

решаемым задачам на разных временных этапах управления ЭЭС и рассматриваются задачи оценки и оптимизация различных видов системной надёжности.

В настоящее время на определённом уровне решены многие задачи обеспечения системной надёжности ЭЭС, но зачастую для анализа современных ЭЭС этот уровень является недостаточным в силу различных причин. Для улучшения практики управления надёжностью ЭЭС требуется дальнейшее развитие теоретических подходов к решению существующих и новых задач, что и представлено в диссертационной работе.

Можно заключить, что диссертационная работа Крупенёва Д.С. является актуальной для современных условий развития электроэнергетики, а её результаты должны быть востребованы научным сообществом и инженерно-техническими работниками электроэнергетической отрасли.

2. Общая характеристика и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений.

В диссертации представлены методы решения задач по анализу и обеспечению системной надёжности электроэнергетических систем на всех временных этапах управления ими.

В *первой* главе диссертации рассмотрены концептуальные положения учета системной надёжности при проектировании развития, планирования работы и оперативного управления современных ЭЭС. Сформулированы задачи обеспечения системной надёжности для каждого этапа управления. На основании этих задач предложена декомпозиция системной надёжности в направлении добавления к балансовой и режимной надёжностям плановой надёжности, методический аппарат оценки которой должен учитывать специфику функционирования ЭЭС на период планирования их работы, что представляет несомненным методическим улучшением существующей

практики учета требований и критериев системной надёжности на этапе планирования режимов и балансов ЭЭС.

Во *второй* главе рассмотрены вопросы оценки балансовой надёжности ЭЭС. На основании анализа существующей методики оценки балансовой надёжности основанной на методе Монте-Карло, обозначены направления её усовершенствования для учета влияющих факторов на функционирование ЭЭС и повышения эффективности принимаемых решений на основании показателей балансовой надёжности. Предложена формализация процесса формирования расчетных моделей ЭЭС для оценки балансовой надёжности. Выполнена содержательная постановка задачи и впервые сделана математическая постановка задачи кластеризации ЭЭС на зоны надёжности. Для решения задачи кластеризации ЭЭС на зоны надёжности разработаны три метода: на основании контролируемых сечений, на основании экспресс анализа балансовой надёжности и на основании метода Лейдена (метод поиска сообществ в графах). Сформулированы рекомендации по применению разработанных методов. В качестве ещё одного направления усовершенствования методики оценки балансовой надёжности ЭЭС рассмотрена задача по анализу и адаптации квазислучайных последовательностей чисел при формировании расчетных состояний ЭЭС. Сделаны выводы о существенном улучшении вычислительной эффективности методики при применении последовательностей Соболя. В главе рассмотрены вопросы моделирования надёжности поставки первичных энергоресурсов на электростанции при оценке балансовой надёжности, что особенно важно при моделировании солнечных и ветровых электростанций. Разработан соответствующий подход к моделированию на основании формирования рядов распределения активности первичных энергоресурсов. Уделено значительное внимание и вопросам усовершенствования математической модели минимизации дефицита мощности, а также предложена адаптация методов машинного обучения (искусственного

интеллекта) для решения этой задачи, результаты которой повысили эффективность всей методики оценки.

В *третьей* главе предложены методы обоснования и выбора резервирования генерирующей и сетевой частей ЭЭС при проектировании их развития, повышающие эффективность принимаемых решений. Одним из критериев определения резервов в ЭЭС являются нормативные значения показателей балансовой надёжности. Предложена комплексная методика определения нормативных показателей балансовой надёжности и представлены их оценки для современных условий функционирования электроэнергетики России. Для непосредственного определения уровня резервирования в ЭЭС разработаны три метода, характеризующихся различным набором исходных данных и глубиной рассмотрения вариантов ввода резервного оборудования. Первый метод основан на итерационном процессе взаимодействия модели оценки балансовой надёжности и модели оптимизации основной структуры ЭЭС. Второй метод предполагает использование двойственных оценок генерирующей и сетевой частей ЭЭС, получаемых в процессе оценки балансовой надёжности, для отбора вариантов дискретного ввода энергетического оборудования ЭЭС. Третий метод основан на адаптации алгоритма марковской цепи Монте-Карло. Используя третий метод, для которого требуется максимальный набор исходных данных, можно получить наилучший (оптимальный) вариант решения поставленной задачи.

В *четвёртой* главе рассматривается новый вид системной надёжности – плановая надёжность ЭЭС. Введение этого вида системной надёжности и проработка методических основ оценки этого вида системной надёжности позволяет на качественно новом уровне перейти к решению задач, возникающих на этапе планирования режимов и балансов ЭЭС. В главе представлены содержательная и математическая постановки задачи оценки плановой надёжности ЭЭС, а также методика её решения, основанная на

применении последовательного метода Монте-Карло. Также в рамках характеристики методики оценки плановой надёжности автором отмечаются особенности, которые присущи сугубо плановой надёжности по сравнению с балансовой и режимной. В аспекте приложения плановой надёжности ЭЭС рассмотрены две задачи планирования работы: задача формирования оптимальных графиков плановых ремонтов ЭЭС и задача определения холостых сбросов гидроэлектростанций в ЭЭС с большой долей ГЭС в период многоводья. Предлагаемые подходы к решению этих задач существенно улучшают соответствующую практику и приводят к лучшим решениям.

Пятая глава посвящена методам оценки режимной (оперативной) надёжности ЭЭС. В главе представлена содержательная постановка этой задачи, заключающаяся в поиске «узких» мест ЭЭС для краткосрочных режимов с целью дальнейшей реализации управляющих воздействий для минимизации негативных последствий в ЭЭС. Представлено описание разработанной автором методики оценки режимной надёжности на основании метода Монте-Карло, которая существенно выигрывает по сравнению с существующими методиками на основе детерминированных критериев в глубине анализа возможных случайных состояний ЭЭС. Основное внимание в развитии методики оценки режимной надёжности уделено вычислительному блоку анализа послеаварийных установившихся режимов ЭЭС. Для этого предложен комплекс интегральных и дифференциальных моделей ЭЭС в форме баланса мощности в векторном виде. Необходимо отметить, что получена векторная форма дифференциальных моделей ЭЭС первого и второго порядков. Дифференциальные модели получены для отражения линейных и нелинейных зависимостей изменения выходных параметров ЭЭС (напряжений) от изменения входных параметров ЭЭС (отказы генераторов, колебания нагрузки, отказы линий электропередачи). Далее в разделе эти

дифференциальные модели применены для линейной и квадратичной аппроксимации искомых параметров ЭЭС. Результаты вычислений на основании предлагаемого подхода и сравнение этих результатов с параметрами, получаемыми с использованием итерационного метода Ньютона-Рафсона для анализа режимов ЭЭС показали необходимую для подобных расчетов согласованность, при том что скорость вычисления при применении предлагаемых дифференциальных моделей на порядок выше по сравнению с итерационным методом, что является критическим параметром для анализа режимной надёжности ЭЭС.

В *шестой* главе представлены основные принципы, которые должны быть заложены при разработке цифровых платформ для управления системной надёжностью ЭЭС. В главе предложена возможная архитектура таких платформ и представлено описание реализации модуля оценки балансовой надёжности ЭЭС с дальнейшим применением этого модуля к анализу балансовой надёжности Единой энергосистемы (ЕЭС) России. Показаны принципы деления ЕЭС России на зоны надёжности и представлены показатели балансовой надёжности, на основании которых предложены мероприятия оптимизации уровня резервирования генерирующей мощности в ЕЭС России. Полученные в работе результаты показывают значительный масштаб решаемых задач на основании предлагаемых разработок и представляют существенный вклад в решение задач обеспечения системной надёжности электроэнергетики России.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Расширены методические основы понятия «системная надёжность ЭЭС» путём введение нового вида – «плановая надёжность ЭЭС», предназначенной для решения задач, возникающих при планировании режимов и балансов ЭЭС.

2. Усовершенствована методика оценки балансовой надёжности ЭЭС на основании метода Монте-Карло в направлении повышения адекватности применяемых математических моделей ЭЭС, а также повышена её вычислительная эффективность путем применения генераторов квазислучайных чисел и методов машинного обучения (искусственного интеллекта).

3. Разработаны методы оптимизации балансовой надёжности для решения задачи выбора резервирования генерирующей и сетевой частей при перспективном проектировании развития ЭЭС.

4. Разработана методика оценки плановой надёжности ЭЭС, основанная на последовательном методе Монте-Карло, в основу которой положено моделирование набора случайных процессов функционирования энергосистемы на период планирования работы ЭЭС.

5. Разработаны методы решения задач планирования работы ЭЭС для формирования оптимальных графиков ремонта энергетического оборудования и исследования долгосрочных режимов взаимосвязанной работы водохозяйственных и энергетических систем.

6. Разработана методика оценки режимной надёжности ЭЭС на основании метода Монте-Карло и методов оценки на основании критерия $N-i$ с использованием матриц чувствительности установившихся режимов ЭЭС.

7. Разработаны интегральные и дифференциальные модели установившихся режимов ЭЭС в векторно-матричном виде в форме балансов мощности в декартовой и полярной системах координат.

8. Разработаны математические модели определения физически реализуемого решения систем нелинейных уравнений установившихся режимов ЭЭС в форме баланса мощности.

9. Разработаны принципы создания цифровых платформ для управления системной надёжностью ЭЭС на основе интеграции вычислительных средств анализа и синтеза всех её видов.

Достигнутые и представленные выше результаты в своей совокупности объединены в едином научном направлении и нацелены на усовершенствование фундаментальных основ исследования системной надёжности ЭЭС в плане расширения методического аппарата анализа и синтеза различных её видов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Применение предлагаемых в диссертационной работе методов оценки и оптимизации балансовой надёжности при разработке планов развития реальных энергосистем позволит повысить экономическую эффективность принятых решений по формированию резервов генерирующих мощностей и структуры электрических сетей ЭЭС. Результаты этого направления диссертационного исследования использованы при разработке «Методических указаний по проектированию развития энергосистем» и получили высокую оценку Правительства России в виде Премией Правительства России для молодых ученых за 2023 год.

2. Методические разработки в направлении оценки плановой надёжности ЭЭС, а также получаемые показатели плановой надёжности позволяют перейти к решению задач, возникающих в процессе планирования работы ЭЭС, на более качественный уровень по сравнению с существующим, а также повысить экономическую эффективность реализации тех или иных решений с учетом соблюдения требований по обеспечению системной надёжности. Введение понятия и научного направления «плановая надёжность» обобщает набор задач, возникающих при планировании работы ЭЭС, а также расширяет понятие «системная надёжность», и совершенно оправдано выносится на защиту.

3. Разработанные методы оценки режимной надёжности ЭЭС позволяют в практической деятельности реализовывать системы управления с целью минимизации рисков развития аварийных ситуаций в виде «помощника диспетчера».

4. Практическая реализация цифровых платформ управления надёжностью ЭЭС позволит консолидировать информацию о показателях надёжности реальных объектов ЭЭС и гармонично применять её при решении задач на всех временных уровнях управления.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа Крупенёва Д.С. соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3. – Электроэнергетика: 9. Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид; 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; 15. Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике; 18. Разработка методов анализа структурной, балансовой и функциональной надёжности электроэнергетических систем и систем электроснабжения, мини- и микрогрид; 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, надёжностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обусловлена корректным применением научных методов, включая методы

математического моделирования, машинного обучения и обширной практикой представления результатов на международных и всероссийских конференциях и в высокорейтинговых научных журналах.

Вопросы и замечания к работе

При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. Учитываются ли результаты диагностики и оценки технического состояния энергетического оборудования при планировании ремонтов?
2. Учитываются ли риски оценки затрат при перспективном проектировании развития энергосистем?
3. Что нужно сделать в правовом поле, чтобы показатели плановой надёжности стали рабочими, как и показатели для других видов системной надёжности?
4. Эквивалентны ли соотношения определения комплексной мощности с сопряжением комплексного значения токов и с сопряжением комплексного значения напряжения?
5. Какова целесообразность применения линеаризованных матриц чувствительности для анализа нелинейных задач?
6. При выводе в ремонт линий электропередачи как учитывается наведенное напряжение?
7. Есть ли возможность учитывать линии постоянного тока в расчетах балансовой надёжности ЭЭС?

Данные вопросы не являются принципиальными, не снижают научную ценность и полезность работы, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Заключение

Диссертационная работа Крупенёва Дмитрия Сергеевича «Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности электроэнергетических систем», представленная на соискание ученой

степени доктора технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, в которой решена важная научная проблема по разработке новых и усовершенствованию существующих методов оценки и оптимизации разных видов системной надёжности ЭЭС. Применение этих разработок в практической деятельности энергетических компаний повысит экономическую эффективность управления ЭЭС, надёжность электроснабжения потребителей и уровень энергетической безопасности. Работа обладает внутренним единством, содержит оригинальные научные положения. Часть теоретических результатов уже получила практическую реализацию и использована при разработке «Методических указаний по проектированию развития энергосистем» (Приказ Минэнерго России от 06.12.2022 N 1286), в ряде прикладных работ по анализу уровня балансовой надёжности ЭЭС и установившихся режимов ЭЭС, а также в образовательном процессе.

Диссертация оформлена грамотным языком, изложение материала логичное и последовательное, выводы по главам и заключение диссертации отражают научные результаты, представленные в диссертации. Несмотря на объём (более 450 страниц), работа представляет собой связное научное исследование. Содержание автореферата соответствует содержанию самой диссертации и отражает основные защищаемые научные положения.

Полученные автором научные результаты опубликованы в 50 научных статьях, в том числе в 21 статье в журналах, рекомендованных ВАК по научной специальности 2.4.3. – Электроэнергетика, получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Получены научные результаты имеют широкую апробацию на множестве научных конференций различного уровня.

Диссертационная работа Крупенёва Дмитрия Сергеевича «Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности

электроэнергетических систем» соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а также паспорту специальности 2.4.3. – Электроэнергетика, а её автор Крупенёв Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.3. – Электроэнергетика

Отзыв на диссертацию Крупенёва Д.С. «Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности электроэнергетических систем» подготовлен главным технологом, доктором технических наук, доцентом Рябченко Владимиром Николаевичем, обсуждён и одобрен на заседании научно-технического совета АО «Россети Научно-технический центр», протокол № 1 от «16» февраля 2026 г.

Начальник департамента НТС и
научно-технической информации-
Научный руководитель
АО «Россети Научно - технический центр»,
д.т.н., профессор


Д.И. Панфилов

Главный технолог Управления
перспективного развития сетей
АО «Россети Научно-технический центр»,
д.т.н., доцент


В.Н. Рябченко



Начальник Управления
кадров
АО «Рос



Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество "Россети Научно-технический центр"
Почтовый адрес: 115201, Россия, Москва, Каширское ш., д. 22 корп. 3
Тел.: +7 (495) 727-19-09, адрес электронной почты: info@ntc-power.ru,
адрес официального сайта в сети "Интернет": <https://ntc-power.ru/>