

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 02.02.2024 № 1

О присуждении Малафееву Алексею Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Повышение эффективности и надёжности систем электроснабжения промышленных предприятий с собственной генерацией» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 30 октября 2023 г. (протокол №5) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Малафеев Алексей Вячеславович, 06.10.1973 года рождения. Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук «Оптимизация эксплуатационных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии» по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы защитил 25.02.2004 г. в диссертационном совете К 212.111.02, созданном на базе Магнитогорского го-

сударственного технического университета им. Г.И. Носова. С ноября 2004 г. по настоящее время работает в должности доцента кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Диссертация выполнена на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Корнилов Геннадий Петрович, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра электроснабжения промышленных предприятий, профессор.

Официальные оппоненты:

1. Герасименко Алексей Алексеевич – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», кафедра электроэнергетики, профессор;

2. Куликов Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», профессор;

3. Черепанов Вячеслав Васильевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», кафедра электроснабжения, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, в своём положительном отзыве, подписанном Цыруком Сергеем Александровичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, и Янченко Сергеем Александровичем, доктором технических

наук, профессором кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, указала, что диссертация Малафеева Алексея Вячеславовича «Повышение эффективности и надёжности систем электроснабжения промышленных предприятий с собственной генерацией» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с п.п. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней» от 24.09.2013 г. №842, представляет собой решение актуальной проблемы планирования эксплуатационных режимов систем промышленного электроснабжения с заводскими электростанциями и управления ими, а её автор, Малафеев Алексей Вячеславович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью, большим количеством публикаций в авторитетных рецензируемых научных изданиях, выполненных и внедрённых научных исследований в области моделирования, анализа и оптимизации режимов систем электроснабжения. Профессор, д-р техн. наук А.А. Герасименко является признанным специалистом в области оптимальной компенсации реактивной мощности и вероятностно-статистического моделирования режимных параметров систем распределения электрической энергии и учёта многорежимности при анализе потерь электроэнергии. Профессор, д-р техн. наук А.Л. Куликов – крупный специалист в области анализа ущербов промышленных предприятий при отказах в системах электроснабжения, измерения и обработки режимной информации цифровой релейной защитой и автоматикой и повышения качества электроэнергии в заводских электрических сетях. Является заместителем научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС Россети», действительный член Академии электротехнических наук РФ, лауреат премии Правительства Российской Федерации в 2020 г. за разработку и внедрение инновационных технологий и оборудования для управления и повышения надёжности цифровых электрических сетей. Областью научных интересов профессора, д-ра техн. наук Черепанова В.В. является моделирование электрических нагрузок и качество

электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий, выбор их оптимальных параметров, расчёт и анализ потерь электроэнергии при её передаче и распределении, технико-экономические расчёты и энергосбережение в электрических сетях. Национальный исследовательский университет «МЭИ» много лет является одним из ведущих вузов, занимающихся совершенствованием методов анализа и планирования режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения промышленных предприятий; функционируют научные направления «Энерго- и ресурсосбережение в энергетике, промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве», «Повышение экономичности, надежности и устойчивости функционирования электроэнергетических систем», «Повышение эффективности эксплуатации электротехнического оборудования и систем» и ряд других.

Соискатель имеет 263 опубликованные работы, из них 55 по теме диссертации, из них 23 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 7 публикаций, входящих в системы цитирования Scopus и Web of Science, по теме диссертации опубликовано 2 научных монографии и получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и баз данных. Общий объём публикаций составляет 58,4 печатных листа. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя в опубликованных работах заключается в: разработке методов и алгоритмов расчёта и оптимизации режимов системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными источниками электроэнергии на основе принципов динамического программирования при задании генерирующих агрегатов кусочно-линейными экономико-математическими моделями; разработке способа учёта неопределённых свойств электрических нагрузок и характеристик генерирующего оборудования на основе теории нечётких множеств; разработке способа оперативного расчёта потерь активной мощности и методики выбора экономически целесообразных положений РПН силовых трансформаторов в центрах питания разомкнутых заводских сетей; разработке метода оценки структурной надёжности СЭС и коли-

чественной оценки производственных рисков; в анализе технического и экономического эффекта при планировании и реализации эксплуатационных режимов СЭС за счёт применения разработанных методов, способов и методик.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Малафеев, А.В. Подходы к управлению режимами крупной промышленной системы электроснабжения с учётом её системных свойств / А.В. Малафеев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2021. – №4. – С. 42-57.

2. Малафеев, А.В. Краткосрочное планирование режима промышленной электростанции с учётом суточных колебаний оптовых цен на электроэнергию и неопределённости исходной информации / А.В. Малафеев, В.С. Щербакова // Электрические станции. – 2021. – №8(1081). – С. 21-27.

3. Malafeev, A.V. Optimal automatic voltage control with APCC means in electrical power networks of industrial companies / A.V. Malafeev, Yu.S. Imanova // Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Russia, Sochi. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743019.

4. Малафеев, А.В. Выявление долевого вклада источников питания системы электроснабжения в потери электроэнергии и их стоимость / А.В. Малафеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т.25. – №3. – С. 24-40.

5. Малафеев, А.В. Алгоритм расчета структурной надежности систем электроснабжения крупных промышленных предприятий на основе метода последовательного эквивалентирования / А.В. Малафеев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – №4. – С. 62-72.

6. Малафеев, А.В. Оптимизация нагрузки электростанций промышленного предприятия с разнородным составом генерирующих источников / А.В. Малафеев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – №1. – С. 76-80.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов, все положительные:

**1. Отзыв ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва** (д.т.н., доцент К.В. Суслов): 1) В системе ограничений при постановке задачи оптимизации не учтены ограничения, обусловленные режимами, предельными по статической апериодической устойчивости; 2) Не рассмотрены вопросы использования генераторов собственных электростанций для регулирования напряжения в системе электроснабжения; 3) В главе, посвященной снижению потерь электроэнергии, ничего не говорится об использовании ПБВ цеховых трансформаторов, к примеру, при долгосрочном планировании.

**2. Отзыв ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск** (д.т.н., профессор А.В. Крюков): 1) В работе не рассмотрены режимные задачи, возникающие при отделении промышленного энергорайона от энергосистемы при снижении частоты, асинхронном ходе и других подобных режимных ситуациях; 2) При планировании оптимальных режимов не учитываются возможности АСУ ТП собственных электростанций.

**3. Отзыв ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино** (д.т.н., профессор Б.В. Папков, к.т.н., доцент В.Л. Осокин): 1) В п.9 раздела, где «...сформулированы и решены следующие задачи...», отмечено, что будет «законченная концепция управления режимами СЭС на основе критериев экономичности и надёжности». Однако дальнейший текст автореферата не позволяет определить эту законченную концепцию; 2) На стр. 13 отмечается, что «Сформулированы системные свойства промышленной системы электроснабжения, обуславливающие подходы к управлению её режимами», в частности, «...необходимость учёта иерархической структуры...». На наш взгляд, эти свойства, в большинстве своём, известны. Поэтому следовало бы выделить из них новые, наиболее характерные для рассматриваемых объектов; 3) В выражении (1) введена функция ущерба от снижения надёжности своим, вероятно, математическим ожиданием. Однако

непонятно, о каком ущербе здесь идёт речь: ущерб ЭЭС, СЭС, потребителя? Каковы основные составляющие ущерба? При краткосрочном планировании использование математического ожидания ущерба вряд ли приведёт к оптимальному результату. В ограничения (2–10) ущерб вообще не включён; 4) На стр. 31 отмечается, что учитывается «ущерб, равный стоимости недоотпуска продукции». Но известно, сумма неучтённых при этом составляющих может быть того же порядка; 5) Об оптимальном распределении нагрузок между параллельно работающими электростанциями известно из работ В.М. Горнштейна (1949 г.), а с учётом надёжности – В.В. Михайлова (1973 г.). В этой связи желательно было бы дать количественную оценку предлагаемой методики; 6) При «...коэффициенте корреляции между объёмом производства и нагрузкой от 0,75 до 0,85» (стр. 20), и при относительно большой неопределённости исходной информации, наверное, проще было использовать функциональную зависимость, а не методы нечёткой логики; 7) Вызывает некоторое сомнение рекомендуемая (стр. 27) частота переключений РПН (4 в сутки), так как надёжность механической части и коммутационный ресурс РПН ограничены.

**4. Отзыв ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань** (д.т.н., доцент Е.И. Грачёва): 1) Почему в автореферате не представлен исходный график нагрузки (рисунок 8)? 2) Имеются ли ограничения параметров систем электроснабжения предприятий, для которых предлагается рассматриваемый в диссертации подход по повышению эффективности и надёжности их работы?

**5. Отзыв ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», г. Оренбург** (д.т.н., профессор А.П. Козловцев, к.т.н., доцент В.А. Пушко): 1) Не рассмотрены вопросы формирования планов выработки электроэнергии собственными электростанциями предприятий на месяц, квартал и другие периоды, причём основное внимание автора направлено на оптимизацию суточного режима; 2) В автореферате не учитывается деятельность рынка мощности, но представлен оптовый рынок электроэнергии; 3) Взаимосвязь ограничений по располагаемой электрической мощности и теплофикаци-

онной нагрузки ТЭЦ рассмотрена в упрощённом виде.

**6. Отзыв ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва** (к.э.н., доцент Н.Л. Кетоева): 1) Из автореферата не ясно, требуется ли учёт статических характеристик нагрузки при оптимизации; 2) Требуется пояснения фраза на стр. 25 «использование потребительских компенсирующих устройств и синхронных двигателей для регулирования напряжения неэффективно», так как из автореферата не ясно, на каких уровнях напряжения данное утверждение справедливо; 3) Не приведены рекомендации по использованию систем ПБВ, которые также распространены в промышленных сетях.

**7. Отзыв Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь», г. Череповец** (главный электрик Д.А. Цветков): 1) Отсутствуют практические рекомендации по использованию регулирующих устройств турбоагрегатов и котлов заводских ТЭЦ (ТЭЦ-ПВС) при отклонении режима от оптимального; 2) Нет оценки затрат на производство реактивной мощности и её передачу; 3) Не учтено влияние регулирования напряжения трансформаторами понизительных подстанций 35-220/(3-10) кВ на режим сетей 35-220 кВ, в том числе потери мощности и напряжения.

**8. Отзыв АО «Ашинский металлургический завод», г. Аша** (и.о. главного энергетика А.В. Петинцев): 1) В работе недостаточное внимание уделено особенностям функционирования энергохозяйства средних и малых промышленных предприятий; 2) При формировании ограничений в задаче оптимизации режима нет конкретных рекомендаций по учёту фактического износа котлоагрегатов и турбин заводской ТЭЦ и вызванного этим изменения регулировочного диапазона станции; 3) Судя по автореферату, не рассмотрена возможность использования крупных синхронных двигателей для регулирования напряжения.

**9. Отзыв ПО «Магнитогорские электрические сети» филиала ПАО «Россети Урал» – «Челябэнерго», г. Магнитогорск** (и.о. главного инженера А.С. Кудряшов): 1) Автор подробно рассматривает случай, когда предприятие является собственником электростанций, но ничего не говорится о случае, ко-



гда электрические сети и объекты малой генерации принадлежат разным собственникам (например, малые электростанции принадлежат одной или нескольким генерирующим компаниям, электрические сети – какой-либо территориальной сетевой организации); 2) Не рассматриваются вопросы выбора рациональной конфигурации разомкнутых сетей (напряжением 35 кВ и ниже); 3) При определении степени компенсации стоимости услуг по передаче электроэнергии от присоединённых к сетям предприятия потребителей-субабонентов учитывается только стоимость потерь электроэнергии. Однако стоимость услуг по передаче включает в себя, наряду с этим, ставку на содержание электрических сетей.

**10. Отзыв ООО «РТСофт – Смарт Грид»** (ведущий специалист, к.т.н. Ф.С. Непша): 1) В задаче регулирования напряжения рассмотрен учёт статических характеристик нагрузки, но нет рекомендаций по коэффициентам СХН для конкретного состава электроприёмников; 2) При определении потерь активной мощности не рассматриваются составляющие, обусловленные работой специфических нагрузок (нелинейных, резкопеременных и т.д.), что было бы желательно, поскольку в работе рассмотрено в качестве примера предприятие чёрной металлургии.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** новые научно обоснованные:

– концепция управления эксплуатационными режимами систем электроснабжения (СЭС) крупных промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии, заключающаяся в управлении их эксплуатационными режимами на основе сочетания методов расчёта и оптимизации режимов СЭС и способов учёта неопределённости и риска при моделировании параметров режимов и оборудования и при принятии решений;

– технические решения на основе разработанной концепции, направленные на повышение экономичности и надёжности сложных промышленных СЭС, такие, как комплексы научно обоснованных мероприятий по снижению

суммарных затрат на выработку и приобретение электроэнергии, по снижению потерь электроэнергии и мощности, по повышению надёжности заводских электрических сетей;

**предложены:**

– метод оптимизации установившихся режимов СЭС, учитывающий негладкие свойства экономико-математических моделей электростанций промышленных предприятий,

– метод математического представления электрических нагрузок производственных цехов при помощи характеристик нечётких интервалов;

– метод расчёта параметров режима, отличающийся лучшей сходимостью в условиях преобладания разомкнутых сетей над замкнутыми;

– метод расчёта вклада потребителей и источников в стоимость потерь электроэнергии;

– метод оценки надёжности при малом объеме статистической информации;

– методика определения экономически целесообразного уровня напряжения на шинах главных понизительных подстанций;

– методика принятия решений по реконструкции систем электроснабжения с учётом неопределённости нагрузок реконструируемых объектов;

**доказана** эффективность предложенных методов и способов повышения экономичности и надёжности систем электроснабжения промышленных предприятий с собственной генерацией путём математического моделирования и внедрения в действующей системе электроснабжения;

**введены** новые рекомендации по планированию эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения и управлению ими, заключающиеся в учёте негладких свойств экономико-математических моделей генерирующих агрегатов собственных источников электроэнергии и нечёткие свойства характеристик оборудования и режимных параметров.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** логически и путём математического моделирования возмож-

ность повышения экономической эффективности и надёжности системы электроснабжения за счёт применения разработанной концепции управления эксплуатационными режимами промышленных систем электроснабжения с собственной генерацией;

**применительно к проблематике диссертации эффективно использованы** методы имитационного моделирования и обработки данных, полученных в условиях действующего производства;

**изложена** идея управления эксплуатационными режимами СЭС промышленных предприятий с собственной генерацией и принятия решений с целью повышения эффективности и надёжности на основе сочетания методов расчёта и оптимизации режимов СЭС и способов учёта неопределённости и риска при моделировании параметров режимов и оборудования;

**раскрыты:** особенности свойств систем электроснабжения крупных энергоёмких промышленных предприятий как больших производственных систем, заключающиеся в малом количестве существенно различающихся уровней иерархии в сравнении с электроэнергетическими системами; сочетании причинно-следственных связей формирования режимных параметров системы электроснабжения с частично неопределёнными свойствами ряда факторов, влияющих на режим; структурной сложности, обусловленной не только схемами СЭС, но и разнородными характеристиками оборудования собственных электростанций;

**изучено** влияние технико-экономических характеристик собственных электростанций промышленных предприятий на планирование оптимального потокораспределения в системе электроснабжения;

**проведена модернизация** оперативно-технологического управления энергохозяйством промышленного предприятия с собственными генерирующими источниками за счёт разработки схемы принятия решений при оперативном управлении и планировании режимов системы электроснабжения с учётом фактора надёжности диспетчерскими службами энергохозяйства во взаимодействии с подразделениями планирования производственных показателей.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены:** программное обеспечение расчёта и оптимизации режимов промышленных систем электроснабжения с собственными электростанциями и комплексы научно обоснованных мероприятий по повышению экономичности и надёжности СЭС в различных схемно-режимных ситуациях;

**определена:** технико-экономическая эффективность использования разработанных методов, способов и методик в условиях действующего крупного промышленного предприятия с энергохозяйством сложной структуры; экономический эффект оценивается в 23 млн руб.;

**создана** методика принятия решений по реконструкции систем электроснабжения на основе критериев теории игр, позволяющая учесть неопределённость нагрузок реконструируемых объектов и возможных аварийных ситуаций;

**представлена** оценка ожидаемого экономического эффекта за счёт:

– внедрения режимов рациональной загрузки генераторов собственных электростанций с учётом внутрисуточных колебаний оптовых цен на электроэнергию в рамках краткосрочного планирования и изменения цен на энергоресурсы в долгосрочной перспективе;

– реализации методики суточного регулирования напряжения при помощи РПН (устройств переключения ответвлений под нагрузкой) трансформаторов главных понизительных подстанций в сетях напряжением 3–10 кВ;

– снижения ущерба от нарушения электроснабжения основных технологических потребителей и повышения степени компенсации затрат на передачу электроэнергии по сетям СЭС со стороны потребителей-субабонентов.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

корректное использование математического аппарата и апробированных математических пакетов обработки данных; соответствие результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов при правомерных исходных положениях и обоснованных допущениях с использованием реальных техниче-

ских характеристик производственного оборудования;

**теория** базируется на известных положениях теории электрических цепей, дискретной оптимизации, теории нечётких множеств, теории игр, теории надёжности технических систем;

**идея** базируется на использовании ряда известных апробированных методов и алгоритмов расчёта и оптимизации режимов электроэнергетических систем и адаптации их с учётом принципиальных отличий и особенностей систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии, а также на разработке собственных методов и алгоритмов, основанных на известных теоретических положениях;

**выполнена** оценка вычислительной эффективности разработанных методов и алгоритмов; в частности, метода расчёта установившихся режимов на основе принципов последовательного эквивалентирования, обеспечивающего достаточно хорошую сходимость итерационного процесса, и метода расчёта оптимального распределения мощностей в СЭС с собственными электростанциями, обеспечивающего допустимую погрешность;

**установлено** соответствие результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, а также данных, полученных на реальной системе электроснабжения конкретного промышленного предприятия;

**использованы** методы имитационного моделирования систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии при помощи программного комплекса, разработанного при непосредственном участии соискателя.

Личный вклад соискателя состоит в: формулировании проблемы и идеи её решения; постановке целей и задач исследования; разработке способа математического представления экономико-математических моделей генерирующего оборудования промышленных электростанций в виде кусочно-линейных зависимостей топливных затрат от нагрузки; разработке метода оптимизации распределения активных мощностей в системе электроснабжения промышленного предприятия с собственными неблочными электростанциями по критерию ми-

нимума затрат на выработку и распределение электроэнергии в условиях неопределённости исходных данных; разработке метода математического представления электрических нагрузок на основе нечётких интервалов; разработке метода расчёта эксплуатационных режимов систем электроснабжения на основе принципов последовательного эквивалентирования; разработке методики выбора положений РПН силовых трансформаторов подстанций систем электроснабжения по критериям минимума потерь мощности в сетях низшего напряжения и минимума износа переключателей; разработке метода оценки вклада собственных и сторонних потребителей и источников питания системы электроснабжения в потокораспределение, потери электроэнергии и их стоимость; разработке метода расчёта надёжности систем электроснабжения с собственными источниками электроэнергии на основе совместной оценки структурной надёжности и производственных рисков.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

**В отзыве ведущей организации:**

1. В системе ограничений (2.3)–(2.11) не учтены максимально допустимые перетоки по условиям статической устойчивости по линиям связи с энергосистемой.

2. В работе ничего не говорится об оптимизации режимов в условиях функционирования на предприятиях не только паротурбинных, но и газотурбинных и парогазовых установок.

3. Не поясняется необходимость использования для линий электропередачи взамен традиционных П-образных схем замещения Т-образных схем замещения (рис. 4.3).

4. Ничего не говорится об оптимальном распределении мощности, принимаемой из энергосистемы, между линиями связи.

5. В работе не оценивается влияние участия котлоагрегатов заводских электростанций в суточном регулировании активной мощности на их эксплуатационный ресурс.

6. В гл. 3 желательно было бы выполнить оценку предлагаемого метода математического представления нагрузок не только для конкретных цехов, но и для некоторых типовых сочетаний электроприемников.

7. Не ясно, каким образом при оценке показателей надёжности может учитываться работа сетевой автоматики, обеспечивающей повышение надёжности (АВР, АПВ и т.д.).

8. Поскольку в диссертации рассматривается, в числе прочего, и годовой горизонт планирования режимов, желательно было бы рассмотреть вопрос выбора оптимальных положений переключателей ПБВ цеховых трансформаторов 10–3/6 кВ и 10/0,4 кВ.

**В отзыве официального оппонента Герасименко А.А.:**

1. Центральная целевая задача диссертации, имеющая проблемный характер, сформулирована как задача нелинейного математического программирования. Однако алгоритмические и вычислительные аспекты её реализации даны в малой мере, не рассмотрены обобщения результатов решения задачи после её декомпозиции, не представлены условия конкретного программирования и результаты тестирования программного продукта, в том числе, на мощных системах электроснабжения подобного вида.

2. Потери электроэнергии входят в состав целевой функции рассматриваемой оптимизационной задачи. Не представлен переход от потерь мощности к потерям электроэнергии, и в целом, не обоснован учёт многорежимности на основе расчёта одного установившегося режима. Отмеченное не позволяет утверждать о надёжности вычисления и учёта (с требуемой точностью и достаточной достоверностью) потерь электроэнергии в рассматриваемой задаче оптимизации.

3. Не вполне понятно, для чего в табл. 3.4 для годового горизонта планирования рассматривается график нагрузки с интервалом осреднения 1 месяц. В этих условиях, как правило, рассматривают суточные графики для характерных периодов года.

4. Местные электростанции на промышленных предприятиях, формирую-

щих систему рассредоточенной (распределённой) генерации, могут участвовать в регулировании напряжения, однако этот вопрос соискатель не рассматривает, ограничивая системный эффект реализации данной задачи.

5. В п.5.2.2 не ясно, чем вызван при определении рационального уровня напряжения на ненаблюдаемых распределительных подстанциях напряжением 3–10 кВ выбор именно критерия Лапласа из всего множества критериев теории игр.

6. В п.6.6 говорится, что граничный ущерб желательно определять экспертным путём, однако нет никаких рекомендаций по применению методов экспертных оценок.

**В отзыве официального оппонента Куликова А.Л.:**

1. Существующее формирование тарифов на электроэнергию направлено на достижение общего социально-экономического эффекта. Исходя из этого обеспечивается оптимизация режимов электроэнергетических систем и соответствующая минимизация затрат потребителей на электроэнергию. Однако загрузка собственных электростанций крупных промышленных предприятий (в том числе градообразующих), участвующих в формировании региональных тарифов в основном отвечает экономическим интересам таких потребителей.

Каким образом, на Ваш взгляд, должен при этом достигаться общий социальный и экономический эффект? Справедлива ли эта идея на таких региональных рынках?

2. В главе 2 диссертации при постановке задачи оптимизации в форме выражения (2.1) одной из составляющих является математическое ожидание ущерба. В последующем автор переходит к детерминированной форме (выражение (2.2)) в условиях ограничений, предполагающей исключение математического ожидания ущерба.

Однако каким образом автор видит варианты решения оптимизационной задачи в соответствии с выражением (2.1)?

3. В главе 5 исследуется возможность снижения затрат, связанных с потерями мощности в системе промышленного электроснабжения, путём выбора



оптимальных положений устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов (РПН) в сетях низшего напряжения с учётом износа переключателей. Используется понятие «жизненного цикла актива» и обосновывается, что целесообразность эксплуатации РПН в режиме суточного регулирования будет определяться количеством переключений.

Однако автором предлагается упрощенный подход, не учитывающий ряд важных обстоятельств. Во-первых РПН является одним из наиболее повреждаемых элементов оборудования (обычно при переключениях), а риски от его повреждения необходимо учитывать в стоимости актива. Во-вторых автор не учитывает в стоимости актива необходимость проведения планово-предупредительных ремонтов, частота которых зависит от количества переключений РПН. Соответственно при частых переключениях возрастает объём работ и длительность вывода оборудования из работы.

4. В шестой главе диссертации при определении ущерба не выделяется составляющая, обусловленная фактом нарушения питания, и составляющая, обусловленная продолжительностью перерыва питания.

5. В п.6.2 не вполне понятно, включает ли в себя вероятность безотказной работы вероятность отказа вторичных устройств (в частности, неисправность или неверный выбор уставок релейной защиты)?

6. При оценке производственных рисков (п.6.6) нет каких-либо рекомендаций по выбору количества элементов терм-множества лингвистических значений ущерба.

7. В п.6.7.2 при выборе стратегии реконструкции, судя по всему, не учтены капиталовложения, только ущерб. В диссертации это никак не обосновывается.

8. Основные редакционные замечания:

– в блок-схеме принятия решений при планировании режимов с учётом показателей надёжности (рис. 6.12) присутствует блок «Расчёт эквивалентных показателей надёжности узлов связи», однако далее в работе он никак не конкретизируется;

- не пояснены введённые сокращения на рисунке 2 автореферата;
- сокращение «А.с.» в списке литературы не соответствует «Свидетельствам о регистрации программ для ЭВМ».

**В отзыве официального оппонента Черепанова В.В.:**

1. Следует подробнее обосновать необходимость создания методики выбора оптимальных положений РПН трансформаторов понизительных подстанций, поскольку по сути данная задача сводится к определению оптимального уровня напряжения и может быть решена другими средствами более глобально.

2. Из диссертации не ясно, как повлиял разработанный метод оптимизации потокораспределения в системе электроснабжения с несколькими источниками электроэнергии и узлами примыкания к электроэнергетической системе на точность полученных результатов.

3. Требуется дополнительно обосновать практическую значимость метода расчёта надёжности системы электроснабжения с собственными электростанциями и оценки ущерба от её снижения с учётом технологических взаимосвязей между промышленными потребителями, учитывая сложность использования разработанных моделей неподготовленными инженерами и проектировщиками.

4. Не понятно, каким образом при моделировании учитывается тепловая нагрузка теплоэлектростанций, которая меняется в течение года и может существенно ограничивать регулировочный диапазон турбогенераторов электростанций промышленных потребителей.

5. Из четвёртой главы не ясно, был ли проведён соискателем анализ факторов, влияющих на сходимость метода расчёта установившихся режимов системы электроснабжения на основе принципов последовательного эквивалентирования.

**В ходе заседания диссертационного совета:**

1. О какой именно эффективности идёт речь в названии диссертации? В чём она проявляется? Насколько корректен здесь этот термин? Поскольку ра-

бота ориентирована на промышленные предприятия, оценивалось ли влияние на себестоимость продукции как показатель эффективности?

2. По каким именно показателям оценивалось повышение надёжности? Количество отказов, время простоев или по каким-то другим? Каким образом учитывались собственные источники электроэнергии?

3. На слайде с системой ограничений показана графически взаимосвязь только между двумя из приведенных ограничений. По какой причине не показана такая же взаимосвязь между другими ограничениями? Между ограничениями и критерием (или критериями) оптимальности?

4. В первой составляющей целевого функционала присутствует двойной интеграл. С какой целью? В целевом функционале последняя составляющая характеризует ущерб. Не нужен ли здесь двойной интеграл? Какие при этом должны вводиться переменные интегрирования?

5. У Вас ущерб измеряется в баллах. Это не слишком наглядно. Например, 8 баллов – это хорошо или плохо? С чем это связано?

6. Какие термы вводились для лингвистических переменных при нечётком представлении экономико-математических моделей генерирующего оборудования?

7. Насколько применимы результаты работы для небольших предприятий? Или их можно использовать только на крупных предприятиях?

8. На слайде с методом расчёта структурной надёжности показано два фрагмента схемы – где какой-либо из узлов схемы электроснабжения присутствует, затем – где этого узла нет. Что тем самым проиллюстрировано?

9. Некоторые предприятия в последнее время начинают развивать собственные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, в частности, солнечную генерацию. Насколько разработанные методы и методики будут применимы в этих условиях?

10. Насколько рассмотренные в работе схема промышленного энергоузла, схема оперативно-диспетчерского управления в его границах, схема финансовых потоков применимы к другим промышленным предприятиям с собственной генерацией?

Соискатель Малафеев А.В. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию:

В теме диссертации речь идёт об экономической эффективности. Информацию по калькулированию себестоимости продукции получить чрезвычайно сложно, это конфиденциальные данные. Однако снижение затрат на выработку, приобретение и передачу электроэнергии при неизменном объёме производства однозначно говорит о снижении доли энергозатрат в себестоимости продукции. Повышение надёжности оценивалось по вероятности безотказной работы и среднему времени восстановления. По ним определялись значения ущерба от нарушения электроснабжения технологических цехов и от нарушения выдачи дешёвой электроэнергии собственными электростанциями. Графически на основе диаграммы мощности синхронного генератора показана только взаимосвязь между ограничениями по активной и реактивной мощности, имеющая функциональный характер. Между другими ограничениями, а также между критерием оптимальности и ограничениями явных функциональных взаимосвязей нет. Двойной интеграл в первой составляющей целевого функционала обусловлен необходимостью интегрирования затрат на выработку как по количеству генераторов, так и по числу интервалов периода планирования (например, для краткосрочного планирования это, как правило, интервалы в один час). В составляющей, характеризующей ущерб, в ряде задач нужен двойной интеграл с интегрированием по времени и множеству вариантов схемы. Для лингвистической переменной ущерба в работе принята шкала в баллах для краткости записи. Для лучшего понимания баллы могут быть замены терминами «средний», «большой», «наибольший» и т.д. В приведённом примере 10 баллов – наибольший ущерб. При нечётком представлении экономико-математических моделей генерирующего оборудования лингвистические переменные не применялись, использовались только значения функции принадлежности.

Результаты работы ориентированы на крупные предприятия со сложной конфигурацией электрических сетей и неоднородной структурой генерации.

Чем проще энергохозяйство, тем меньший эффект будет наблюдаться, он в большей степени зависит от сложности объекта, чем от суммарной нагрузки. Например, на небольшом предприятии чёрной металлургии, ТЭЦ (ЦЭС, ЦЭС-ПВС и т.д.) которого за длительный период многократно подвергалась реконструкции и расширению, её оборудование может быть чрезвычайно разнородным, в связи с чем может быть получен определённый эффект от перераспределения нагрузки. Метод расчёта структурной надёжности, основанный на подходах последовательного эквивалентирования, проиллюстрирован основной процедурой метода – процедурой исключения узла. В результате многократного выполнения этой процедуры определяются эквивалентные значения вероятности безотказной работы и среднего времени отключения, по которым далее может быть рассчитан ущерб от нарушения электроснабжения или от нарушения выдачи мощности. Эквивалентные параметры в разработанном программном обеспечении определяются для выбранной точки схемы и характеризуют надёжность электроснабжения объекта или надёжность схемы выдачи мощности какого-либо из собственных источников. Солнечная генерация и многие другие возобновляемые источники отличаются тем, что их выработка плохо поддаётся прогнозированию и управлению. Для повышения их управляемости необходима разработка и внедрение экономических систем накопления энергии большой мощности. Таким образом, результаты работы, касающиеся оптимизации распределения мощностей между собственными электростанциями, могут быть применимы только при сравнительно малой доле ВИЭ в собственной генерации. Схема промышленного энергоузла, оперативно-диспетчерского управления и финансовых потоков в его границах не являются полностью общепринятыми для всех без исключения предприятий, но на них показаны все необходимые элементы – несколько собственных электростанций различных типов, сети нескольких классов напряжений, сторонние потребители, сменный персонал цеха электрических сетей и подстанций и др. Могут быть некоторые особенности, связанные с технологическим процессом предприятия, особенностями расчётов с сетевыми организациями и т.д. Таким образом, их можно считать достаточно универсальными.

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, полностью соответствующую критериям «Положения о присуждении учёных степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям.

На заседании 2 февраля 2024 г. диссертационный совет принял решение за решение научной проблемы повышения экономичности и надёжности сложных систем электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии путём совершенствования планирования эксплуатационных режимов и управления ими, имеющей важное хозяйственное значение, присудить Малафееву Алексею Вячеславовичу учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них – 10 докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 11, против присуждения учёной степени – нет, не проголосовали – нет.

Председательствовавший  Мугалимов Риф Гарифович

Учёный секретарь  Одинцов Константин Эдуардович  
диссертационного совета

2 февраля 2024 г.