

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора КУЛИКОВА Александра Леонидовича на диссертационную работу КРУПЕНЁВА Дмитрия Сергеевича на тему **«Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности электроэнергетических систем»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.3. – Электроэнергетика

1. Актуальность темы диссертации. Современный уровень развития потребителей электроэнергии формирует высокие требования к надежности их электроснабжения. Развитие технологий генерации, передачи и распределения электроэнергии, внедрение интеллектуальных технологий управления электроэнергетическими системами (ЭЭС), с учетом цифровой трансформации систем управления ЭЭС, требуют повышенного внимания к задачам обеспечения надежности ЭЭС на всех этапах управления. В то же время в современных ЭЭС имеются проблемы, критично влияющие на надежность ее элементов и приводящие к повышенной аварийности. В первую очередь это повсеместное старение и низкое качество выполнение ремонтов энергетического оборудования.

В основе цифровой трансформации ЭЭС лежит непрерывный контроль состояния объектов и обработка больших данных с помощью современных математических методов и алгоритмов, в том числе искусственного интеллекта. Ключевую роль здесь также играет оптимизация. Практическая реализация этих принципов достигается путем создания и внедрения новых программно-аппаратных средств на основе цифровых платформ. В итоге их реализации становится возможным не только повысить эффективность работы ЭЭС, но и оптимизировать режимы, управлять их развитием и строить единые информационные модели.

Учитывая изложенное, тема диссертационной работы является актуальной, соответствует современным тенденциям развития и

совершенствования направлений обеспечения надежности энергосистем, а полученные в работе результаты имеют высокую теоретическую и научно-практическую значимость для повышения надежности и эффективности ЭЭС.

2. Анализ содержания диссертации с отражением научной новизны результатов. Структура диссертации определена логикой исследования и включает введение, шесть глав, заключение, библиографический список, содержащий 306 источников, и 7 приложений. Общий объем текста работы составляет 470 страниц.

Во *введении* раскрыта актуальность темы, сформулированы цель, задачи и методы исследования, приведен анализ разработанности рассматриваемой проблемы. Изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации и реализации результатов.

В *первой* главе диссертации основное внимание акцентировано на характеристике проблемы обеспечения системной надежности ЭЭС. Отмечено, что в многообразии задач обеспечения надежности на разных этапах управления ЭЭС плохо формализованными являются задачи анализа системной надежности при планировании работы ЭЭС. Для устранения этого пробела предложено расширение методической основы понятия «системная надежность ЭЭС» в направлении развития специализированного вида системной надежности, названного «плановая надежность ЭЭС», при оценке которой появляется возможность отразить все критические детали и процессы функционирования ЭЭС, возникающие при планировании режимов и балансов.

Во *второй* главе представлено описание результатов по направлению совершенствования методики оценки балансовой надежности ЭЭС на основании метода Монте-Карло, что в конечном итоге привело к повышению адекватности применяемых математических моделей ЭЭС, а также повышению вычислительной эффективности всей методики. В частности, была рассмотрена задача кластеризации ЭЭС на зоны надежности и

разработаны соответствующие методы. Формализованное решение этой задачи позволило повысить корректность представления ЭЭС при перспективном проектировании их развития, повысить информативность получаемых при оценке показателей и обоснованность принимаемых решений. В частности, была рассмотрена задача эффективности различных генераторов псевдо- и квазислучайных чисел при формировании расчетных состояний ЭЭС, сделаны теоретические исследования получаемых последовательностей и проведены многочисленные экспериментальные тесты. В итоге было выяснено что самым эффективным является генератор квазислучайных последовательностей чисел – последовательности Соболя.

Для повышения адекватности отражения режимов работы ЭЭС сделана новая постановка задачи минимизации дефицита мощности с учетом сетевых коэффициентов ЭЭС и потерь мощности в квадратичной форме. Для улучшения вычислительных характеристик методики оценки балансовой надежности при решении задачи минимизации дефицита мощности адаптировано применение методов машинного обучения (искусственного интеллекта).

В *третьей* главе представлены результаты по разработке методов оптимизации балансовой надежности для решения задачи выбора резервирования генерирующей и сетевой частей при перспективном проектировании развития ЭЭС. В частности, были разработаны три метода (алгоритма) для выбора резервов. Сделан анализ области применимости каждого метода и ограничений, с которыми решается поставленная задача. Важной подзадачей при выборе резервов в ЭЭС является задача обоснования нормативных значений показателей балансовой надежности. В работе представлена комплексная методика такого выбора, предназначенная для использования при анализе современных ЭЭС.

В *четвертой* главе рассмотрены вопросы методического обеспечения исследования плановой надежности ЭЭС. Представлена характеристика разработанной методики оценки плановой надежности, основанной на последовательном методе Монте-Карло, в основу которой положено

моделирование набора случайных процессов функционирования энергосистемы на период планирования работы ЭЭС. Отмечены основные особенности методики оценки плановой надежности в отличие от методики оценки балансовой надежности. Представлена краткая характеристика задач, решаемых при планировании работы на основании показателей плановой надежности ЭЭС. В качестве приложения использования показателей плановой надежности ЭЭС рассмотрено решение задач: определения оптимальных графиков ремонтов энергетического оборудования и исследования долгосрочных режимов взаимосвязанной работы водохозяйственных и энергетических систем. Результаты решения этих задач показали, что использование показателей плановой надежности учитывают специфику решения на период планирования работы ЭЭС и обоснованность принимаемых решений.

Пятая глава посвящена представлению результатов по совершенствованию процесса оценки режимной надежности ЭЭС, что является крайне важным при оперативном управлении ЭЭС. В рамках исследований на основании метода Монте-Карло и использовании матриц чувствительности установившихся режимов ЭЭС разработаны оригинальные методы оценки режимной надежности.

В основной части главы представлены результаты по разработке интегральных и дифференциальных моделей установившихся режимов ЭЭС в векторно-матричном виде в форме балансов мощности в декартовой и полярной системах координат. Значимость имеют разработанные дифференциальные модели первого и второго порядка в векторно-матричном виде. Такое представление для большинства приведенных дифференциальных моделей является новым. Также в рамках исследований рассмотрена задача определения единственного решения при решении систем нелинейных уравнений установившихся режимов ЭЭС. Разработаны соответствующие математические модели в виде оптимизационной задачи минимизации потерь мощности с рядом ограничений для определения

физически реализуемого решения систем нелинейных уравнений установившихся режимов ЭЭС в форме баланса мощности.

В *шестой* главе рассмотрена возможность и принципы создания цифровых платформ управления системной надежностью ЭЭС. На базе таких платформ могут быть объединены методические наработки, представленные в диссертационной работе. На примере разработки программно-аппаратного комплекса оценки балансовой надежности ЭЭС показана практическая реализация предлагаемой цифровой платформы, что в итоге дало возможность анализировать большие схемы ЭЭС на подобие Единой энергосистемы России.

3. Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность результатов, полученных автором в процессе научных исследований основывается на применении фундаментальных основ теории надежности и законов электротехники. Проведенные исследования и полученные на их основе выводы обоснованы применением известных аналитических и численных методов, корректным использованием математического аппарата, методов и процедур математических преобразований.

Результаты моделирования согласуются с аналогичными результатами, полученными с использованием альтернативных подходов к моделированию ЭЭС и оценки их надежности. Автором достигнуто достаточно хорошее совпадение результатов моделирования ЭЭС при применении дифференциальных моделей установившихся режимов ЭЭС первого и второго порядков с результатами испытаний на промышленном программно-аппаратном комплексе.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- их представительным научным рецензированием при публикациях в рейтинговых научных изданиях;
- широким обсуждением при выступлениях с научными докладами на ряде представительных международных и всероссийских научно-технических конференциях.

4. Практическое значение диссертационного исследования. Работа имеет практическую направленность. Она представляет несомненный интерес для специалистов, занимающихся решением задач обеспечения надежности ЭЭС на всех этапах их управления. Ряд теоретических исследований автора доведены до уровня прикладных методик и конкретных практических рекомендаций, что подтверждается внедрением их в практику проектирования при разработке Методических указаний по проектированию развития энергосистем.

Результаты диссертационного исследования использовались для поддержки принятия проектных решений и для решения задач НИР отечественными компаниями ООО «РТСофт – Смарт Грид» и АО «Росатом Возобновляемая энергия». Также результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

5. Публикации по теме диссертационных исследований. Материалы диссертационного исследования Крупенёва Д.С. достаточно полно отражены в 50 научных работах, 21 из них опубликованы в рецензируемых журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук по научной специальности 2.4.3. – Электроэнергетика, также работы автора опубликованы в журналах и сборниках, рецензируемых Scopus, Web of Science и RSCI. Получено 5 авторских свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Представленная информация позволяет сделать вывод о выполнении требований к публикационной активности по докторским диссертациям.

6. На защиту выносятся следующие основные замечания и вопросы по диссертационной работе:

6.1. Целью диссертации является: «разработка математических моделей и методов анализа и синтеза системной надежности, направленных на повышение обоснованности принимаемых решений на разных этапах управления надежностью ЭЭС».

В связи с заявленной целью, автору предлагается указать какие показатели обоснованности принимаемых решений на разных этапах управления надежностью ЭЭС были выбраны и использованы, а также насколько повышена обоснованность принимаемых решений на основе применения предложенных математических моделей, методов анализа и синтеза системной надежности, изложенных в диссертации?

6.2. Вопрос по терминологии плановой надежности (глава 4). В соответствии с принятой терминологией систем энергетики (2007 г.) системная надежность ЭЭС включает в себя балансовую и режимную составляющие. В общепринятой классификации задач надежности систем энергетики (справочник по надежности 2004 г., том 1) выделяются оценочные и оптимизационные задачи. Балансовая и режимная надежность (БН и РН) используются для решения только оценочных задач надежности ЭЭС. Это четко прослеживается и в их определениях. Ключевым в них является удовлетворение требований по обеспечению потребителей (БН) или сохранения режима (РН) при заданных значениях параметров системы или режима с учетом различного рода ограничений.

Приведенные в работе задачи, отнесенные автором к плановой надежности, в соответствии с упомянутой классификацией задач надежности, отнесены к классу оптимизационных задач надежности. Они так или иначе сопряжены с решением оценочных задач надежности и состоят в обосновании тех или иных изменений заданных значений параметров системы или режима.

Из вышесказанного вытекают резонные вопросы, связанные с включением плановой надежности в качестве составляющей системной надежности:

6.2.1. Согласен ли автор с вышеизложенным, что рассматриваемые в работе задачи, отнесенные им к плановой надежности, в соответствии с классификацией задач надежности (справочник по надежности 2004 г.), входят в состав оптимизационных задач?

6.2.2. Если да, то на каком основании, опять же в связи с вышесказанным, плановая надежность может стать составной частью системной надежности, которая используется в оценочных задачах надежности? И какими показателями надежности она может характеризоваться, если ее цель состоит в изменении тех или иных параметров ЭЭС (мощность генерации, пропускная способность связей, вращающийся резерв и т.п.) и доведения их до оптимальных в соответствии с наперед заданными нормативными показателями, посредством многократного применения оценочных моделей балансовой или режимной надежности?

6.2.3. Если нет, то задача плановой надежности в соответствии с имеющейся классификацией и включением ее в категорию системной надежности должна быть отнесена только к классу оценочных задач надежности. Как автор это представляет и каким образом можно, решая оценочную задачу определить графики плановых ремонтов, провести учет выработки электроэнергии на ГЭС, ВИЭ и другие рассматриваемые в 4-й главе задачи оптимизации?

6.3. На основе показателей плановой надежности предлагается методика формирования графиков ремонтов электроэнергетического оборудования.

Во-первых, Технической Политикой ПАО «Россети» (протокол от 28.12.2024 № 673) п. 4.1.4 принято, что перспективным направлением является «переход от системы управления производственными активами по планово-предупредительному виду организации ремонта к организации ремонта по фактическому техническому состоянию». Для этого уже применяются системы непрерывной диагностики, а также мониторинга электроэнергетического оборудования, а в дальнейшем их доля будет существенно увеличена.

Будут ли в таких условиях особо актуальны вопросы формирования графиков ремонтов оборудования в условиях ограничений?

Во-вторых, существенно возросла и будет возрастать доля электроэнергетического оборудования, практически не требующая текущего,

среднего и капитального ремонта. К такому оборудованию можно, например, отнести: современные коммутационные аппараты (вакуумные, элегазовые выключатели), устройства цифровой релейной защиты и другие.

Как учесть возрастающую долю такого оборудования при расчетах показателей плановой надежности?

В-третьих, автор отмечает (п. 4.1 диссертации, стр. 205), что планирование работы (режимов и балансов) ЭЭС проводится, как правило, на срок не превышающий одного года, для решения некоторых задач этот срок может быть увеличен до 2 лет. Однако, проблемы формирования оптимальных графиков плановых ремонтов энергетического оборудования электроэнергетических систем (п.4.3 диссертации), как правило, возникают при проведении массовых ремонтов сетевого оборудования при подготовке к осенне-зимнему периоду, так как в зимнее время все сетевое оборудование должно быть введено в работу.

В таких условиях может быть целесообразно сократить периоды для расчетов плановой надежности и приблизить их к режимной?

6.4. В главе 2 предлагаются критерии (п. 2.2.2, стр. 67) и методы (п. 2.2.3, стр. 68) кластеризации электроэнергетических систем на зоны надежности. А в главе 6 (п. 6.5.1, стр. 385) выполнена кластеризация Единой энергосистемы России на зоны надежности.

На рис 6.6 (стр. 387) представлена карта-схема ЭЭС России с выделенными зонами надежности. Зоны надежности покрывают не всю территорию России.

Каким образом в районах, не входящих в зоны надежности, предлагается реализовать управление надежностью?

Границы зон надежности не сочетаются (не совпадают) с границами ответственности подразделений Системного оператора, а также с границами балансовой ответственности собственников электроэнергетического оборудования, прежде всего сетевых организаций.

Каким образом в таких условиях предлагается организовать систему управления надежностью?

6.5. В п. 4.4.3 диссертации (стр. 238) производится определение вероятностей холостых сбросов гидроэлектростанций в Объединенной энергосистеме Сибири. Были определены вероятности холостых сбросов ГЭС в условиях избыточной мощности в энергосистеме при учете основных технологических ограничений.

Однако, холостые сбросы могут быть вызваны и другими факторами, например, экологическими. В частности, на сработку воды (или холостой сброс) влияет необходимость восстановления рыбных ресурсов и поддержание уровней воды в период нереста.

6.6. Следует уточнить, например, п. 4.3.2 (стр. 226) при рассмотрении методики формирования графиков ремонтов генерирующего оборудования на основании непосредственного анализа показателей плановой надежности электроэнергетических систем, каким образом учитывались особенности электрических станций и особенности их работы?

Например, структура и особенности режимов атомных электрических станций?

6.7. В главе 6 раскрываются принципы создания цифровых платформ управления системной надежностью электроэнергетических систем.

На рис. 6.1 (стр. 368 диссертации) приведена укрупненная структура цифровой платформы управления системной надежностью ЭЭС, в составе которой используется «цифровая тень ЭЭС».

Считаю не корректным использование такого понятия. С одной стороны, исходя из содержательной трактовки автора (стр. 369) цифровая тень ЭЭС представляет собой специализированную базу данных. А с другой стороны, «цифровая тень» (цифровой след, электронный след) — это, как правило, информация о человеке, которая сохраняется в сети.

Из текста диссертации и автореферата не понятно с какими системами управления электроэнергетики и каких собственников должна быть сопряжена цифровая платформа?

6.8. Замечания редакционного характера:

– использование не общепринятых сокращений: например, стр. 91, ПВК – программно-вычислительный комплекс. Общепринятое сокращение ПАК – программно-аппаратный комплекс (Постановление Правительства РФ № 2461 от 28 декабря 2022 г.);

– некорректные математические выражения: стр. 126, выражение (2.61), проводится минимизация по y , x , z , однако в выражении (2.61) отсутствуют x и z ;

– стр. 184–186 нестандартные математические обозначения для переменных располагаемой мощности, нагрузки и других;

– повторы текста, описки и другие.

Приведенные вопросы и замечания не изменяют положительную оценку диссертационной работы.

7. Заключение по диссертационной работе

7.1. Диссертационная работа Крупенёва Дмитрия Сергеевича «Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности электроэнергетических систем» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема, заключающаяся в улучшении методической основы анализа и обеспечения системной надёжности ЭЭС, что достигается за счет исследования и практического внедрения современных математических методов и информационных средств для решения задач управления надёжностью.

7.2 Содержание диссертации соответствует ее названию и паспорту специальности 2.4.3. - Электроэнергетика.

7.3. Автореферат достаточно подробно отражает основные положения и содержание диссертации.

7.4. На основании изложенного считаю, что диссертационная работа «Методические основы комплексного анализа и обеспечения надёжности электроэнергетических систем» удовлетворяет требованиям ВАК РФ в части п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (с дополнениями и изменениями), а ее автор Крупенёв Дмитрий Сергеевич заслуживает

присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.3. - Электроэнергетика.

Профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Доктор технических наук, профессор



Куликов Александр Леонидович

inventor61@mail.ru

(831)432-91-85

Сведения о месте работы:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Адрес: Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24

Телефон: +7(831)436-63-07

e-mail: nntu@nntu.ru, web-сайт: <http://www.nntu.ru>

Подпись Куликова Александра Леонидовича заверяю

*Ученый секретарь
Ученого совета*

07.04.2020

