

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Чулюковой Маргариты Валерьевны

Разработка принципов и метода автоматического управления нагрузкой активных потребителей для обеспечения надежности электроснабжения,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. – Электроэнергетика

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время актуальность задачи обеспечения надежного электроснабжения потребителей в Российской Федерации и сложность ее решения определяются рядом факторов:

- высокая степень износа основных фондов генерирующих и сетевых компаний наряду с недостаточными темпами модернизации создает реальные риски нарушения устойчивости энергосистем. В этих условиях отключение нагрузки потребителей остается зачастую единственным способом сохранения устойчивости и живучести ЭЭС в аварийных ситуациях.
- активное развитие распределенных энергетических ресурсов (РЭР), включая распределенную генерацию, системы накопления электроэнергии, технологии управления спросом, формирует новую реальность – возникновение локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) и цифровых районов электрических сетей (ЦРЭС). При этом существующие способы и средства противоаварийного управления, как справедливо отмечает соискатель, исходно не были рассчитаны на интеграцию РЭР и управление реверсивными потоками мощности в распределительных электрических сетях, что требует пересмотра традиционных подходов.
- существующие противоречия между нормативными требованиями: с одной стороны – необходимость выполнения команд автоматики и Системного оператора по отключению нагрузки для сохранения устойчивости (САОН, АЧР, ГАО), с другой – запреты региональных штабов на отключение социально значимых объектов и объектов жизнеобеспечения, не имеющих юридически закреплённого особого статуса в ПУЭ, – формируют ситуацию, при которой электросетевые компании вынуждены искать компромиссные технические решения.
- особую остроту проблема приобретает для восточных регионов России – Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, где, несмотря на исторически избыточный характер энергосистем, в последние годы фиксируются локальные дефициты мощности и рекордные максимумы потребления (9815 МВт в ДФО в январе 2023 г.).

Диссертация направлена на решение этой важной и актуальной научно-технической задачи путем совершенствования управления послеаварийными режимами энергорайонов с РЭР за счет использования потенциала управляемости активных потребителей, что полностью соответствует приоритетным направлениям развития электроэнергетики, закреплённым в Энергетической стратегии РФ до 2035 года и Стратегии научно-технологического развития РФ.

2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (143 наименования) и пяти приложений. Общий объем работы – 174 страницы, включая 33 рисунка и 9 таблиц. Структура диссертации логична, полностью отражает последовательность решения поставленных задач.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология, положения, выносимые на защиту. Личный вклад автора конкретизирован по разделам работы.

Первая глава представляет собой глубокий аналитический обзор. Автор рассматривает концепцию ИЭС, трансформацию традиционных ЭЭС, зарубежный и отечественный опыт создания цифровых РЭС. Особого внимания заслуживает детальный анализ проблем функционирования энергосистем восточных регионов России – приведены конкретные данные о дефицитах мощности, пропускной способности сечений, исторических максимумах потребления. Важным результатом главы является выявление факторов снижения управляемости ЭЭС при интеграции РЭС, а также обоснование необходимости разработки новых подходов к послеаварийному управлению.

Вторая глава содержит описание авторской разработки автоматики (АУНАП). В ней представлены:

- структурная схема и принципы работы автоматики АУНАП;
- математическая модель, включающая целевую функцию (2.5) с весовыми коэффициентами (2.22) и систему ограничений (2.6–2.21, 2.26–2.42);
- алгоритм работы автоматики с разделением на три блока;
- методические положения согласования действий АУНАП с существующими устройствами ПА (рисунок 2.4);
- методический подход к повышению управляемости, базирующийся на анализе последствий воздействия негативных факторов.

Работоспособность алгоритма управления продемонстрирована на примере реальной аварии в г. Благовещенске (01.08.2019). Просчитаны четыре сценария формирования управляющих воздействий и убедительно представлены преимущества АУНАП.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям АУНАП на цифровых моделях ЭР. Автором разработаны четыре тестовые схемы ЭР с РЭС различного назначения (городского, промышленного, сельскохозяйственного, комбинированного) на базе реальных энергорайонов ДФО. Выполнено моделирование 11 сценариев аварийного выделенного участка на изолированную работу с учетом состава нагрузки, исходной схемно-режимной ситуации, вида возмущения. Количественный анализ УВ (таблица 3.4) показал, что АУНАП позволяет восстановить от 10% до 100% автоматически отключенной ответственной нагрузки. Особо следует отметить квазидинамическое моделирование аварии в г. Усурийске (2023 г.) с использованием контроллера, разработанного на базе библиотеки

Pandapower, что демонстрирует высокий уровень владения современными инструментами моделирования.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, соответствующие поставленным задачам.

Приложения содержат акты внедрения от АО «ДРСК» и АО «Фонд Форсайт», блок-схемы алгоритмов, пример расчета весовых коэффициентов, детальные сценарии УВ и описание переходных процессов.

3. НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. *Теоретически обоснован и разработан способ автоматического управления нагрузкой активных потребителей (АУНАП) в послеаварийных режимах для повышения надежности электроснабжения.* Принципиальная новизна способа состоит в том, что впервые управление спросом (demand response) рассматривается не как экономический инструмент оптимизации режимов или рыночный механизм, а как средство оперативного и автоматического послеаварийного восстановления электроснабжения ответственных потребителей. Предложенные решения по использованию дополнительной мощности, предоставляемой активными потребителями на договорной основе (снижение собственного потребления, ввод резервных ГУ, СНЭЭ), для автоматического перераспределения между отключенными ответственными объектами не имеет аналогов в известных отечественных и зарубежных исследованиях.
2. *Разработаны методические положения согласования действий существующих устройств ПА (АЧР, САОН, АОСН, АОПО, АЛАР, ДА) и предлагаемой автоматики АУНАП.* В отличие от существующих подходов, где согласование ограничивается выбором уставок и обеспечением селективности по времени, автор предлагает трехуровневую архитектуру (предупредительная, локализирующая, восстановительная подсистемы), в рамках которой АУНАП интегрируется на завершающем этапе ликвидации аварии. Особую ценность представляют предложения по блокировке действий ЧАПВ и АПВН при реализации УВ АУНАП для предотвращения повторного дефицита мощности
3. *Разработан методический подход к повышению управляемости ЭР с РЭР.* Новизна подхода заключается в переходе от традиционного рассмотрения управляемости как свойства системы к инструментальному представлению – формированию набора средств управляемости (регулируемые/нерегулируемые ГУ, СНЭЭ, управляемая нагрузка различных категорий) и алгоритмизированному выбору оптимальной их комбинации для минимизации последствий аварийного выделения. В отличие от работ, посвященных управляемости нормальных режимов (суточное регулирование, интеграция ВИЭ), автор решает задачу обеспечения управляемости в условиях ограниченного по времени дефицита мощности.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- корректным использованием апробированного математического аппарата (теория оптимизации, теория автоматического управления, методы имитационного моделирования);
- применением сертифицированных программных комплексов (RastrWin, RusTab, Pandarpower), верифицированных на реальных данных;
- согласованностью результатов численных экспериментов с данными, зафиксированными при реальных системных авариях (Благовещенск, 2019; Уссурийск, 2023);
- положительными результатами внедрения в производственную деятельность АО «ДРСК» (формирование ГВО в Приморской энергосистеме в отопительные сезоны 2023–2025 гг.) и АО «Фонд Форсайт» (разработка концепции управления нагрузками Международного аэропорта Камчатки, алгоритмы диспетчеризации РГ тепличных хозяйств).

Результаты диссертации прошли апробацию на 6 международных и всероссийских конференциях, включая 11th Symposium on Control of Power and Energy Systems (2022, онлайн), 95-й и 97-й семинары им. Ю.Н. Руденко. Опубликовано 13 печатных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 – в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии теоретических основ использования технологии управления спросом для решения задач оперативно-технологического управления. Автором предложена и обоснована концепция применения управляемой нагрузки активных потребителей в качестве полноценного источника системной надежности наряду с традиционными средствами противоаварийной автоматики. Математическая модель АУНАП, включающая механизм учета приоритетности потребителей через весовые коэффициенты и иерархическую систему критериев перехода между источниками дополнительной мощности, может рассматриваться как теоретическая база для создания нового класса автоматических устройств послеаварийного восстановления ЭР.

Практическая значимость подтверждена актами внедрения. Наиболее значимыми представляются следующие результаты:

1. Предложенный автором подход к определению категоричности потребителей и приоритетности ротации дополнительной мощности использован в АО «ДРСК» при разработке графиков временных отключений (ГВО) в Приморской энергосистеме в отопительные сезоны 2023–2024 и 2024–2025 гг. Это позволило исполнить решения регионального штаба по обеспечению безопасности электроснабжения и одновременно выполнить задания СО ЕЭС по объему отключаемой нагрузки.
2. В АО «Фонд Форсайт» использованы результаты диссертации при разработке концепции управления нагрузками Международного аэропорта Камчатки (г. Петропавловск-Камчатский), режимов работы микросети типового южного аэропорта, алгоритмов диспетчеризации РГ сельскохозяйственных предприятий (тепличные комплексы Поволжья и Ленинградской области). Это подтверждает масштабируемость предложенных решений.

3. *Разработанный программный инструмент в среде Python* для реализации алгоритмов АУНАП может быть интегрирован в существующие SCADA/EMS/DMS системы (в частности, в ПК «СК-11») и использован в практической деятельности оперативно-технологических служб электросетевых компаний.

Таким образом, диссертация имеет как теоретическую, так и практическую ценность.

5. ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

5.1. По содержанию и полноте исследования

1. В работе не представлены строгие условия запуска АУНАП, а лишь указано, что это происходит после завершения работы штатной РЗА. При этом следует иметь в виду, что штатные автоматика ввода резервных генерирующих мощностей, АЧР2, синхронизации разделенных активных частей ЭС также осуществляют восстановление нормального режима и имеют продолжительное время работы.
2. Недостаточно внимания уделено учету факта разницы мощностей нагрузки при их противоаварийном отключении и повторном включении при восстановлении нормального режима, обусловленной как изменением статического режима потребления энергии, так и возникающего переходного процесса при включении
3. Представленные на стр. 67 выражения 2.1-2.3 не являются полными условиями установления баланса мощности в ЭР, т.к. не содержат главного условия – номинальности частоты в ЭР. Без этого условия 2.1-2.3 выполняются в любом квазиустановившемся режиме согласно закону сохранения энергии. Отсутствие графиков частоты в последующих иллюстрациях процессов восстановления нормального режима также затрудняет их восприятие.
4. *Экономическая модель взаимодействия с активными потребителями* недостаточно раскрыта. В работе упоминается, что предоставление дополнительной мощности осуществляется «на договорных условиях» с получением «фиксированной платы» или «более высокой оплаты» для потребителей 2 и 1 категорий. Однако отсутствует оценка стоимости данной услуги, методика расчета тарифа/компенсации, не рассмотрены возможные источники финансирования. Для внедрения АУНАП в реальную практику это имеет критически важное значение.
5. В работе недостаточно внимания уделено строгой постановке задачи восстановления режима ЭР как классической задачи динамического программирования на базе принципа оптимальности Беллмана.
6. *Математическая модель АУНАП* (раздел 2.1.3) содержит ряд допущений, требующих пояснений. В частности, в ограничениях (2.13–2.14) мощность ГУ на базе ВИЭ учитывается как управляемый ресурс, что вступает в противоречие с утверждением автора (стр. 41) о стохастическом и труднопредсказуемом характере выработки ВИЭ. Следовало бы уточнить, идет ли речь о гарантированной мощности (например, в паре с СНЭЭ) или о прогнозной величине.
7. *Критерий оптимальности* (2.24) сформулирован как минимизация нескольких показателей одновременно без четкого указания приоритетов. Выражение « $\min \{g_{1_резерв_нс}\}, \min \{g_{2_резерв_нс}\}, \min \{g_{3_резерв_нс}\}, \min \{n_{3_аунап_нс}\}, \min \{n_{2_аунап_нс}\}, \min \{n_{1_аунап_нс}\}$ » представляет собой многокритериальную задачу, способ сведения которой к однокритериальной не раскрыт. Рекомендуется либо применить метод главного критерия, либо построить интегральный критерий.

8. В экспериментальной части следовало бы более детально исследовать влияние времени реакции АУНАП на устойчивость ЭР в островном режиме. Автор ограничивается констатацией факта, что АУНАП работает на восстановительном этапе «после завершения работы традиционной ПА», но не приводит количественных оценок допустимых задержек для различных типов ЭР и составов нагрузки.

5.2. По используемой терминологии, оформлению и представлению материала

9. На стр.61, раздел 2.1. неудачно использование понятия цели применительно к автоматике: «Основная цель предлагаемой автоматики». Автоматика лишена целеполагания, а лишь выполняет заданные функции в соответствии с ее назначением.
10. В работе встречаются *опечатки, смысловые и технические погрешности*:
- на стр. 2 в оглавлении: «трасформации» вместо «трансформации»;
 - на стр.40: непонятен смысл выражения «при изменении скорости возникновения частоты более чем 0.125 Гц»;
 - непонятен смысл выражения «повышение мониторинга режима потребления»;
 - на стр. 45: «которое что позволяет» вместо «которое позволяет» и др.
11. *Громоздкость некоторых обозначений*. Например, в формуле (2.5) используется более 10 различных индексов и надстрочных символов, что затрудняет восприятие. Целесообразно было бы ввести векторные обозначения.
12. В *приложении В* приведен расчет весового коэффициента по данным опроса 4 экспертов. Репрезентативность такой выборки вызывает вопросы. Следовало бы либо увеличить число экспертов, либо позиционировать данный расчет как демонстрационный пример, а не как окончательный результат.

5.3. Дискуссионные вопросы

13. Автор предлагает использовать нагрузку потребителей 1 категории для высвобождения дополнительной мощности только «при исчерпании всех вышеуказанных возможностей» (стр. 66). Однако согласно ПУЭ, перерыв электроснабжения потребителей 1 категории допускается лишь на время автоматического ввода резерва. Требуется обоснование того, как предлагаемый подход (снижение потребления, а не отключение) соотносится с требованиями ПУЭ и не приведет ли к конфликту с надзорными органами.
14. В работе не рассмотрены *вопросы кибербезопасности*. АУНАП предполагает постоянный обмен информацией между единым центром управления и активными потребителями, дистанционную передачу команд на исполнительные устройства. В условиях растущих киберугроз (упоминаемых автором на стр. 24) отсутствие анализа потенциальных уязвимостей и мер защиты является существенным пробелом.
15. *Не вполне ясен статус «активного потребителя»* в российской нормативной базе. Автор ссылается на Федеральный закон № 516-ФЗ и пилотный проект по управлению спросом, но не уточняет, каким образом предлагаемые договорные отношения вписываются в существующую модель розничного рынка электроэнергии (особенно в части перекрестного субсидирования, сбытовых надбавок и т.д.).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Представленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях.

Диссертация Чулюковой Маргариты Валерьевны является *завершенной научно-квалификационной работой*, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи – разработки принципов и способа автоматического управления нагрузкой активных потребителей для повышения надежности электроснабжения энергорайонов с распределенными энергетическими ресурсами в послеаварийных режимах.

Работа соответствует паспорту специальности 2.4.3. – Электроэнергетика (пункты 14, 16, 20). Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, апробированы на конференциях, внедрены в производственную деятельность энергокомпаний.

Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – *Чулюкова Маргарита Валерьевна* – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. – Электроэнергетика.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматизированные
электроэнергетические системы»

Александр Георгиевич Фишов
05 марта 2026 г.

Подпись Фишова А.Г. заверяю

Кот Ок КТМ



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Телефоны кафедры: (383)346-13-34, (383)346-19-42

Эл. почта кафедры: m.frolov@corp.nstu.ru

Веб-сайт кафедры: ciu.nstu.ru/kaf/aees

Тел. (моб) Фишова А.Г.: +7(913)937-01-16

Эл. почта Фишова А.Г.: agfishov@yandex.ru