




/Колисниченко Елена

Александровна /

«27» августа 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Реуцкого Ивана Сергеевича «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 специальности 2.4.3. Электроэнергетика

1. Актуальность темы исследований

Обеспечение устойчивости энергосистемы является одной из важных задач противоаварийного управления. Поддержание требуемого уровня устойчивости по напряжению требует эффективного регулирования напряжения в ЭЭС, однако принципы функционирования автоматик существующей структуры противоаварийного управления ЭЭС России, как показывает практика, не всегда позволяют в полной мере корректно выдавать управляющие воздействия во всех режимах ее работы и являются реактивными, реагирующими на измеряемые отклонения контролируемых параметров электроэнергетического режима. Поэтому возникает необходимость разработки более интеллектуальных и адаптивных комплексов. Таким образом, создание комплексного решения, дополняющего существующую систему противоаварийного управления интеллектуальными комплексами, такими как мультиагентные системы и машинное обучение, которые обладают высокой степенью адаптивности и быстродействия, является востребованной задачей.

2. Научная новизна диссертационного исследования

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

1. Предложены новые подходы к совершенствованию существующей системы ПАУ ЭЭС России в части обеспечения устойчивости по напряжению.

2. Обоснована целесообразность применения коммуникационных подходов к регулированию напряжения при реализации интеллектуальных комплексов противоаварийной автоматики (ПА).

3. Предложен новый принцип координированного регулирования СКРМ в ЭЭС на базе алгоритмов роевого интеллекта и градиентного бустинга, обладающий высоким быстродействием и адаптивностью к множеству схемно-режимных ситуаций.

4. Усовершенствован мультиагентный принцип регулирования уставок АРВ синхронных генераторов и отключения нагрузок потребителей в рамках решения задания ПАУ ЭЭС.

5. Разработана оригинальная концепция внедрения новой интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности (ИАРН) в структуру ПАУ ЭЭС России позволяющая применять интеллектуальные комплексы с сохранением существующих иерархических принципов на действующей инфраструктуре ПАУ.

3. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация объемом 158 страницы состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименования, 4 приложений, основной текст изложен на 123 страницах.

Во введении показана актуальность работы, сформулирована её цель, определена научная новизна исследований, показана практическая значимость и перечислены области ее применения, представлены положения, выносимые на защиту, дается краткое содержание работы.

В первой главе обоснована необходимость совершенствования существующих систем ПАУ ЭЭС России предотвращения нарушений устойчивости по напряжению. Выполнен анализ системных аварий в ЭЭС, возникающие из-за нарушений устойчивости по напряжению, который показал, что при используемой в ЭЭС России системе ПАУ выдача управляющих воздействий может оказаться несвоевременной и/или неэффективной, что может способствовать развитию аварий. Отмечено, что в ЭЭС России в настоящее время отсутствует полноценные системы ПАУ по напряжению, так как процессы в ЭЭС протекают намного быстрее (темпы протекания процесса лавины напряжения выше, чем у лавины частоты), чем скорость реализации УВ.

Во второй главе исследованы архитектуры построения схем регулирования напряжения в ЭЭС, на основании которых выбраны схемы для моделирования интеллектуальной системы ПАУ. Отмечено что по локальному принципу функционирует АОСН, принципы и недостатки которой были приведены в диссертации и их применение противоречит принципам адаптивного ПАУ. Выполнено описание типа и архитектуры управления МАС, их применение автор выделяет для построения адаптивного интеллектуального ПАУ. Рассмотрено функционирование ЦСПА, недостатками которой отмечен высокий порог требуемых вычислительных ресурсов, который непосредственно влияет на время выдачи УВ. В связи с этим в диссертации предложено ускорить и автоматизировать решение задачи управления путем применения индикатора устойчивости ЭЭС по напряжению – L -индекса, который не требует значительных вычислительных затрат, т.к. для его расчета используются только часть параметров электроэнергетического режима. В целях ускорения решения задачи централизованного управления в диссертации рассмотрено и предложено дополнить схему технологиями машинного обучения, а именно алгоритмом градиентного бустинга, который позволяет достичь высокой точности распознавания аварийных и предаварийных режимов ЭЭС в реальном времени.

В третьей главе выполнена разработка модели ПАУ (ИАРН) на основе применения мультиагентных систем и алгоритмов эвристической оптимизации, а также машинного обучения для решения задачи обеспечения устойчивости в ЭЭС по напряжению, а также предложена концепция возможного применения модели интеллектуальной автоматики в структуре ПАУ ЕЭС России. ИАРН включает в себя составляющие двух подходов: децентрализованная автоматика для регулирования уставок АРВ синхронных генераторов (МПА) построенная по принципу мультиагентных систем и централизованная автоматика регулирования СКРМ на базе концепции виртуальной электростанции (ВЭ-СКРМ) и использующая в качестве основы решатель задачи оптимизации (минимизации) целевой функции глобального L -индекса ЭЭС, дополненный алгоритмом машинного обучения. С учетом отмеченных в диссертации выводов о том, что интеллектуальные автоматики нового поколения (НП) должны дополнять существующую структуру ПАУ ЕЭС России, рассмотрена возможность и предложена адекватная модель внедрения ИАРН с сохранением действующих иерархических принципов построения ПАУ.

В четвертой главе произведены исследования ИАРН на схемах энергосистемы Иркутской области при возникновении аварийных возмущений для сохранения устойчивости по напряжению в два этапа. В качестве возмущений для каждой из схемы были рассмотрены характерные нарушения режима, которые оказывают наибольшее влияние на отклонение напряжения в

сети. Проведенные испытания указывают на высокое качество противоаварийного управления с использованием разработанных моделей ИАРН. Реализация скоординированного управления СКРМ на базе ВЭ-СКРМ позволяет дополнительно повысить предел по статистической устойчивости по напряжению и реализовать эффективное регулирование напряжения при различных возмущениях.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях представлены исходные данные и результаты расчетов режимов для схем ЭЭС.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации Теоретическая ценность заключается в разработке модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности с применением мультиагентных систем и машинного обучения, которая позволит обеспечивать устойчивость ЭЭС по напряжению в процессе протекания аварийного режима, своевременно выдавая управляющие воздействия, основанные на параметрах аварийного режима или максимально близкому к нему. Практическая ценность определяется разработкой ИАРН, которая была успешно протестирована на примере реальной модели энергосистемы Иркутской области. Было показано, как предложенная ИАРН может быть интегрирована в существующую структуру ПАУ ЕЭС России.

5. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

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. Обоснованность и достоверность результатов научных исследований

Достоверность и обоснованность научных результатов диссертации подтверждается использованием классических расчетных методов и алгоритмов расчета, а также проверкой и сопоставлением предлагаемых методик с классическими. Адекватность используемой математической модели ЭЭС подтверждается соответствием реальным принципам функционирования электроэнергетической системы, а также согласованностью с результатами, полученными при использовании других программных комплексов.

7. Апробация и публикации результатов диссертационной работы

Основные выводы по теме диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 3 научных конференциях и семинарах международного уровня. По теме исследования опубликованы 6 статей, из них 2 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3, 1 публикация в рецензируемом научном издании первого квартиля Q1, индексируемом в Scopus и Web of Science Core Collection и 3 статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ.

8. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

1. В таблице 1.2 (Раздел 1) пояснительной записки приведены системные аварии в энергосистемах до 2017 года, однако происходили полномасштабные аварии в мировых энергосистемах, в том числе по типу неустойчивости напряжения, и после этого года. Например, крупная авария в национальной энергосистеме Нигерии, которая развивалась на фоне развития лавины напряжения. Требуется обновить данные таблицы, чтобы подчеркнуть сегодняшнюю актуальность проблемы.
2. Исследование поведения предложенных моделей ИАРН сразу демонстрируется на примере фрагменте реальной энергосистемы Иркутской области – Бодайбинский энергорайон, Северобайкальской энергокольцо (Глава 4). Однако общая практика демонстрации эффективности предложенных моделей и методов включает также первоначальную апробацию на простых примерах, например на небольших типовых тестовых схемах ЭЭС. Возможно было бы полезно привести такие простые тестовые демонстрации в диссертационной работе.
3. Представленные в диссертационной работе модели предложенной ИАРН, построены во многом на основе data-driven подходе, то есть, когда вырабатываемые управленческие решения основаны на данных. Однако в работе не обсуждаются вопросы «плохих данных», оценивания

состояния и кибербезопасности, которые являются ключевыми при масштабировании таких решений в реальные энергосистемы.

4. Разработанное автором программное обеспечение подразумевает его работу в автоматическом режиме, откуда также возникает вопрос с робастностью алгоритмов при пропадании данных и задержками в реальном времени. Также возникает вопрос о возможности применения алгоритмов машинного обучения и роевого интеллекта в ответственных системах автоматического управления электрическими режимами.
5. В подразделах 4.1 и 4.2 приведены оценки среднеквадратичных ошибок алгоритма Catboost при предсказании уставок СКРМ. Эти ошибки в среднем меняются от 1.5 до 15 %. Здесь требуется пояснение от автора, какой уровень ошибки можно считать требуемым (приемлемым) с точки зрения режимного и противоаварийного управления ЭЭС.
6. В таблице 4.2 (подраздел 4.2) приведены скорости сходимости решения различными методами при нахождении оптимальные параметров регулятора СКРМ. При этом метод внутренней точки и симплекс-метод имеют сопоставимые «время итераций» по сравнению с методом мотылька и пламени. Поэтому было бы полезно привести такие расчёты на примере схем с другой размерностью, чтобы более качественно оценить возможности этих методов в предложенной постановке задачи.

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

9. Заключение

Диссертация Реуцкого Ивана Сергеевича «Разработка модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения» является завершённой научно-квалификационной работой. Она выполнена на высоком теоретическом уровне по тематике, актуальной для электроэнергетики России и мира, обладает научной новизной, содержит оригинальные результаты, имеет теоретическое и практическое значения и вносит большой вклад в решение актуальных задач устойчивости электроэнергетических систем по напряжению.

Содержание диссертации соответствует заявленной цели и поставленным задачам и детально отражает последовательность их решения. Диссертационная работа оформлена в соответствии со всеми требованиями. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и полностью отражает основные научные и практические результаты исследований. Отмеченные

замечания имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки рассматриваемой диссертационной работы.

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

Отзыв на диссертацию Реуцкого Ивана Сергеевича «Разработка модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения» обсужден и одобрен на заседании кафедры «Электроэнергетика транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИРГУПС) 30 июня 2025 г. протокол № 11.

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

Тихомиров Владимир Александрович

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

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

Тел.: +7(3952) 638-383

E-mail: mail@irgups.ru

Я, Тихомиров Владимир Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Реуцкого Ивана Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ТРАНСПОРТА»
ИРКУТСК
20.06.2025 г.
Подпись: [Handwritten signature]