

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента

Булатова Юрия Николаевича

на диссертацию Реуцкого Ивана Сергеевича на тему

«Разработка модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения»

на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.4.3. Электроэнергетика

### **Актуальность выбранной темы**

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) характеризуются сложной структурой и большим количеством разнообразных элементов. При этом обеспечение устойчивости работы ЭЭС – одна из целей противоаварийного управления. В работе рассматривается устойчивость ЭЭС по напряжению.

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 ЭЭС 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. Для устранения 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. 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 управляющих воздействий.

Таким образом, тема диссертационной работы Реуцкого И.С., посвященная моделированию и исследованию работы интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения, является актуальной.

## Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объём работы составляет 151 страницу. Основной текст изложен на 118 страницах.

*Во введении* представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и решаемые задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные научные положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

*Первая глава* посвящена описанию проблемы устойчивости по напряжению и необходимости совершенствования существующих систем ПАУ ЭЭС России. Отмечено, что принципы существующей автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) не позволяют выполнять корректное противоаварийное управление в нерасчетных режимах и при ненормативных возмущениях. Недостатками локальной автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) являются большие выдержки времени реализации управляющих воздействий по причинам отстройки от коротких замыканий, дискретности регулирования средств компенсации реактивной мощности (СКРМ).

*Вторая глава* посвящена разработке архитектуры построения интеллектуальных систем регулирования напряжения в ЭЭС. Применение МАС для регулирования напряжения соответствует принципам адаптивного интеллектуального ПАУ. На основании выводов по второй главе выбраны принципы построения интеллектуального комплекса ПАУ, сочетающего децентрализованный и централизованный подходы к регулированию напряжения на основе МАС.

*Третья глава* посвящена детальной разработке интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности (ИАРН). Раскрыта 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 применения разработанной модели в структуре ПАУ ЭЭС России.

*В четвертой главе* представлены исследования действия предлагаемой

ИАРН на моделях энергосистемы Иркутской области при возникновении аварийных возмущений. В качестве возмущений были рассмотрены характерные нарушения режима, при которых возможно нарушение устойчивости по напряжению. Для рассмотренных сценариев ИАРН показала лучший результат по сравнению с вариантом моделирования без действия предлагаемой интеллектуальной автоматики.

*В заключении* представлены обобщающие выводы по диссертационной работе.

### **Новизна исследований и полученных результатов.**

1. Предложены новые подходы к совершенствованию существующей системы ПАУ ЕЭС 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, сочетающий 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 ЕЭС России, позволяющая применять интеллектуальные комплексы с сохранением существующих иерархических принципов на действующей инфраструктуре ПАУ.

### **Обоснованность и достоверность.**

Научные результаты, представленные в диссертации, обоснованы корректным применением 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.

Достоверность научных положений диссертационной работы определяется их корректностью с точки зрения математических моделей и

методов исследования электрических режимов, применением положений из теоретических основ устойчивости энергосистем.

### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности.**

Представленная диссертационная работа соответствует пунктам 8, 14 и 20 паспорта специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает основные результаты выполненных исследований.

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

К замечаниям по диссертационной работе и автореферату можно отнести следующее:

1. Пункт 4 положений, выносимых на защиту, корректнее назвать не метод настройки АРВ, а метод координированного регулирования уставок АРВ.

2. На стр.21 диссертации, в последнем абзаце, написано «...Проблемы с компенсацией реактивной мощности возникают из-за увеличения перетоков активной мощности, что приводит к повышенным потерям реактивной мощности». Требуется пояснения, как повышаются потери реактивной мощности при увеличении перетоков активной мощности?

3. На стр.52 диссертации в выражении (2.3) в нижней строке матрицы вместо  $Y_{LG}$  должно быть  $Y_{GL}$ .

4. С какой целью в диссертационной работе применялся модифицированный закон регулирования АРВ без учета каналов регулирования по частоте?

5. На стр. 78 не расшифрованы переменные  $n$  и  $T_s$  в выражениях (3.4).

6. Требуется пояснения, что относится к внешним факторам, влияющим на компенсацию реактивной мощности СКРМ, указанным в выражении (3.8) на стр.86 диссертации.

7. На рис.3.9 стр.91 диссертации фитнес-функция должна быть обозначена (3.14), а не (7).

8. Каково оптимальное значение суммы локальных L-индексов для рассматриваемых ЭЭС при использовании ИАРН?

9. В автореферате встречаются опечатки, пропуски слов и т.д. Например, на стр.7 в первых двух предложениях последнего абзаца имеются лишние запятые;

на стр.14 в первом предложении последнего абзаца после запятой пропущено слово «что» и др.

### **Направления дальнейших исследований и их применение**

Целесообразно дальнейшее развитие и совершенствование методов интеллектуального противоаварийного управления ЭЭС с целью повышения их устойчивости и живучести во всех возможных режимах. Необходимо проведение исследований по применению предлагаемой ИАРН на других сложных моделях ЭЭС, в том числе и на физических моделях.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при модернизации и интеллектуализации существующей системы ПАУ ЭЭС России.

### **Заключение о соответствии диссертационной работы критериям положения о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертационная работа Реуцкого Ивана Сергеевича на тему «Разработка модели интеллектуальной автоматики регулирования напряжения и реактивной мощности на основе мультиагентных систем и машинного обучения» актуальна, обладает элементами научной новизны, имеет теоретическое и практическое значения.

Общее количество работ соискателя по теме исследования – 6. Соискателем опубликовано 2 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации по специальности 2.4.3. Электроэнергетика, 1 статья проиндексирована в международных базах, 3 – в прочих рецензируемых научных изданиях. Публикации автора в полной мере отражают основные результаты исследований, которые были апробированы на научных конференциях.

Диссертация отвечает пп.9 - 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, и представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой предложена интеллектуальная автоматика регулирования напряжения и реактивной мощности для повышения устойчивости ЭЭС по напряжению и концепция ее внедрения в существующую структуру ПАУ ЭЭС России.

Таким образом, представленная научная работа соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Реуцкий Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Автор отзыва: кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Братский государственный университет"

Булатов Юрий Николаевич



14 АВГ 2025

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Братский государственный университет"  
665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко 40,  
тел. 8 (3953) 344-000, доб. 354, 355, e-mail: feia@brstu.ru