предметом исследования являются математические модели мультиагентных систем и машинного обучения, применяемые для предотвращения нарушения устойчивости по напряжению.

2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

В диссертационной работе Реуцкого И.С. решена важная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке мероприятий по совершенствованию систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению.

Научной новизной обладают следующие положения:

- предложены новые подходы к совершенствованию существующей системы ПАУ ЕЭС России в части обеспечения устойчивости по напряжению;
- предложен новый гибридный принцип координированного регулирования СКРМ в ЭЭС на базе алгоритмов роевого интеллекта и градиентного бустинга, сочетающая в себе централизованное и распределенное управление, который обеспечивает высокое быстродействие и адаптивность к множеству схемно-режимных ситуаций;
- усовершенствован мультиагентный принцип координированного регулирования уставок АРВ синхронных генераторов и отключения нагрузок потребителей в рамках решения задачи ПАУ ЭЭС;
- разработана оригинальная концепция внедрения интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности в структуру ПАУ ЕЭС России, позволяющая применять интеллектуальные комплексы с сохранением существующих иерархических принципов на действующей инфраструктуре ПАУ.

Важно отметить, что все научно-методические и прикладные результаты, представленные в диссертации, получены соискателем самостоятельно, либо под его научным руководством и при его непосредственном участии. В частности, все концептуально-методические работы, постановки задач выполнены автором самостоятельно, обзорно-аналитические работы – совместно д.т.н. Курбацким В.Г. и научным руководителем к.т.н. Томиным Н.В., вычислительные работы – совместно с научным руководителем к.т.н. Томиным Н.В.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретическая ценность полученных в рамках диссертационного исследования результатов заключается в разработке оригинальных моделей интеллектуальной координации локальных средств регулирования напряжения в ЭЭС с применением мультиагентных систем, роевого интеллекта и машинного обучения, которые позволяют обеспечить устойчивость по напряжению сложной ЭЭС в процессе протекания аварийного режима, своевременно выдавая управляющие воздействия, основанные на параметрах аварийного режима или максимально близкому к нему.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности, которая была успешно протестирована на примере реальной модели энергосистемы Иркутской области. В диссертационной работе показано, как разработанная интеллектуальная автоматика регулирования напряжения и реактивной мощности может быть интегрирована в существующую структуру ПАУ ЭЭС России.

4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ, ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается тем, что при выполнении диссертационного исследования соискателем были использованы методы системного анализа, математического моделирования, оценки состояния, расчетов установившихся режимов, оптимизации, мультиагентного подхода, машинного обучения, тестирования разработанных подходов на математических моделях реальных энергосистем. В качестве модуля расчетов установившихся режимов соискателем использован расчетный блок PSAT на платформе Matlab. Алгоритм эмпирической оптимизации реализован на платформе Matlab. Модели градиентного бустинга CatBoost и множественной регрессии реализованы в среде Python с использованием открытых библиотек SkLearn и CatBoost.

Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием основных положений теории математического моделирования, устойчивости электроэнергетических систем, корректностью поставленных задач, анализом и сопоставлением полученных результатов с данными, опубликованными другими отечественными и зарубежными авторами.

Представленные в диссертационной работе основные научные положения, выводы по главам, заключительные выводы и рекомендации являются в целом обоснованными.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ КРИТЕРИЯМ

Диссертационная работа Реуцкого И.С. отвечает критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024). В ней соблюдены следующие принципы соответствия:

5.1. Указанная соискателем цель работы – разработка мероприятий по совершенствованию систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению в ЭЭС с применением интеллектуальных средств, таких как мультиагентные системы, алгоритмы эвристической оптимизации и машинного обучения – достигнута в рамках диссертационной работы. В целом диссертационная работа является законченной научно-квалифицированной работой, так как в ней изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития электроэнергетики страны в части совершенствования систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению (п. 9).

5.2. Диссертация написана соискателем самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе ее автора в науку. Результаты диссертационного исследования получены при поддержке гранта РФФИ 19-49-04108 (рук. Н.И. Воропай) и проекта государственного задания Ш.17.4.2. Теория и методы обоснования развития и управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем (рук. В.Г. Курбацкий, № АААА-А17-117030310438-1). Разработанные соискателем новые научно обоснованные технические решения и разработки аргументированы и сопоставлены с результатами исследований других авторов (п. 10).

5.3. Основные результаты диссертационной работы Реуцкого И.С. содержатся в 6 печатных научных работах, в том числе: 2 статьи в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.4.3. Электроэнергетика); 1 публикация в рецензируемом издании, индексируемом в Scopus и Web of Science Core Collection; 3 – в других изданиях. Основные научные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, были представлены в докладах на четырех научных конференциях и семинарах (п.п. 11-13).

5.4. В диссертационной работе Реуцкого И.С. сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов научной деятельности (п. 14).

5.5. Тема и содержание диссертационной работы Реуцкого И.С. соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика по следующим пунктам:

– п. 8 – «Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров, повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях»;

– 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»;

– 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».

6. АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Реуцкого И.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 142 наименования, и четырех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 151 страницу, при этом основной текст изложен на 118 страницах.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цели и задачи, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, информация об апробации полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Описание проблемы устойчивости по напряжению»** обоснована необходимость совершенствования существующих систем ПАУ ЕЭС России для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению. Отмечено, что системные аварии в ЭЭС, возникающие из-за нарушений устойчивости по напряжению, являются следствием возникновения дефицитов реактивной мощности в узлах нагрузки. Для сохранения устойчивости, помимо достаточности резервов реактивной мощности требуется их координация для корректного распределения по узлам нагрузки за наименьшее время, выполняемых системами ПАУ. Показано, что в ЕЭС России в настоящее время отсутствуют полноценные системы ПАУ по напряжению, так как переходные

процессы в ЭЭС с лавиной напряжения протекают быстрее, чем скорость реализации управляющих воздействий.

Во второй главе **«Интеллектуальные системы регулирования напряжения»** рассмотрены архитектуры построения интеллектуальных систем регулирования напряжения в ЭЭС, которые могут быть применимы для моделирования интеллектуальной системы ПАУ. Выполнен анализ схем регулирования напряжения и реактивной мощности, применяемых в ЭЭС. Показано, что наиболее перспективными для обеспечения устойчивости по напряжению являются ансамблевые методы на основе деревьев решений, такие как алгоритмы случайного леса и градиентного бустинга, позволяющие достичь высокой точности распознавания аварийных и предаварийных режимов ЭЭС в реальном времени. Обоснован выбор принципов построения интеллектуальной системы ПАУ, сочетающий в себе децентрализованный и централизованный подход к регулированию напряжения.

В третьей главе **«Архитектура построения интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности»** разработан подход к интеллектуальной координации локальных средств регулирования напряжения в ЭЭС в аварийных ситуациях. В качестве главного метода решения этой задачи предложено избирательное применение современных принципов управления, включая мультиагентные системы, алгоритмы оптимизации и машинное обучение. Разработана модель ПАУ для решения задачи обеспечения устойчивости по напряжению в ЭЭС, а также предложена концепция применения модели в структуре ПАУ ЭЭС России.

В четвертой главе **«Исследование поведения интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности»** представлены результаты исследования действия интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на модели ЭЭС Иркутской области при возникновении аварийных возмущений. Доказано высокое качество вторичного регулирования напряжения на примере схемы Северобайкальского энергетического кольца с использованием разработанной интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности. Показано, что разработанная мультиагентная противоаварийная автоматика обеспечивает возможность строгой фиксации момента необходимости перехода от задачи вторичного регулирования напряжения к задаче противоаварийного управления. Это позволяет исключить человеческий фактор и обеспечить непрерывность процесса оперативного и автоматического противоаварийного управления.

В **заключении** обобщены результаты, полученные в рамках диссертационной работы, которые показывают, что поставленные задачи диссертационного исследования были выполнены в полном объеме, а также то,

что их решение позволяет содействовать обеспечению устойчивости по напряжению ЭЭС за счет совершенствования систем ПАУ путем использования интеллектуальных средств, таких как мультиагентные системы, алгоритмы оптимизации и машинного обучения для предотвращения системных аварий.

7. ВОПРОСЫ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации Реуцкого И.С. возникли следующие вопросы и замечания:

1. В Главе 1 (стр. 22) упоминается об автоматическом управлении батареями статических конденсаторов (БСК), управляемыми шунтирующими реакторами (УШР), блокировке устройств РПН, а также применении устройств автоматического включения генераторов. Однако в ЭЭС России имеется опыт применения и других, более эффективных средств компенсации реактивной мощности (СКРМ), например, синхронные компенсаторы, СТК и СТАТКОМы, о которых нет упоминания в тексте.

2. В Главе 1 (стр. 33) указывается на высокую дискретность регулирования СКРМ, однако не указывается каких именно, что некорректно. В отличие от наиболее простых СКРМ – БСК со ступенчатым регулированием или ступенчато регулируемых шунтирующих реакторов, более современные СКРМ – УШР, СТК, СТАТКОМ и синхронные компенсаторы обеспечивают плавное регулирование реактивной мощности, а также имеют высокое быстродействие.

3. В Главе 2 при проведении анализа архитектуры построения интеллектуальных систем регулирования напряжения не рассмотрены требования к каналам связи. Учитывая необходимость их использования в реализации как алгоритмов регулирования напряжения в нормальных и предаварийных режимах, так и при реализации управляющих воздействий в аварийных и послеаварийных режимах – этот вопрос является принципиальным, как с технической, так и экономической точки зрения. Организация каналов связи с высокой скоростью передачи сигналов и команд, при минимальной задержке в канале требуют значительных финансовых затрат.

4. В Главе 2 при анализе систем регулирования напряжения не учитывается в должной мере роль электростанций на основе ВИЭ в регулировании напряжения и реактивной мощности. Известно, что ветровые и солнечные электростанции имеют возможности по выдаче и потреблению реактивной мощности в различных схемно-режимных ситуациях, что предусмотрено заводами-изготовителями в стандартных алгоритмах. Кроме того, в современных инверторах реализован алгоритм, который при провале напряжения на выходе инвертора снижает выдачу активной мощности до нуля и увеличивает до максимального значения выдачу реактивной мощности. Так как

Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 г. №4153-р, предусмотрено увеличение суммарной мощности электростанций на основе ВИЭ почти в 4 раза, то их учет в задачах регулирования напряжения и реактивной мощности необоснован.

5. Известно, что критические напряжения в разных узлах нагрузки разные, что зависит от количества, суммарной мощности и технических характеристик электродвигателей прямого включения. Из Главы 3 неясно, каким образом предлагается учитывать различные величины критических напряжений в разных узлах нагрузки, часто смежных, так как это должно влиять на загрузку различных СКРМ и уровни напряжений в узлах сети? Для предотвращения опрокидывания двигательной нагрузки при аварийных возмущениях часто необходимо держать напряжение в нормальном режиме выше номинального значения, однако это приводит к росту величины потребления активной мощности статической нагрузкой. Каким образом определяются оптимальные задания по реактивной мощности для СКРМ в этом случае?

6. Применение концепции виртуальной электростанции к СКРМ не в полной мере оправдано. Это связано с тем, что в концепции виртуальной электростанции нагрузка используется в качестве ресурса, регулирующего продаваемую на рынке электроэнергию и мощность, что не позволяет решать задачу надежного электроснабжения потребителей, необходимость решения которой требуется исходя из постановки задачи. Кроме того, для полноценного функционирования виртуальной электростанции должна иметься зона свободного перетока электроэнергии (мощности), т.е. отсутствовать ограничения пропускной способности в электросетевом комплексе. При наличии ограничений, что наиболее часто встречается в различных ЭЭС России, распределять задания по реактивной мощности для СКРМ необходимо с учетом этих ограничений, следовательно, задания будут далеки от оптимальных.

7. В Главе 3 соискатель рассматривает возможность изменения уставок АРВ синхронных генераторов в сети, однако рассматривает обобщенную схему устройства АРВ. При этом в постановке задачи соискатель указывает на необходимость участия в процессе регулирования напряжения и реактивной мощности, в том числе, объектов распределенной генерации. Следует отметить, что у синхронных генераторов объектов распределенной генерации часто применяются упрощенные типы систем возбуждения и АРВ, которые не имеют возможностей для изменения алгоритмов работы и уставок. Для привлечения их синхронных генераторов к регулированию напряжения и реактивной мощности необходимо было бы провести дополнительное исследование, позволившее выявить реальные возможности и имеющиеся ограничения.

8. В соответствии с п. 158 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем, утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. № 937 (ред. от 21.02.2025) не допускается аппаратное совмещение в одном устройстве функции локальной автоматики предотвращения нарушения устойчивости с другими функциями противоаварийной автоматики, обеспечивающими живучесть энергосистемы, и с функциями релейной защиты. Соискатель рассматривает возможность совмещения функций регулирования напряжения и реактивной мощности в различных режимах. Следовало бы проанализировать действующие НТД и обосновать внесение изменений в отдельные пункты для возможности практической реализации разработанных технических решений.

9. Для привлечения СКРМ, принадлежащих потребителям, а также объектов распределенной генерации и электростанций на основе ВИЭ к регулированию напряжения и реактивной мощности в ЭЭС сверх регламентируемых требований, необходима разработка экономических механизмов и оплаты оказанных услуг. Однако это в большинстве случаев будет существенно дешевле для оптового рынка электроэнергии и мощности, чем установка необходимого количества новых СКРМ в электрических сетях.

10. Редакционные замечания:

– в Главе 1 (стр. 11) делается ссылка на «стандарты Минэнерго [40]», однако Правила технологического функционирования электроэнергетических систем утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. № 937;

– в Главе 3 (стр. 72) рис. 3.3, где приводится гибридная архитектура управления напряжением с использованием СКРМ, неясно, почему приведены только графические обозначения управляемых шунтирующих реакторов. Раз соискатель рассматривает вопросы управления различными видами СКРМ, то следовало бы привести графические обозначения разных СКРМ в соответствии с ГОСТ Р 56303-2014 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики. Общие требования к графическому исполнению». Разные виды СКРМ – ШР, УШР, СК, асинхронизированный компенсатор, БСК, СТК, СТАТКОМ имеют разные графические обозначения;

– графическое обозначение заземлений на рисунках 3.3, 3.7 и др. выполнены не в соответствии с ГОСТ 2.721-74 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения».

Приведенные замечания и вопросы не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы, поскольку существенно не влияют на основные выводы, а также полученные научные и практические результаты.

8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Реуцкого И.С. обладает актуальностью, научной новизны, теоретической и практической значимостью полученных результатов. В ней решена важная научная и практическая задача, заключающаяся в разработке мероприятий по совершенствованию систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению.

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 отношениях. Материалы диссертационного исследования представлены в объеме, достаточном для понимания, доступно и репрезентативно. Сделанные в работе выводы и сформулированные рекомендации аргументированы.

Автореферат диссертации Реуцкого И.С. соответствует диссертационной работе по основным квалификационным признакам: цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы Реуцкого И.С. изложены с достаточной полнотой в 6 печатных научных работах, в том числе: 2 статьи в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.4.3. Электроэнергетика); 1 публикация в рецензируемом издании, индексируемом в Scopus и Web of Science Core Collection; 3 – в других изданиях.

В целом диссертационная работа Реуцкого И.С. на тему «Разработка модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения», 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, направленной на разработку мероприятий по совершенствованию систем противоаварийного управления ЕЭС России в целях обеспечения устойчивости по напряжению, что имеет существенное значение для развития электроэнергетики страны. 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 присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), а ее автор Реуцкий Иван Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,

доктор технических наук, главный научный сотрудник,
руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем
и распределенной энергетики ИНЭИ РАН



Павел Владимирович Илюшин

14 августа 2025 г.

Тел. (моб): +7(915) 092-98-33

E-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук» (ИНЭИ РАН)

Адрес: 117186, Россия, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2.

Телефоны: +7 (499) 127-46-64, +7 (499) 123-98-78.

E-mail: info@eriras.ru, Web-сайт: <https://www.eriras.ru/>

