

На правах рукописи



Реуцкий Иван Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ
РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА
ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель:	кандидат технических наук Томин Никита Викторович
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 энергетики
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Защита состоится: «16» сентября 2025 года в 9:00 на заседании 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 (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН: <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2025-2/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.118.01,
доктор технических наук, доцент  Солодуша Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение устойчивости работы энергосистем (ЭЭС) – одна из важных целей противоаварийного управления. В целом, устойчивость в энергосистемах «условно» разделяют на два типа: по напряжению и параллельной работы. Типы ограничений того или иного вида напрямую связано со структурой энергетического объединения. Статическая устойчивость параллельной работы ограничивает пропускную способность протяженных транзитных связей, обладающих высоким сопротивлением, что в свою очередь снижает предел передаваемой мощности по электропередаче. Из-за географических особенностей территории России такие ограничения в большинстве случаев преобладают в Единой энергетической системе (ЕЭС) России. Ограничения по устойчивости по напряжению актуальны в концентрированных энергосистемах, которые характеризуются устойчивыми связями и большим потреблением активной и реактивной мощности, таких, как крупные мегаполисы и промышленные центры, а также большинство западноевропейских ЭЭС. В таких ЭЭС фактор снижения напряжения, снижающим устойчивость системы, является ключевым. При этом, с учетом развития экономики и инфраструктуры России, роста распределенной и возобновляемой генерации, будут развиваться и промышленные центры, что может привести к формированию отдельных энергетических регионов, аналогичных западным структурам. В связи с этим задача обеспечения устойчивости по напряжению становится для ЕЭС России все более актуальной.

Для обеспечения устойчивости по напряжению требуется эффективное регулирование напряжения в ЭЭС во избежание возникновения аварийной ситуации, либо быстрого управления реактивной мощностью в аварийном режиме. Принципы существующей структуры противоаварийного управления (ПАУ) в ЕЭС России как средства предотвращения нарушения устойчивости по напряжению не позволяют выполнять корректное противоаварийное управление при нерасчетных режимах и/или ненормативных возмущениях, которые возникают в системных авариях. Локальные автоматики при этом не способны обеспечить должного быстрого действия, из-за необходимости отстройки от коротких замыканий (КЗ), либо могут выдавать некорректные управляющие воздействия (УВ) ввиду нерасчетных условий. Также к их недостаткам можно отнести дискретность регулирования, слабую адаптивность и отказоустойчивость. Все эти факторы указывают на необходимость разработки и применения более адаптивных комплексов ПАУ для координации работы отдельных устройств. Для устранения вышеуказанных недостатков эффективным решением может стать дополнение существующей системы ПАУ интеллектуальными комплексами. Среди них можно выделить децентрализованные и распределенные мультиагентные системы (МАС),

обладающие высокой степенью отказоустойчивости и адаптивности. Из централизованных систем управления напряжением можно выделить применение методов на основе оптимизации целевой функции по характерным индикаторам устойчивости ЭЭС (в качестве примера можно отметить применение L-индекса), которые требуют меньших вычислительных мощностей по сравнению с классическими методами расчетов уравнений потокораспределения. В ситуациях, когда требуется обеспечить большее быстроедействие ПАУ, эффективным способом будет дополнение таких методов технологиями машинного обучения (МО), которые позволят значительно ускорить и автоматизировать решение задачи нахождения границ устойчивости ЭЭС по напряжению и выдачи оптимальных УВ. Применение новых подходов к построению ПАУ ЭЭС России позволит значительно повысить устойчивость ЭЭС по напряжению, способствуя повышению уровня интеллектуализации сетей и достижению целей цифровой трансформации ЭЭС России.

Степень изученности проблемы. Исследованию МАС посвящены работы отечественных ученых: Воропая Н.И., Курбацкого В.Г., Фишова А.Г., Ефимова Д.Н., Панасецкого Д.А., а также зарубежных авторов Negnevitskiy M., Kamwa I., Vittal V., Carlsson D., Van Cutsem T., Fernandez J.L. и др. Применение методов оптимизации по характерным индексам устойчивости исследовались в работах Жукова А.В. и зарубежных авторов Q. Liu, M. You, H. Sun, P. Matthews и др.

Объектами исследования являются схемы электрических соединений северной части ЭЭС Иркутской области.

Предметами исследования являются математические модели мультиагентных систем и машинного обучения, применяемые для предотвращения нарушения устойчивости по напряжению.

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

В диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование необходимости совершенствования существующих систем ПАУ ЭЭС России для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению.
2. Разработка концепции построения и внедрения в структуру ПАУ ЭЭС России интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности (ИАРН) с сохранением существующих иерархических принципов на действующей инфраструктуре ПАУ.
3. Разработка программного прототипа ИАРН, реализующего разработанные методы на основе мультиагентных систем и машинного обучения.

4. Исследование поведения ИАРН как средство предотвращения нарушения устойчивости при возникновении различного рода возмущений в ЭЭС.

Научная новизна. В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

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

2. 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.

3. Усовершенствован мультиагентный принцип координированного регулирования уставок АРВ синхронных генераторов и отключения нагрузок потребителей в рамках решения задачи ПАУ ЭЭС.

4. Разработана оригинальная концепция внедрения ИАРН в структуру ПАУ ЭЭС России, позволяющая применять интеллектуальные комплексы с сохранением существующих иерархических принципов на действующей инфраструктуре ПАУ.

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.

Теоретическая значимость результатов диссертации 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 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.

Методология и методы исследования. Диссертация выполнена с использованием методов оптимизации, мультиагентного подхода, машинного обучения, искусственных нейронных сетей, методов оценки состояния. В качестве расчетного модуля был 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование новых подходов к совершенствованию существующей системы ПАУ ЕЭС России с внедрением интеллектуальных комплексов для обеспечения устойчивости по напряжению.

2. Принципы реализации ИАРН для предотвращения нарушения устойчивости по напряжению в ЭЭС при возникновении возмущений.

3. Новый метод адаптивного регулирования средств компенсации реактивной мощности в ЭЭС, основанный на алгоритмах эвристической оптимизации и машинного обучения.

4. Метод настройки автоматических регуляторов возбуждения генераторов на основе мультиагентной системы.

5. Программный прототип ИАРН, использующий мультиагентные технологии и машинное обучение.

6. Концепция внедрения ИАРН в существующую структуру ПАУ ЕЭС России.

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.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных научных конференциях и семинарах: Международные научные семинары им. Ю.Н. Руденко №68, №69 «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (2017, 2018 гг.), X Международная научная конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (2019 г.),

International Workshop on Flexibility and Resiliency Problems of Electric Power Systems (2019 г.). Результаты диссертации получены при поддержке грантов РФ 19-49-04108 (рук. Н.И. Воропай) и проекта государственного задания III.17.4.2. Теория и методы обоснования развития и управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем (рук. В.Г. Курбацкий, № АААА-А17-117030310438-1).

Личный вклад. Все научно-методические и прикладные результаты, представленные в диссертации, получены автором 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.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей, в том числе 2 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3, 1 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science Core Collection, 3 – в иных изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация объемом 151 страница состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 142 наименований, 4 приложений, основной текст изложен на 118 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 «Описание проблемы устойчивости по напряжению» обоснована необходимость совершенствования существующих систем ПАУ ЕЭС России предотвращения нарушений устойчивости по напряжению.

Нарушения устойчивости по напряжению, являются следствием образования дефицитов реактивной мощности в узлах нагрузки. Для ее сохранения, помимо наличия резервов реактивной мощности требуется их координация для корректного распределения по узлам нагрузки за наименьшее время, которую в ЭЭС выполняют системы ПАУ. Анализ системных аварий показал, что при используемой в ЕЭС России системе ПАУ выдача УВ может оказаться несвоевременной или неэффективной, что может способствовать развитию аварий. Отмечено, что в ЕЭС России в настоящее время отсутствуют 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 от ПА. Принципы существующей автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), обеспечивающей 10% запаса статической устойчивости по напряжению в послеаварийном режиме (ПАР), не позволяют выполнять корректное ПАУ в нерасчетных режимах и при ненормативных возмущениях, которые возникают при системных авариях. Недостатками локальной автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) являются большие выдержки времени реализации УВ ввиду необходимости отстройки от короткого замыкания, дискретность регулирования СКРМ, а также отсутствие координации.

Таким образом в главе обоснована необходимость совершенствования существующих систем ПАУ ЕЭС России для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению. Для повышения устойчивости по напряжению в ЭЭС, в работе сформулированы и решаются следующие задачи:

1. Разработка алгоритмов и принципов построения новой интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности (ИАРН) с учетом описанных требований для интеллектуальных систем ПАУ в ЭЭС.
2. Разработка программного прототипа ИАРН, использующего разработанные методы на основе мультиагентных систем и машинного обучения.
3. Исследование поведения ИАРН как средство предотвращения нарушения устойчивости при возникновении различного рода возмущений в ЭЭС.
4. Оценка возможности использования ИАРН в существующей структуре ПАУ ЕЭС России, с сохранением существующих иерархических принципов.

Во второй главе «Интеллектуальные системы обеспечения устойчивости по напряжению» исследованы архитектуры построения интеллектуальных систем регулирования напряжения в ЭЭС, которые могут быть применимы для моделирования интеллектуальной системы ПАУ.

Выделены две основные категории применяемых схем регулирования напряжения и реактивной мощности в современных ЭЭС: *коммуникационные* и *автономные* (или локальные). Коммуникационные схемы на основе способа обмена информацией между элементами сети разделяется на *централизованные*, *децентрализованные* и *распределенные*. Также возможно сочетание этих схем для более оптимального и гибкого управления.

В локальных схемах регулирования напряжения между участвующими элементами сети отсутствует взаимодействие, поэтому они не используют весь потенциал коммуникации, что может привести к неоптимальному регулированию напряжения. По такому принципу функционирует локальная АОСН, принципы и недостатки которой были описаны в диссертации. Применение таких схем не

соответствует принципам адаптивного интеллектуального ПАУ, поэтому целесообразно использовать коммуникационные схемы регулирования.

Распределенные и децентрализованные схемы регулирования напряжения и реактивной мощности в большинстве представлены по типу МАС, которые обладают высокой степенью адаптивности в выдаче УВ и уже доказали свою эффективность. Их применение соответствует принципам адаптивного интеллектуального ПАУ. При построении децентрализованного адаптивного ПАУ целесообразно использовать многослойную архитектуру, т.к. она включает как совещательные, так и реактивные свойства. Совещательные возможности МАС повышают *адаптивность* и *отказоустойчивость* комплекса ПАУ, а реактивные свойства локальных устройств ПА могут быть также включены в агентную архитектуру.

Декомпозиция ЭЭС на энергорайоны позволяет существенно сократить объем рассматриваемых вариантов отключений. Анализ режимов выполняется единовременно, а количество получаемой информации в результате может быть достаточной для решения задачи со скоростью обработки современных контроллеров. База знаний, полученная в результате анализа, должна быть передана всем агентам внутри защищаемой подсистемы.

В системах централизованного регулирования существует один центральный координатор (ЦК), который получает все необходимые измерения сети, находит решение проблемы управления и передает УВ обратно в контроллеры ПАУ. К существующим системам такого типа можно отнести централизованную систему противоаварийной автоматики (ЦСПА), которая дозирует УВ в зависимости от текущего режима периодическим пересчетом УР и УВ. Недостатками применения классического метода расчета уравнений потокораспределения для определения УВ является высокий порог требуемых вычислительных ресурсов, который непосредственно влияет на время выдачи УВ. В связи с этим большое внимание уделяется различным специальным индексам устойчивости ЭЭС. Поэтому в диссертации во избежание недостатков классических централизованных методов предлагается ускорить и автоматизировать решение задачи управления путем использования рассмотренного индикатора устойчивости ЭЭС по напряжению – L -индекса, который позволяет достаточно точно определить количественный запас устойчивости по напряжению и не требует значительных вычислительных затрат, т.к. для его расчета используются только элементы матрицы проводимостей и часть параметров электроэнергетического режима:

$$L_j = \left| 1 + \frac{U_{0j}}{U_j} \right| = \left| \frac{S_j^+}{Y_{jj}^+ U_j^2} \right| = \frac{S_j^+}{Y_{jj}^+ U_j^2}. \quad (1)$$

В целях обеспечения более быстрого решения задачи централизованного управления предложено дополнить схему технологиями МО. Перспективным

подходом для обеспечения устойчивости по напряжению представляются ансамблевые методы на основе деревьев решений, такие как алгоритмы случайного леса и градиентного бустинга, т.к. они позволяют достичь высокой точности распознавания аварийных и предаварийных режимов ЭЭС в реальном времени. При этом стоит отметить, что в большинстве исследований, на базе этих методов решается задача классификации режимов работы ЭЭС, как правило, на основе синхронизированных векторных измерений. Однако более высокой точности можно достичь при решении задачи восстановления регрессии, когда модель предсказывает конкретное числовое значение индикатора устойчивости, а не некий класс, характеризующий режимы работы ЭЭС.

В целом, сочетание коммуникационных схем повышает эффективность регулирования напряжения, а также отказоустойчивость самого комплекса ПАУ, поэтому допустимо их сочетание. На основании выводов, сделанных во второй главе, выбраны принципы построения интеллектуального комплекса ПАУ, путем сочетания децентрализованного и централизованного подходов к регулированию напряжения.

В третьей главе «Архитектура построения интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности» (ИАРН) детально раскрыта поставленная задача интеллектуальной координации локальных средств регулирования напряжения в ЭЭС, что является проблемой в аварийных ситуациях при действующей системе ПАУ. В качестве главного метода решения этой задачи предложено избирательное применение современных принципов управления, таких как МАС, алгоритмов оптимизации и машинного обучения. На их основе выполнена разработка модели ПАУ для решения задачи обеспечения устойчивости в ЭЭС по напряжению, а также предложена концепция возможного применения модели в структуре ПАУ ЕЭС России. Так, интеллектуальная автоматика регулирования напряжения и реактивной мощности (ИАРН, Рисунок 1) построена на применении двух обоснованных к применению подходов:

1. Децентрализованная мультиагентная противоаварийная автоматика (МПА) для регулирования уставок автоматики регулирования возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ) – позволяет создать систему, в которой при потере одного или более элементов, автоматика не должна выходить из строя, а функции отказавших элементов должны передаваться оставшимся в работе.

2. Централизованная интеллектуальная автоматика регулирования СКРМ на базе концепции виртуальной электростанции (ВЭ-СКРМ) с применением алгоритмов эвристической оптимизации и машинного обучения. Задача централизованной координации хорошо формулируется на основе оценки показателей коэффициентов чувствительности или специальных индикаторов устойчивости, о которых подробно говорилось выше. При отказе

централизованного координатора локальное управление реализует местное регулирование реактивной мощности только на основе локальных измерений, например, измерений напряжения или локальных индикаторов устойчивости отдельного узла, где установлены СКРМ.

Так как одним из основных требований к системам ПАУ является *отказоустойчивость*, выполнение ИАРН полностью централизованной существенно повышает вероятность ее отказа, поэтому дополнение ее децентрализованной структурой повышает данное свойство.

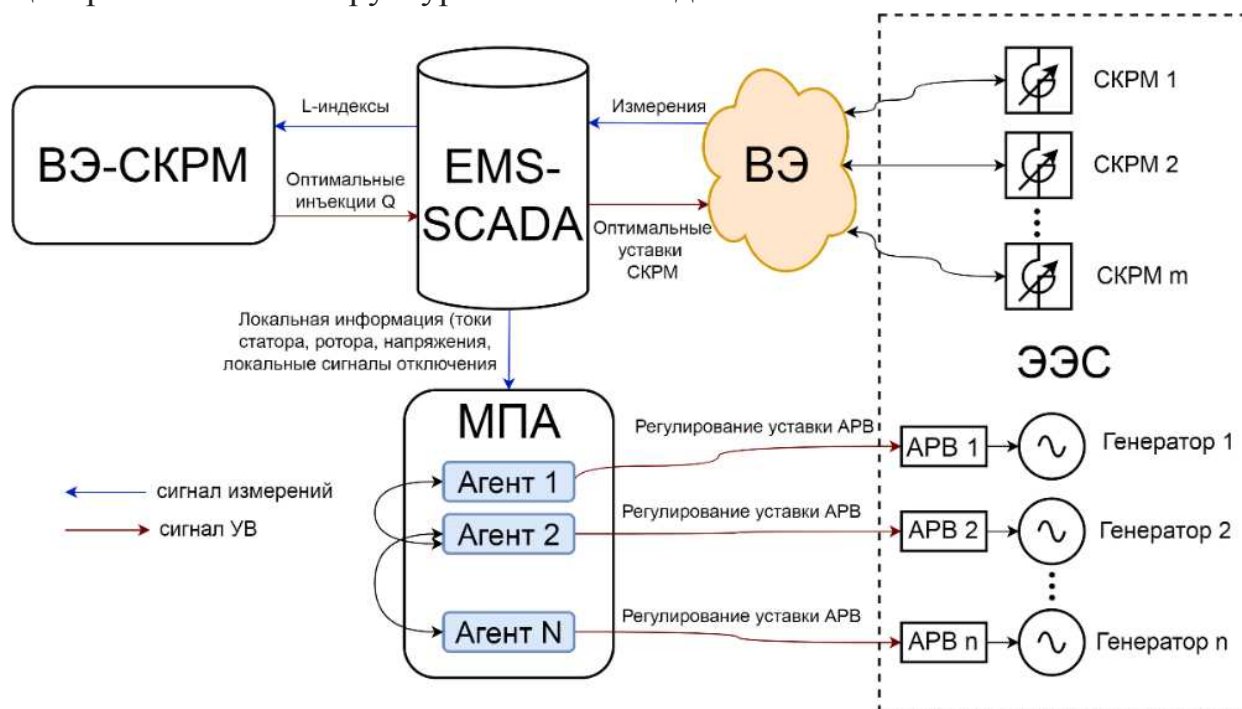


Рисунок 1 – Общая схема построения автоматики ИАРН

Децентрализованная МПА построена по схеме МАС и обеспечивает управление реактивной мощностью. МПА состоит из двух типов агентов: агентов нагрузки (АН) и генерации (АГ). АГ, установленные на генераторах ЭЭС, получают локальную информацию: величины токов статоров и роторов генераторов и т.д. Используя АГ МПА предотвращает аварийное отключение генераторов и сохраняет напряжение на шинах нагрузки в допустимых пределах. АГ вступают работу при приближении токов статоров или роторов генераторов в контролируемой подсистеме к аварийно допустимым значениям (устанавливаемым заводом изготовителем), регулируя выработку активной и реактивной мощности СГ таким образом, чтобы предотвратить перегрузку согласно условиям (2) и (3):

$$I_G \leq I_{DOP} = k_I \cdot I_{NOM}, \quad (2)$$

$$i_{fMIN} \leq i_f \leq i_{fDOP} = k_E \cdot i_{fNOM}, \quad (3)$$

где k_I и k_E - соответственно максимально допустимые (с учетом времени) кратности перегрузки по токам статора и ротора; I_{DOP} и I_{NOM} - соответственно

максимально допустимый (с учетом времени) и номинальный токи статора. i_{fMIN} , i_{fDOP} и i_{fNOM} - соответственно минимальный, максимально допустимый (с учетом времени) и номинальный токи ротора.

Применительно к разрабатываемой МПА для предотвращения неустойчивости по напряжению, для каждого АГ формировалась база данных, которая содержала информацию о коэффициентах чувствительности для различных одинарных и двойных отключений в рассматриваемой подсистеме ЭЭС. Сторонние АН, содержащие трансформаторы передающей части сети, могут снизить дефицит за счет изменения положения РПН. Помимо запросов на выработку реактивной мощности, перегруженный АГ отправляет сообщения с запросом о временной блокировке РПН нагрузочных трансформаторов, потребляющих при этом большую реактивную мощность.



Рисунок 2 – Общая схема реализуемой централизованной ВЭ-СКРМ на базе концепции ВЭ

Роль централизованной ВЭ-СКРМ выполняет система, работающая по принципу виртуальной электростанции СКРМ и использующая в качестве основы решение задачи оптимизации целевой функции глобального L -индекса ЭЭС, дополненная алгоритмами машинного обучения. Концепция ВЭ состоит в том, что совокупность распределенных генераторов электрической энергии (или СКРМ) представляет собой систему согласованно работающих устройств, которая управляется и контролируется из единого центра. Предложенная модель ВЭ-СКРМ представлена общей схемой на Рисунке 2.

Общее математическое описание модели ВЭ для управления распределёнными СКРМ может быть представлено в виде системы уравнений. Пусть имеется N распределённых СКРМ и M потребителей реактивной мощности. Каждое СКРМ i имеет реактивную мощность компенсации $Q_i^{\text{СКРМ}}$, которая зависит от внешних факторов, таких как напряжение в сети, нагрузка в сети и т.д. Кроме того в ЭЭС имеются и другие «естественные» источники, такие как генераторы электростанций, воздушные и кабельные ЛЭП, $Q_i^{\text{раб}}$. Каждый потребитель j имеет реактивную мощность потребления D_j , которая зависит от его спроса на реактивную мощность (реактивная мощность нагрузок ЭЭС, потери реактивной мощности в системе и расход реактивной мощности на собственные нужды системы). Тогда система уравнений для модели ВЭ может быть записана следующим образом:

$$\sum Q_i^{\text{раб}} + \sum Q_i^{\text{СКРМ}} - \sum D_j = 0, \text{ где } i = 1, 2, \dots, N \text{ и } j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

Нарушение баланса реактивной мощности (4) приводит к отклонениям напряжения, при этом в разных узлах системы отклонения могут быть различными, в отличие от отклонений частоты, которые происходят одновременно во всей системе. Регулирование напряжения осуществляют регулированием реактивной мощности, причем это регулирование в разных точках системы может выполняться независимо. Однако в случае применения подхода на основе ВЭ такое регулирование выполняется уже скоординировано.

Кроме того, для каждого СКРМ i может быть записано уравнение компенсации реактивной мощности:

$$Q_i^{\text{СКРМ}} = f(x_i), \quad (5)$$

где x_i - вектор внешних факторов, влияющих на компенсацию реактивной мощности СКРМ i , а $f(x_i)$ - функция компенсации реактивной мощности СКРМ i .

Для управления компенсацией реактивной мощности каждым СКРМ на базе ВЭ в системе может быть записано следующее уравнение:

$$u_i = h_i(z_i), \quad (6)$$

где z_i - вектор факторов управления (т.е. ограничений), влияющих на компенсацию реактивной мощности СКРМ i , а h_i - функция управления компенсацией реактивной мощности СКРМ i , которая представляет собой некую стратегию оптимального управления, найденную в результате решения оптимизационной задачи.

В диссертации предложено в качестве целевой функции ВЭ, определяющей стратегию управления u_i , согласно (6) использовать глобальный L -индекс узлов

ЭЭС (сумму локальных L -индексов), значение которого необходимо минимизировать для обеспечения требуемого уровня надёжности. В этом случае целевая функция F_j для задачи нахождения оптимальных установок СКРМ может быть записана следующим образом:

$$F_j = L_{sum} = \sum_{j=1}^m \left(1 - \frac{1}{U_j} \sqrt{\sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \left(\frac{(Q_i^{СКРМ} + \Delta Q_i^{СКРМ}) X_{ji}}{U_i} \right)^2 + \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \left(\frac{-P_i X_{ji}}{U_i} \right)^2} \right) \quad (7)$$

В результате получен экстремум функции L_{sum} и поскольку она является выпуклой, то её экстремальное значение будет являться минимальным. Исходя из принятой методологии, ЭЭС будет работать в оптимальном установившемся режиме при минимальном L_{sum} . Для решения этой задачи предлагается использовать быстрые решатели на основе эмпирического алгоритма оптимизации мотылька и пламени (МП) и алгоритм градиентного бустинга CatBoost.

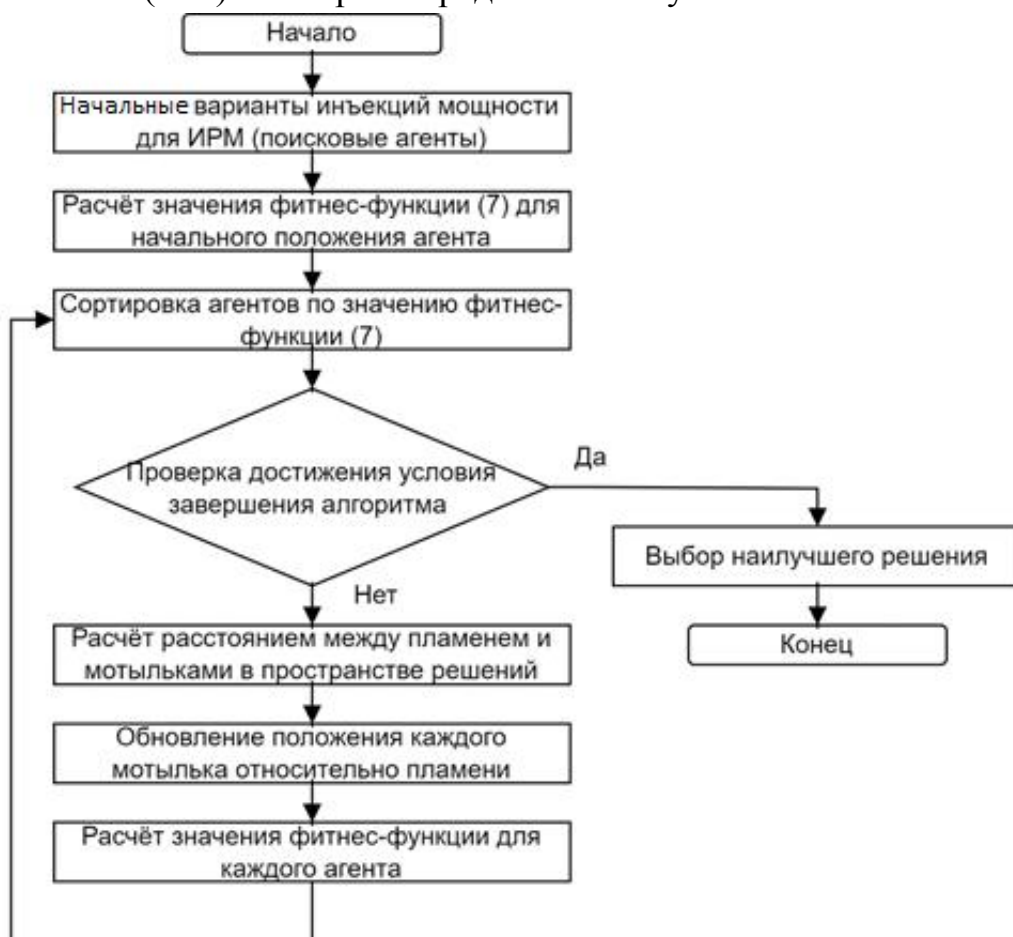


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма МП для задачи расчёта уставок СКРМ

Выбор алгоритма МП обусловлен тем, его по сравнению с другими популяционными алгоритмами его сходимость наивысшая т.е. оптимальное решение достигается за наименьшее количество итераций. Главными элементами алгоритма МП являются мотыльки и пламя, которые соответствуют решениям. Мотыльки являются поисковыми агентами, которые перемещаются в пространстве

решений, в то время как пламя – лучшие на текущий момент найденные решения. Все мотыльки осуществляют поиск вокруг пламени и перемещают пламя в новое положение, если найдено лучшее решение. Такой процесс поиска гарантирует нахождение глобального решения оптимизационной задачи. Стратегически, в процессе миграции агенты движутся таким образом, чтобы приблизиться к глобальному экстремуму целевой функции. Механизм работы данного алгоритма применительно к решаемой в данной работе задаче приведен на Рисунке 3.

Предложенный оптимизационный решатель на основе МП как основной элемент предложенной централизованной автоматики предполагает быстрый расчёт дополнительных инъекции реактивной мощности $\Delta Q_i^{\text{СКРМ}}$ для СКРМ, согласно условию:

$$t_{\text{расч}} < t_{\text{кр}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{расч}}$ – время расчёта алгоритмом МП инъекций реактивной мощности для всех регулируемых СКРМ в ЭЭС, $t_{\text{кр}}$ – критическое время, определяемое требованиями режимного и противоаварийного управления.

В случае нарушения условия (8), например, для схем ЭЭС большой размерности с большим количеством установленных регулируемых СКРМ, предлагается использовать предобученный ускоритель решений на основе модели машинного обучения, когда задача оптимизации трансформируется в задачу множественной многоцелевой регрессии, целью которой является одновременное предсказание инъекций реактивной мощности $\Delta Q_1^{\text{СКРМ}}, \dots, \Delta Q_m^{\text{СКРМ}}$, где m – количество регулируемых СКРМ в ЭЭС.

В общем случае такая задача сводится к обучению многоцелевой регрессионной модели на наборе данных $S = (x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(N)}, y^{(N)})$, вычисленном с помощью некой функции h , которая присваивает вектору x , вектору y -целевые значения для каждого экземпляра. Тогда математически это может быть записано следующим образом:

$$h: \Omega_{x_1} \times \dots \times \Omega_{x_m} = \Omega_{y_1} \times \dots \times \Omega_{y_d}, \quad (9)$$

$$x = (x_1, \dots, x_m) \rightarrow y = (y_1, \dots, y_d),$$

где Ω_{x_i} и Ω_{y_i} – пространство образцов для каждого предиктора x_i ($i \in 1, \dots, m$) и каждой целевой переменной y_i ($i \in 1, \dots, d$) соответственно.

При этом под предикторами x_i здесь понимаются расчётные локальные L -индексы L_j , а под выходами y_i предсказанные значения инъекций реактивной мощности ΔQ_i . Под функций h здесь могут пониматься как модель квазидинамики ЭЭС, которая позволяет получать последовательность установившихся режимов с различными расчётными параметрами режима, так и некий накопленный архив телеизмерений.

Перепишав уравнения (9) более компактно как векторно-матричное произведение $1 \times m$ обозначив переменные x_i и y_i в постановке задачи регулирования СКРМ:

$$\dot{L}_i^T W = [\dot{L}_i^T w_1, \dot{L}_i^T w_2, \dots, \dot{L}_i^T w_m], \quad (10)$$

и тогда весь набор линейных зависимостей можно также записать как:

$$\dot{L}_i^T W \approx \Delta Q_j^{\text{СКРМ}} \quad i = 1, \dots, d \quad j = 1, \dots, m. \quad (11)$$

Приближение $\approx$ в (11) верно только в том случае, если можно правильно настроить веса W . Для этого может быть использована любая функция стоимости регрессии для решения задачи минимизации, чтобы это приближение выполнялось как можно лучше. В диссертации в качестве решения (11) предложено использовать алгоритм градиентного бустинга CatBoost, разработанный компанией Яндекс, который основан на градиентных деревьях решений, и при обучении этой модели последовательно строится набор деревьев решений. Данный алгоритм реализует меньшее количество параметров и обеспечивает более высокую точность, в том числе в случае сложных нелинейных зависимостей. Так как «выращенные» деревья сбалансированы, менее подвержены переобучению и позволяют значительно ускорить предсказание во время тестирования

Применительно к задаче предсказания инъекций реактивной мощности $\Delta Q_i^{\text{СКРМ}}$ алгоритм градиентного бустинга CatBoost записывается следующим образом:

$$\Delta Q_i^{\text{СКРМ},p} = \Delta Q_i^{\text{СКРМ},p} + \alpha \cdot \delta \sum (\Delta Q_i^{\text{СКРМ}} - \Delta Q_i^{\text{СКРМ},p})^2 / \delta \Delta Q_i, \quad (12)$$

где α – скорость обучения, $\Delta Q_i^{\text{СКРМ},p}$ и $\Delta Q_i^{\text{СКРМ}}$ – предсказанные и целевые значения оптимальных значений инъекций мощности для СКРМ.

С учетом отмеченных ранее выводов о том, что интеллектуальные автоматизации нового поколения (НП) должны дополнять существующую структуру ПАУ ЕЭС России, рассмотрена возможность внедрения ИАРН с сохранением действующих иерархических принципов построения ПАУ. Это важно, так как в современных больших ЭЭС, расположенных на большой территории, невозможно выполнить ПАУ на базе единого централизованного комплекса, поскольку для этого потребуется чрезвычайно большое число протяженных каналов связи и вычислительных мощностей.

Так, предложенная в работе ИАРН представляется частью АПНУ НП (Рисунок 4) работающей по циклу «ПОСЛЕ», реализация которой должна быть следующим шагом в модернизации ПАУ ЕЭС России. При этом существующие комплексы ПАУ могут быть дополнены интеллектуальными средствами с сохранением их автономной работы в случае неработоспособности АПНУ НП.

Важно отметить, что ИАРН в рамках работы АПНУ НП будет реализовывать УВ на координацию резервов реактивной мощности и изменение состояния СКРМ для повышения статической устойчивости, что отсутствует в существующих принципах ПАУ. Имеющуюся инфраструктуру построения ПАУ возможно использовать для реализации ИАРН. АОСН в рамках ПАУ НП будет являться низовым устройством для реализации части УВ от ВЭ-СКРМ (дискретное регулирование СКРМ) и от МПА (в части выполнения процедуры отключения нагрузки (ОН)) и сохранять свои функции при отказе верхних устройств по типу ЛАПНУ.

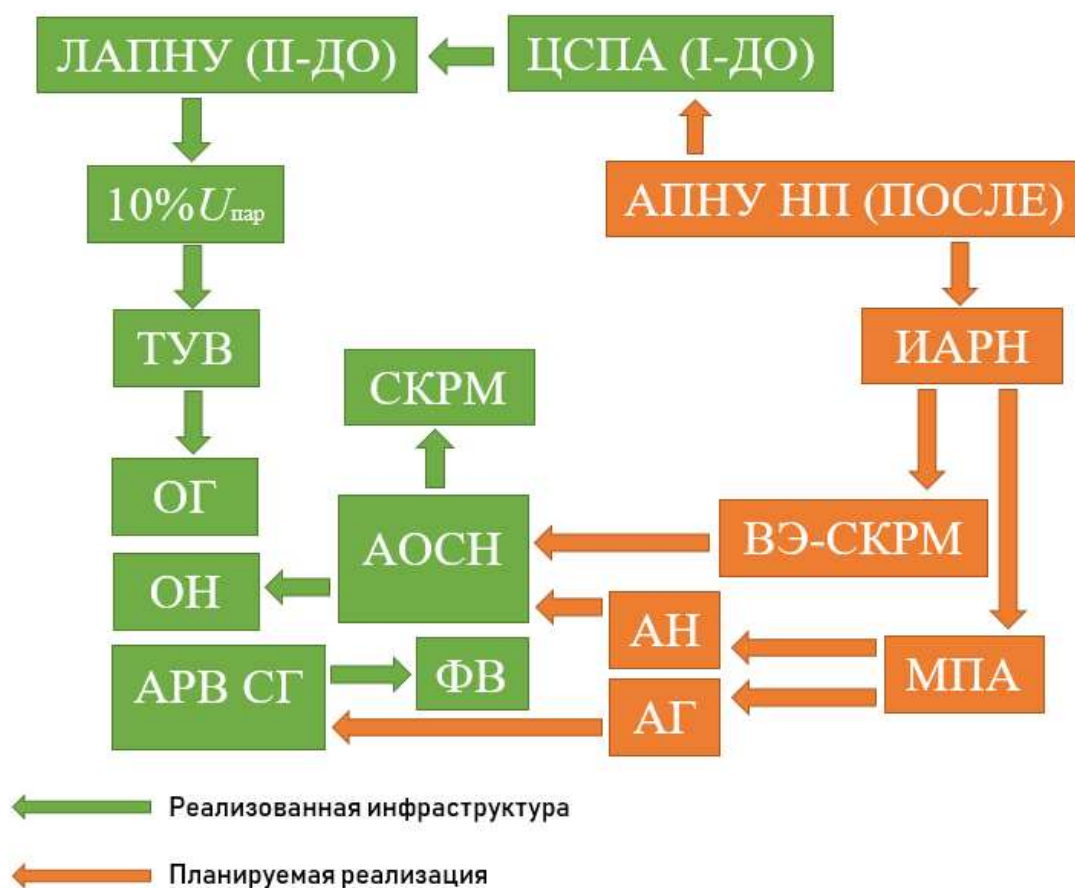


Рисунок 4 – Модель внедрения ИАРН в структуру ПАУ ЕЭС России

В четвертой главе «Исследование поведения интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности» произведены исследования действия ИАРН на модели энергосистемы Иркутской области при возникновении аварийных возмущений. Исследования на схеме северной части энергосистемы Иркутской области проводились в два этапа. На первом этапе объектом исследования был Бодайбинский энергорайон (БЭР) который был запитан в тупиковом режиме по двухцепному транзиту 220 кВ от Усть-Илимской ГЭС. Однако к концу 2019 года внешняя схема питания БЭР претерпела значительные изменения, что повлияло на режимы его работы. С уходом от проблем консольного

питания БЭР появились новые особенности управления режимом по напряжению уже в схеме Северобайкальского энергетического кольца (далее – СБЭК, Рисунок 5), который стал объектом на втором этапе исследования.

При исследовании эффективности ИАРН для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению в схеме СБЭК были рассмотрены следующие варианты моделирования схемы:

1. Без реализации координирующей автоматики или ЛАПНУ. В этом случае в рассматриваемой подсистеме функционируют локальные непрерывные (АРВ, ограничения перенапряжения (ОП), управляемые шунтирующие реакторы (УШР)) и дискретные (регулирование напряжение под нагрузкой (РПН), АОСН) регуляторы, действия которых не координируются.
2. С реализацией МПА в подсистеме. В этом случае в подсистеме также присутствуют локальные (непрерывные и дискретные) регуляторы, однако их действия координируются МПА.
3. С реализацией ВЭ-СКРМ для координированного дискретного управления СКРМ имеющемуся в системе.

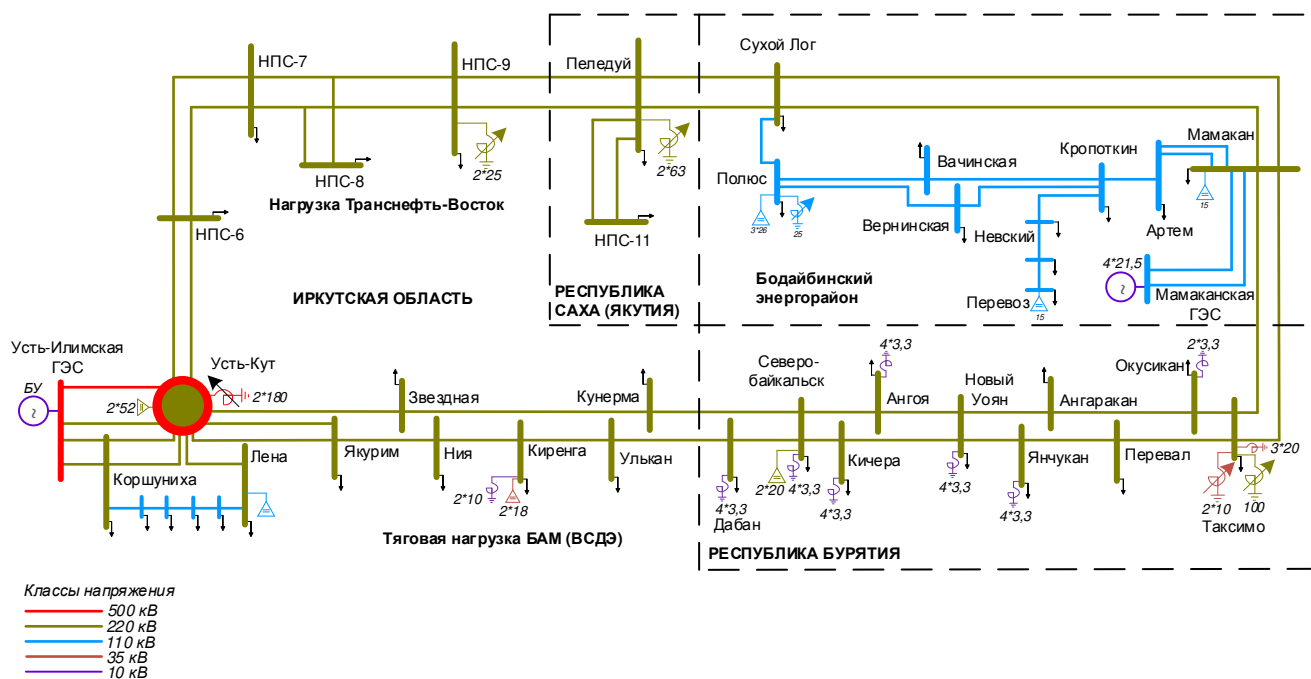
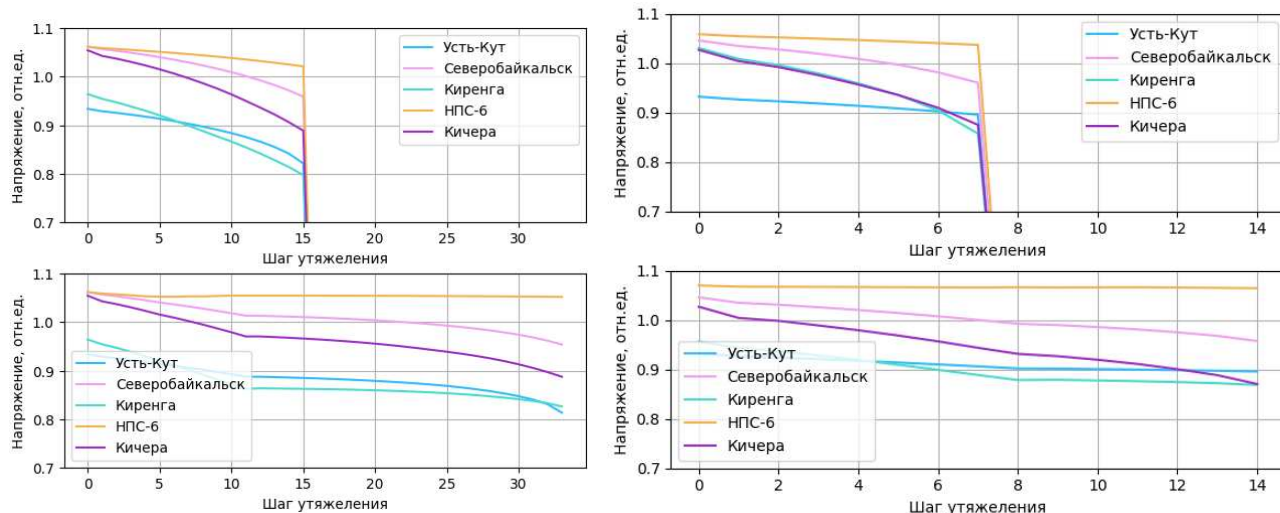


Рисунок 5 – Схема Северобайкальского энергетического кольца 2020 г.

В качестве возмущений были рассмотрены характерные нарушения режима, при которых возможно не сохранение устойчивости по напряжению, для каждой из схем. Так как исследования ИАРН в схеме СБЭК (150 узлов) более масштабны по сравнению с БЭК (33 узла), далее приведены краткие результаты работы ИАРН в схеме СБЭК для которой были рассмотрены следующие аварийные возмущения:

- Базовый сценарий с последовательным и/или стохастическим утяжелением режима путем последовательного роста электропотребления для достижения предела устойчивости по напряжению (сценарий 1);
- Разрыв кольца между ПС 220 кВ НПС-7 и ПС 220 кВ НПС-9 в режиме максимальных нагрузок с утяжелением (сценарий 2).



а) сценарий 1

б) сценарий 2

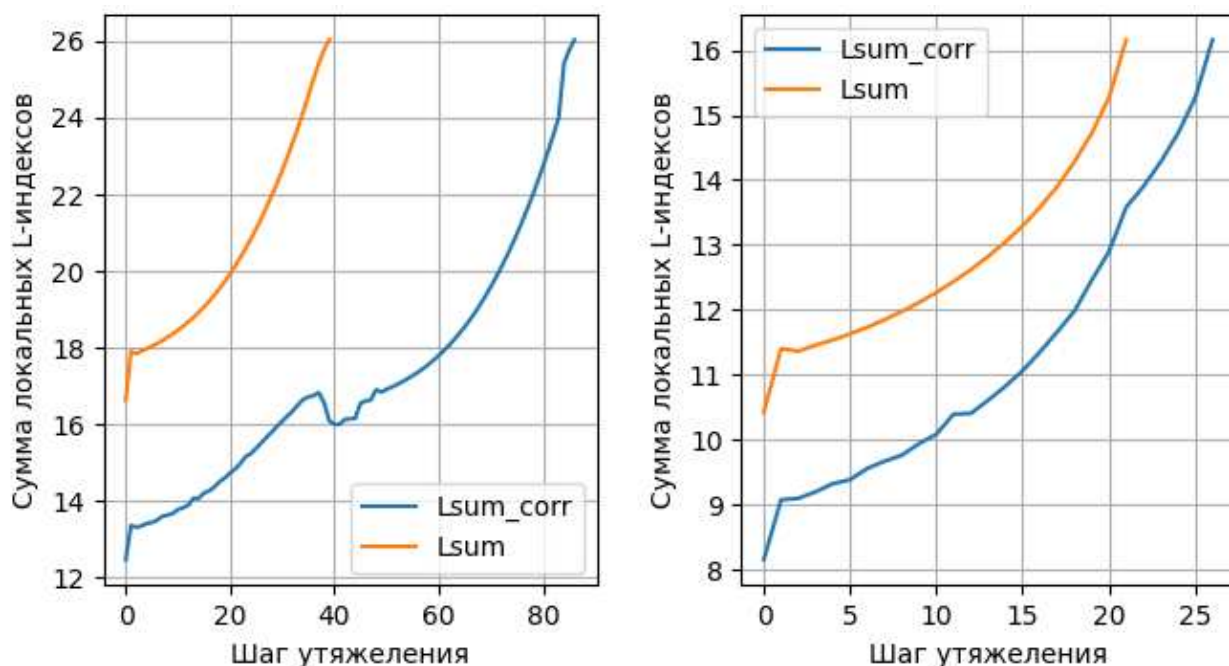
Рисунок 6 – Результаты квазидинамического моделирования на схеме СБЭК при использовании ОП АРВ (верхний график) и МПА (нижний график)

Для рассмотренных сценариев ИАРН показала лучший результат, по сравнению со вариантом моделирования без действия автоматики. Для сценария 1 при использовании МПА количество шагов утяжеления до предела по статической устойчивости ($N_{\max}$) равно 35, при использовании ОП АРВ $N_{\max} = 15$. Для более «тяжёлого» сценария 2 с разрывом кольца, в целом система быстрее достигает предела статической устойчивости (Рисунок 6, б.). Даже при использовании МПА количество шагов утяжеления сокращается примерно вдвое ($N_{\max} = 14$). Однако это всё равно в 2 раза больше, чем при моделировании ОП АРВ ($N_{\max} = 7$).

Как видно из Рисунка 7 в обоих рассмотренных сценариях интеллектуальное координирование СКРМ позволяет дополнительно «отодвинуть» предел по статической устойчивости. Если для первого сценария МПА обеспечивала $N_{\max} = 35$, то при использовании ВЭ-СКРМ оно значительно увеличивается до $N_{\max} = 87$ (Рисунок 7, а). В сценарии разрыва кольца СБЭК ВЭ-СКРМ даёт уже более скромный эффект повышения предела устойчивости по напряжению: с $N_{\max} = 23$ до $N_{\max} = 28$ (Рисунок 7, б).

Важным аспектом испытаний является также оценка быстродействия модели ВЭ-СКРМ. Для этого время нахождения оптимальных уставок СКРМ для одного установившегося режима сравнивалась с другими алгоритмами эвристической (рой частиц, имитация отжига) и традиционной (метод внутренней точки) оптимизации.

Как видно из Таблицы 1, алгоритм МП, используемый в ВЭ-СКРМ показывает наилучшие результаты, особенно по сравнению с другими эвристическими алгоритмами.



а) сценарий 1

б) сценарий 2

Рисунок 7 – Изменение суммы локальных L -индексов, L_{sum} без регулирования и с регулированием СКРМ для различных сценариев

Таблица 1. Сравнение методов по скорости сходимости решения

№	Метод оптимизации	Время итерации, с
1	Мотылёк и пламя	5,26
2	Метод внутренней точки	7,38
3	Симплекс-метод	8,45
4	Рой частиц	236,7
5	Имитация отжига	353,7

Однако в случае повышения размерности решаемой задачи, когда условие (8) может не выполняться, модель ВЭ-СКРМ предусматривает трансформацию оптимизационной постановки в задачу восстановления множественной регрессии и использование предварительно обученной модели градиентного бустинга CatBoost для предсказания уставок СКРМ. В этом случае фактически мы имеем приближённое, но крайне быстрое решение задачи ПАУ. В связи с этим крайне важно оценить тестовую ошибку предсказания CatBoost, т.е. точность расчёта уставок.

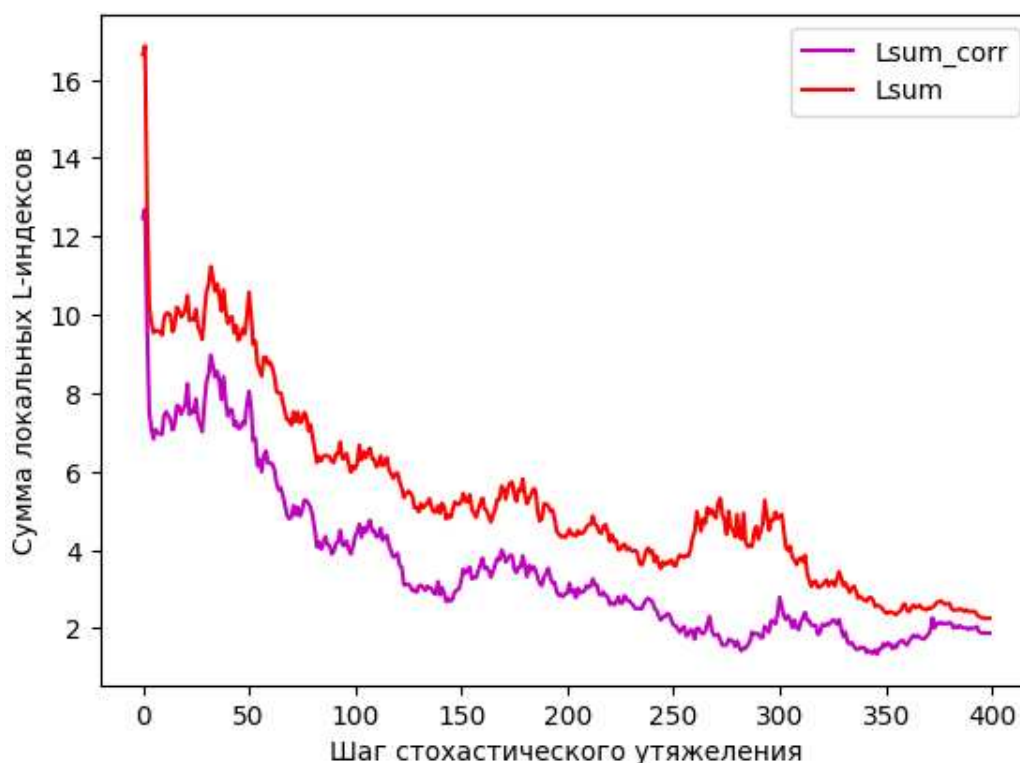


Рисунок 8 – Изменение суммы локальных L -индексов без регулирования (L_{sum}) и с регулированием СКРМ (L_{sum_corr}) для случайной последовательности установившихся режимов

В данном примере модель CatBoost обучалась на выборке 800 режимов схемы СБЭК, полученных в результате процедуры стохастического утяжеления схемы. Этот массив данных был разделен на обучающую (85%) и тестовую (15%) выборки. На вход модели подавались расчётные значения локальных L -индексов, как интегральная характеристика режима, (Рисунок 8) на выходе были оптимальные уставки доступных СКРМ, предварительно рассчитанные алгоритмом МП в результате моделирования офлайн.

Общая ошибка обучения составила минимальные 0.01%. Результаты тестирования модели CatBoost для предсказания уставок некоторых устройств СКРМ представлены в Таблице 2 и на Рисунке 9. Низкая среднеквадратичная ошибка $RMSE$ свидетельствует о том, что обученная модель хорошо попадает в пики. Коэффициент детерминации R^2 для всех случаев аппроксимации уставок СКРМ близок к 1, что соответствует модели данным, т.е. её адекватности в восстановленной множественной регрессии.

Таблица 2. Пример результатов тестирования модели CatBoost для предсказания уставок некоторых устройств СКРМ схемы СБЭК.

№	Узел	Обозначение	Ошибка $RMSE$, %	R-score
1	УШР ПС 500 кВ Усть-Кут	$\Delta Q_1^{СКРМ}$	1,56	0,9159
2	БСК ПС 220 кВ Лена	$\Delta Q_5^{СКРМ}$	3,04	0,967

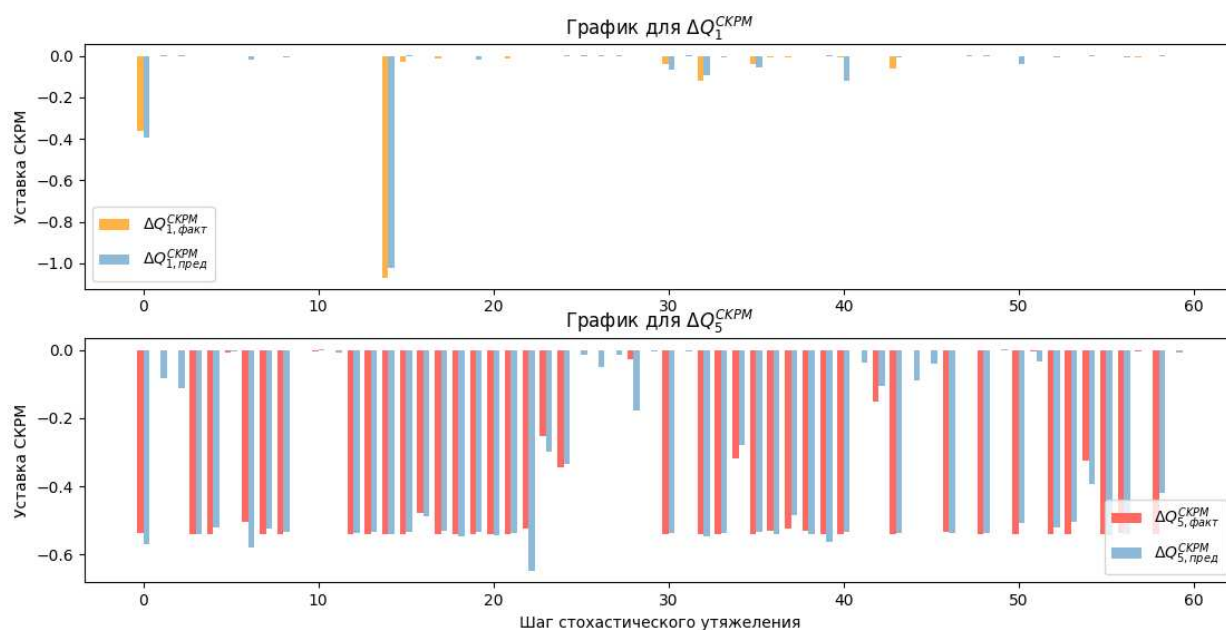


Рисунок 9 – Рассчитанные и предсказанные моделью CatBoost уставки СКРМ для тестовой последовательности установившихся режимов схемы СБЭК

Проведенные испытания указывают на высокое качество вторичного регулирования напряжения на примере схемы СБЭК с использованием разработанных моделей ИАРН. Предложенная МПА обеспечивает возможность строгой фиксации момента необходимости перехода от задачи вторичного регулирования к задаче противоаварийного управления, исключая тем самым человеческий фактор и обеспечивая непрерывность процессов оперативного и автоматического противоаварийного управления.

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. Применение быстрых решателей на базе алгоритмов эмпирической оптимизации и МО позволяет решить проблему большого времени расчёта при реализации централизованного управления дискретными устройствами СКРМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена вопросам обеспечения устойчивости по напряжению в ЭЭС за счет совершенствования систем ПАУ путем использования интеллектуальных средств, таких как мультиагентные системы, алгоритмы оптимизации и машинное обучение для предотвращения системных аварий.

1. Выявлено, что по мере развития ЕЭС России, роста электропотребления, а также внедрения объектов распределенной генерации задача сохранения устойчивости по напряжению становится все более актуальной.

2. Доказано, что существующие комплексы ПА имеют определенные недостатки и в ряде случаев могут быть недостаточно эффективны при выдаче управляющих воздействий для сохранения устойчивости по напряжению.

3. Обоснована необходимость совершенствования существующих систем ПАУ ЕЭС России в части сохранения устойчивости по напряжению.

4. В качестве мероприятий по повышению устойчивости предложено дополнить существующую систему ПАУ интеллектуальными комплексами нового поколения на основе мультиагентных систем, алгоритмов машинного обучения, эвристической оптимизации.

5. На основании анализа интеллектуальных схем регулирования напряжения разработаны алгоритмы и принципы реализации новой ИАРН, реализующей сочетание подходов децентрализованного и централизованного управления:

- Модель децентрализованной автоматики (МПА) реализована по принципу МАС и состоит из двух типов агентов: генерации и нагрузки. АГ вступают работу при приближении токов статоров или роторов генераторов в контролируемой подсистеме к околокритическим значениям, предотвращая аварийное отключение СГ от перегрузки и обеспечивает управление реактивной мощностью. АН МПА регулирует РПН трансформаторов на стороне потребителя и реализует ОН.

- Централизованная автоматика реализована на принципе ВЭ, агрегирует все доступные СКРМ ЭЭС в одном виртуальном центре-решателе. В данном случае решается задача оптимизации целевой функции индикатора устойчивости по напряжению – глобального L -индекса ЭЭС, сумму значений которого необходимо минимизировать. Для ускорения решения системы уравнений (минимизации целевой функции) использованы быстрые решатели на основе популяционного эмпирического алгоритма оптимизации (алгоритм мотылька и пламени) дополненные машинным обучением (алгоритм градиентного бустинга CatBoost).

6. Эффективность разработанной модели ИАРН была подтверждена на моделях реальной энергосистемы с использованием разработанного оригинального ПО в средах Python и Matlab, что показывает высокий уровень адаптивности комплекса ПАУ. Во всех экспериментах автоматика позволяет предотвратить раннее нарушение устойчивости по напряжению за счет эффективной координации резервов реактивной мощности в ЭЭС, что в ряде случаев позволяет избежать раннего отключения потребителей. Применение гибридного подхода позволяет достичь дополнительного повышения устойчивости по напряжению ещё на несколько этапов утяжеления режима.

7. Выполнен анализ возможности применения ИАРН в ЕЭС России и предложена концепция внедрения комплекса в существующую структуру ПАУ, которая сохраняет действующие иерархические принципы и позволяет реализовать комплекс, используя действующую инфраструктуру ПА.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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. Tomin, N. V. 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.

Публикации в других научных изданиях:

4. Реуцкий, И. С. Предотвращение неустойчивости по напряжению с использованием моделей искусственного интеллекта / И. С. Реуцкий, В. Г. Курбацкий, Н. В. Томин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. 69 Междунар. науч. семинара. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН. – 2018. – С. 364-373.

5. Реуцкий, И. С. Исследование режимной надежности «узких» мест энергосистемы Иркутской области на примере Бодайбинского энергорайона / И. С. Реуцкий, В. Г. Курбацкий, Н. В. Томин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. 68 Междунар. науч. семинара. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН. – 2017. – С. 413-420.

6. Реуцкий И. С. Исследование проблемы организации оперативно-диспетчерского управления при взаимодействии филиалов АО «СО ЕЭС» – РДУ и ЭССО // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: материалы юбилейной X Междунар. науч.- практ. конф. Иркутск: ИРНИТУ. – 2019. – С. 231-234.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112
Заказ № 4147, тираж 100 экз.