

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 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, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 16.09.2025 г. № 5

О присуждении **Реуцкому Ивану Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Разработка модели интеллектуальной автоматике регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика принята к защите 19.06.2025 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом 24.1.118.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, совет создан приказом Минобрнауки РФ № 78/нк от 26.01.2023 г.

Соискатель **Реуцкий Иван Сергеевич**, «09» ноября 1992 года рождения. В 2013 г. соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по программе бакалавриата по направлению «Электроэнергетика». В 2015 г. соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по программе магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. В 2022 г. соискатель заочно окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по программе подготовки научно-педагогических кадров по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника. Направленность: Электрические станции и электроэнергетические системы (по научной специальности 2.4.3.

Электроэнергетика в соответствии с номенклатурой, утвержденной приказом Минобрнауки РФ от 24.02.2021 г. № 118).

В настоящее время Реуцкий Иван Сергеевич работает в должности диспетчера оперативно-диспетчерской службы Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири.

Диссертация выполнена в отделе электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Томин Никита Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Илюшин Павел Владимирович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук, Центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики Отдела исследования взаимосвязей энергетики с экономикой, руководитель центра, главный научный сотрудник;

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», кафедра энергетики, заведующий кафедрой

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск. **В своем положительном отзыве**, подписанном Тихомировым Владимиром Александровичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электроэнергетика транспорта» и утвержденном Колесниченко Еленой Александровной, и.о. ректора, указала, что диссертация Реуцкого Ивана Сергеевича является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует критериям пп. 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3. Электроэнергетика, и 1 статью в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus и Web of Science Core Collection.

Вклад диссертанта в подготовку статей в соавторстве оценивается как весомый. В коллективных публикациях автору принадлежат результаты, которые относятся к теме диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты. Текст диссертации не содержит заимствований без ссылок на соответствующие первоисточники. Из совместных работ в диссертацию включены лишь те результаты, которые непосредственно принадлежат соискателю.

Наиболее значимые работы:

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

1. Реуцкий, И.С. Обоснование необходимости совершенствования систем противоаварийного управления для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению в энергосистемах / И.С. Реуцкий, В.Г. Курбацкий // iPolytech Journal. – 2022. – Т.26 – №2. – С. 297-309.

2. Реуцкий, И.С. Повышение устойчивости по напряжению сложных энергосистем с использованием моделей адаптивной интеллектуальной автоматики: на примере северной части энергосистемы Иркутской области / И.С. Реуцкий, Н.В. Томин, В.Г. Курбацкий // Электроэнергия. Передача и распределение. – №2. – 2023. – С. 46-57.

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

3. Reutsky, I. S. Hybrid intelligent technique for voltage/VAR control in power systems / N. V. Tomin, V. G. Kurbatsky, I. S. Reutsky // The Institution of Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 13. – P. 4724-4732.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От Куликова Александра Леонидовича, доктора технических наук, профессора кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника", и Севостьянова Александра Александровича, кандидата технических наук, доцента, профессора, заведующего кафедрой "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника", Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им.

Р.Е. Алексеева". Отзыв содержит два замечания: 1) Не определены технические требования к программно-аппаратным комплексам ПАУ, используемым для создания интеллектуальной автоматики регулирования напряжения. 2) Из автореферата не понятно, какая необходима система коммуникаций для реализации предложенной интеллектуальной автоматики регулирования напряжения, применительно к примеру главы 4.

2. От **Кулдина Николая Александровича**, кандидата физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой энергообеспечения предприятий и энергосбережения Физико-технического института **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Петрозаводский государственный университет"**. Отзыв содержит шесть замечаний: 1) Отмечены недостатки автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН). Были ли автором сформулированы предложения по доработке ГОСТ Р 70411-2022 и (или) утверждённых методик по настройке АОСН? 2) Отмечена целесообразность декомпозиции энергосистем на энергорайоны. Какие критерии разделения (определения границ энергорайонов) разработаны и (или) используются автором? 3) В качестве управляющих воздействий ВЭ-СКРМ предложены СКРМ и АРВ генерирующего оборудования. Рассматривалась ли интеграция в систему устройств регулирования коэффициента трансформации трансформаторного оборудования, АРЧМ в части изменения перетока активной мощности во влияющих контролируемых сечениях? 4) Использован метод градиентного бустинга на деревьях. Предложенный метод требует значительных вычислительных ресурсов, чувствителен к обучающей выборке, а также сложен для интерпретации, как и другие ансамблевые методы. Как автор предлагает минимизировать недостатки предлагаемого метода? 5) Каковы перспективы масштабирования предложенной ИАРН на другие энергосистемы, какими характерными особенностями должны обладать эти энергосистемы? 6) Как планируется учитывать возможные угрозы информационной безопасности при внедрении мультиагентных систем в критическую инфраструктуру?

3. От **Паздерина Андрея Владимировича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой автоматизированных электрических систем, и **Сенюка Михаила Дмитриевича**, кандидата технических наук, ведущего инженера кафедры автоматизированных электрических систем **Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"**. Отзыв содержит три замечания: 1) Для оценки устойчивости ЭЭС по напряжению автором был использован L -индекс,

позволяющий выполнить количественную оценку запаса устойчивости по напряжению без значительных вычислительных затрат. Рассматривались ли автором другие индексы устойчивости и проводилось ли сопоставление их вычислительных затрат? 2) Для передачи управляющих воздействий предполагается использование SCADA системы. В ЦСПА, разрабатываемой в НТЦ ЕЭС, для передачи таблиц управляющих воздействий на низовые устройства используются выделенные высокоскоростные каналы связи, обеспечивающие требуемое быстродействие. Проводилось ли автором исследование быстродействия сигналов реализации управляющих воздействий SCADA системы? Позволяет ли быстродействие системы реализовать принцип противоаварийного управления «ПОСЛЕ»? 3) Для реализации интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности автором была использована модель *CatBoost*. Выполнялось ли автором сравнение данной модели с популярными моделями *XGBoost*, *AdaBoost*, *LightGBM*?

4. От **Фишова Александра Георгиевича**, доктора технических наук, профессора кафедры автоматизированных электрических систем **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Новосибирский государственный технический университет"**. Отзыв содержит пять замечаний: 1) В названии диссертации обозначена ее цель в виде разработки "модели", однако, о какой модели идет речь так и остается неясным (физической, математической, функциональной, информационной, процессной и т.д.). 2) В автореферате не представлены показатели быстродействия при адаптации уставок автоматик с учетом обучения, а также их универсальности при структурных изменениях в объекте управления. 3) В работе избыточно используются понятия концепция, принципы, подходы без их четкого выражения и отличий от существующих. 4) Представляется неудачным использование выражения "не сохранение устойчивости", вместо "нарушения устойчивости" (стр. 18). 5) Неясно, какие результаты диссертации отражены в работе 6.

Замечания не снижают научной ценности и практической значимости диссертационной работы. На замечания оппонентов и ведущей организации, а также на замечания в отзывах, поступивших на автореферат и диссертацию, соискатель привел исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается сферой их научных интересов и исследований в области математического моделирования и оптимизации электроэнергетических режимов действующих и перспективных электроэнергетических систем, что подтверждается научными публикациями официальных оппонентов и сотрудников

ведущей организации и их способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана теоретическая основа построения математической модели интеллектуальной системы противоаварийного управления, основанная на синтезе децентрализованного мультиагентного управления и централизованной оптимизации с использованием модифицированного критерия устойчивости в форме взвешенной суммы локальных L -индексов устойчивости по напряжению;

предложен новый метод расчета управляющих воздействий на основе совместного применения алгоритмов эвристической оптимизации и машинного обучения, позволяющий определять оптимальные уставки устройств регулирования напряжения с учетом многокритериальности задачи обеспечения устойчивости энергосистем;

доказана эффективность предложенной модели интеллектуальной автоматики на примере энергосистемы Иркутской области, что показывает высокий уровень адаптивности комплекса противоаварийного управления и возможность его применения в реальных энергосистемах;

введена новая концепция интеграции разработанной модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения в существующую систему противоаварийного управления ЕЭС России, обеспечивающая сохранение и использование действующей инфраструктуры функционирования при повышении эффективности управления резервами реактивной мощности.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

доказано, что причиной недостаточной эффективности существующих комплексов противоаварийной автоматики является их неспособность к адаптивной координации управляющих воздействий в реальном времени, что обосновано путем анализа механизмов протекания системных аварий в энергосистемах;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы математического моделирования, расчетов и оптимизации электрических режимов сложных энергосистем, мультиагентного регулирования, эвристической оптимизации и машинного обучения;

изложены новые подходы координированного регулирования возбуждения синхронных генераторов по мультиагентному принципу и резервов реактивной мощности устройств компенсации в энергосистемах на основе алгоритмов роевого интеллекта и градиентного бустинга, направленные на повышение устойчивости по напряжению;

раскрыты проблемы действующих принципов обеспечения устойчивости по напряжению, которые на сегодняшний день используются в отечественных энергосистемах;

изучены особенности передовых методов повышения устойчивости по напряжению в сложных энергосистемах с использованием интеллектуальных схем регулирования напряжения;

проведена модернизация действующих моделей регулирования напряжения с использованием разработанного оригинального программного обеспечения в средах Python и Matlab. Полученные значения целевых функций и режимных параметров энергосистемы в данном случае позволяют выполнить положительную количественную оценку повышения устойчивости по напряжению.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в практику исследований алгоритмы и принципы реализации новой интеллектуальной автоматики регулирования напряжения, обеспечивающей сочетание подходов децентрализованного и централизованного управления;

определены области практического применения предлагаемой модели автоматики регулирования напряжения и перспективы использования в реальных энергосистемах;

создана математическая модель координации средств компенсации реактивной мощности в сложных энергосистемах, обеспечивающая адаптивное управление режимными параметрами в условиях ненормативных возмущений и структурных изменений сети;

представлена концепция внедрения модели интеллектуальной автоматики в существующую структуру противоаварийного управления ЕЭС России, которая дополняет действующие иерархические принципы и позволяет реализовать ее интеграцию, используя действующую инфраструктуру функционирования.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ были разработаны корректные математические модели схем с учётом структуры исследуемой энергосистемы Иркутской области, с характеристиками оборудования и нагрузками в узлах, соответствующими реальным параметрам;

теория основана на фундаментальных работах отечественных и зарубежных авторов в области математического моделирования, расчетов электрических режимов и устойчивости электроэнергетических систем, а также применения мультиагентного подхода, алгоритмов эвристической оптимизации и машинного обучения в электрических сетях. В основе настоящих исследований находится

разработанный в ИСЭМ СО РАН аналитический метод оптимального использования резервов реактивной мощности на базе решения системы уравнений, содержащих частные производные функций суммы локальных L -индексов, который позволяет определить требуемое количество инъекций реактивной мощности в узлах нагрузки для работы энергосистемы в оптимальном режиме;

идея базируется на анализе возможности внедрения интеллектуальных схем регулирования напряжения в действующую структуру противоаварийного управления ЕЭС России и создании методов и моделей, предназначенных для повышения устойчивости по напряжению отдельных энергорайонов;

использовано сравнение авторских результатов и данных, полученных ранее по применению в электрических сетях мультиагентных систем, алгоритмов эвристической оптимизации и машинного обучения;

установлено, что модель предложенной автоматики, сочетающая мультиагентный подход для децентрализованного управления и виртуальный гибридный энергоцентр с алгоритмами оптимизации и машинного обучения для централизованного контроля, обеспечивает повышение устойчивости энергосистемы за счет эффективного управления резервами реактивной мощности;

использованы современные методы системного анализа, основные положения теории математического моделирования, оценки состояния, устойчивости электроэнергетических систем, оптимизации, мультиагентного подхода, машинного обучения, а также классические принципы расчета установившихся режимов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке цели и задач исследования; построении подробной математической модели исследуемых объектов – энергорайонов Иркутской области и проведении комплекса расчетов установившихся режимов и устойчивости, позволяющих выявить проблематику отдельных узлов по устойчивости напряжения; разработке модели построения и концепции внедрения в структуру противоаварийного управления ЕЭС России новой интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности с возможностью сохранения существующих иерархических принципов и действующей инфраструктуры.

В ходе защиты диссертации были заданы следующие вопросы:

1. От Крюкова А.В.: В исследуемых схемах у Вас присутствуют тяговые подстанции с однофазной тяговой нагрузкой, соответственно перетоки активной и реактивной мощности и критические напряжения по фазам, которые приводят к коллапсу, будут разные. Как этот фактор учитывался в настоящем исследовании и как Вы его планируете учитывать в дальнейшем?

2. От Подковальникова О.В.: Существующие системы противоаварийной автоматики (СМЗУ, ЦСПА) работают и обеспечивают так называемый глобальный оптимум, принятие неких решений, которые обеспечивают глобальное оптимальное решение. А Ваш подход он принципиально другой, и основан на неких локальных решениях, горизонтально связанных. Насколько те решения, которые принимаются сейчас, соответствуют тем, которые предлагаете Вы?

3. От Стенникова В.А.: В диссертации у Вас отмечено: «предлагаются новые подходы к совершенствованию существующей системы». Однако, Вы используете действующую систему, при этом говорите о том, что существующая система управления устойчивостью напряжения фактически не сформировалась, хотя показываете, что оборудование есть и все это работает. В чем здесь новые подходы?

Соискатель Реуцкий Иван Сергеевич ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Расчет режима в большинстве случаев выполняется по однолинейной схеме замещения. В данном случае использовалась нагрузка наиболее загруженной фазы. Кольцевая тяговая сеть 27,5 кВ полностью не моделировалась из-за отсутствия данных, учитывался только эквивалент нагрузки.

2. Предложена автоматика, которая функционирует по другому принципу - «ПОСЛЕ». Это существенная разница и в концепции это отмечено. Да, действующая автоматика работает, но сам принцип ее действия абсолютно иной.

3. Как таковой комплексной системы обеспечения устойчивости по напряжению нет. Есть отдельные ее компоненты, локальные и централизованные. Новая автоматика ИАРН построена именно как комплекс, сочетающий в себе децентрализованную и централизованную автоматику, который строится на действующей инфраструктуре, что не так затратно, как построить новый комплекс. Новый подход здесь заключается в том, что используется принцип регулирования «ПОСЛЕ», в котором управляющие воздействия выдаются после возмущения. На его основе предложенная ИАРН обеспечивает высокое быстродействие за счет машинного обучения и предсказания уставок «в моменте», что позволяет реализовать выдачу управляющих воздействий практически моментально.

На заседании 16 сентября 2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи разработки методического подхода, направленного на повышение устойчивости по напряжению энергосистем за счет применения интеллектуальных средств, в частности мультиагентных систем и машинного обучения, имеющей существенное значение для электроэнергетической отрасли Российской Федерации, присудить Реуцкому Ивану Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 – докторов наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены в разовую защиту – 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета



Стенников Валерий Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Солодуша Светлана Витальевна

16.09.2025 г.