

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора Герасименко Алексея Алексеевича
на диссертацию Малафеева Алексея Вячеславовича
**«Повышение эффективности и надёжности систем электроснабжения
промышленных предприятий с собственной генерацией»**
на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

1. Актуальность темы

Одним из результатов реформирования электроэнергетики в Российской Федерации является постепенный отход крупных промышленных потребителей от сложившейся практики централизованного электроснабжения и увеличения собственной генерации. В первую очередь это характерно для предприятий, в энергобалансе которых значительная часть принадлежит вторичным энергоресурсам. В таких условиях целесообразно развивать выработку электроэнергии за счёт возможностей собственного энергохозяйства, используя для этого уже существующие электростанции технологического назначения и сооружая дополнительные генерирующие мощности. При этом усложняется конфигурация системы электроснабжения, появляются сложнзамкнутые сети на её верхних уровнях, усложняются эксплуатационные режимы, их планирование и оперативное управление. Система электроснабжения при этом частично приобретает черты, свойственные электроэнергетическим системам, сохраняя собственные специфические особенности. Для повышения эффективности таких систем необходимо совершенствование методологии управления их режимами с учётом взаимосвязей с внешними подсистемами энергетики и внутренними подсистемами предприятия.

В диссертационной работе Малафеева А.В. поставлена и решается важная научно-техническая проблема повышения экономичности работы систем электроснабжения промышленных предприятий при обеспечении требуемого уровня надёжности в условиях функционирования собственных электростанций при тенденции увеличения их доли в балансе мощности и электроэнергии предприятий. Поставленная проблема в работе решается путем развития теории и практики управления эксплуатационными режимами промышленных систем электроснабжения, на основе разработки программных средств расчёта и планирования режимов, а также обоснования комплекса технических мероприятий по обеспечению выбранных критериев управления. Следует отметить, что поставленные задачи эффективного управления режимами систем электроснабжения крупного промышленного предприятия с собственной генерацией до настоящего времени окончательно не решены.

С учётом перечисленных факторов считаю, что диссертационная работа Малафеева А.В. посвящённая разработке методов, алгоритмов и технических мероприятий по повышению эффективности заводского электроснабжения с собственной генерацией, актуальной и практически значимой.

2. Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы» в части направлений исследования: п.1 «Анализ системных свойств и связей, математическое и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая системы электроснабжения»; п.2 «Разработка научных основ эксплуатации электротехнических

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»	
за № _____	_____
Дата регистрации	27.12.2023г
Фамилия регистратора	_____

комплексов и систем»; п.3 «Оптимизация электротехнических комплексов и систем, разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах».

3. Анализ содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 301 наименования, приложений и содержит 333 страницы машинописного текста, 183 рисунка и 44 таблицы.

Автореферат достаточно полно отражает основные положения диссертации: актуальность, цель работы, задачи исследований, научную новизну результатов, теоретическую и практическую значимость, основные положения и результаты, выносимые на защиту, методы исследований и достоверность полученных результатов, их апробацию, список публикаций автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу структуры и функционирования современных систем электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственными электростанциями, их взаимосвязей с другими подсистемами энергетики и промышленного предприятия. Выделены характерные черты таких систем электроснабжения. Осуществлено сравнение энергохозяйства крупного промышленного предприятия с региональными объектами электроэнергетики, сделан вывод о сопоставимости по масштабам с наиболее крупными электросетевыми организациями и электрическими станциями. На основе произведенного анализа автор делает вывод о принадлежности таких систем электроснабжения к классу больших производственно-экономических систем. В этой же главе проанализированы научные публикации, посвященные установившимся режимам электрических сетей, систем электроснабжения, электроэнергетических систем, на основе чего, учитывая системные свойства, сформулированы цели и задачи диссертации.

Вторая глава посвящена вопросам оптимизации распределения мощностей в системе электроснабжения между агрегатами собственных электростанций и энергосистемой. В качестве критерия оптимальности принята сумма затрат на выработку электроэнергии на собственных электростанциях, приём из региональной энергосистемы и передачу по электрическим сетям предприятия. Для учёта работы котлоагрегатов на сочетании нескольких видов топлива с разной стоимостью предложено задание уравнений связи (экономико-математических моделей) в виде кусочно-линейных зависимостей. Характер этих зависимостей определяет использование подходов динамического программирования. Для учёта неопределенности нагрузка задается в виде нечётких значений. Предложенный метод разработки оптимальных режимов предполагает декомпозицию общей задачи оптимизации на три подзадачи – определение оптимальной нагрузки генераторов по критерию минимума затрат на выработку и приём электроэнергии; уточнение полученного решения с учётом минимума стоимости потерь электроэнергии в системе электроснабжения; корректировку производительности котлов по полученным суммарным мощностям электростанций. Для условий крупного промышленного предприятия (применительно к ПАО «ММК») рассмотрено решение задачи краткосрочного планирования, особенность которой заключается в учёте внутрисуточных колебаний оптовых цен на электроэнергию, в связи с чем актуальным становится перераспределение нагрузки между собственными электростанциями и энергосистемой в часы минимума оптовых цен. Показано, что при решении задачи долгосрочного планирования важно учитывать прогнозное изменение цен на основные виды топлива и электроэнергию, поскольку от этого фактора зависит экономически целесообразная доля собственных источников в покрытии графика нагрузки предприятия.

В третьей главе разработан метод математического представления электрических нагрузок производственных подразделений промышленного предприятия на основе

теории нечётких множеств. Графики нагрузки предлагается моделировать нечёткими интервалами с одной нечёткой границей. Предложен способ оперативной оценки графиков нагрузки по величине ожидаемой производительности и типовому графику данного объекта.

В четвертой главе предложен метод расчёта установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий на основе принципов последовательного эквивалентирования. Метод ориентирован на особенности систем электроснабжения, в которых присутствуют как замкнутые, так и разомкнутые сети с существенным преобладанием последних. Особенностью является использование однотипных схем замещения для функционально различных элементов схемы – вращающихся машин, пассивных сетевых элементов, электроприёмников и узлов комплексной нагрузки. Рассмотрен способ задания в расчёт узлов примыкания к внешним сетям по результатам контрольных замеров.

Пятая глава посвящена вопросам снижения затрат, связанных с передачей электроэнергии по элементам системы электроснабжения. Глава делится на две части. В первой части рассматриваются вопросы экономически целесообразного регулирования напряжения в разомкнутых сетях промышленных предприятий напряжением до 10 кВ за счёт изменения положения РПН трансформаторов главных понизительных подстанций. Выделено два характерных случая: при отсутствии телеизмерений на подстанции и при наличии телеизмерений и автоматизированного рабочего места оперативного персонала. Для учёта износа РПН при суточном регулировании предложен способ, позволяющий определить экономически целесообразный срок службы на основе характеристик жизненного цикла производственного актива. Во второй части главы разработан метод определения вклада источников питания и потребителей промышленной системы электроснабжения в потокораспределение, потери электроэнергии и их стоимость. Метод ориентирован на разработку мероприятий по предотвращению переноса стоимости потерь электроэнергии со сторонних потребителей на собственное потребление предприятия.

В шестой главе рассматриваются вопросы оценки надёжности систем электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственной генерацией. Рассмотрен разработанный автором метод расчёта показателей структурной надёжности, основанный на последовательном эквивалентировании вероятностей безотказной работы при учёте направлений потоков мощности в схеме. Для случаев недостаточного объёма информации об аварийных отключениях, их продолжительности и величинах ущерба предложен способ количественной оценки рисков, основанный на теории нечётких множеств. Оценивать ущерб от нарушения электроснабжения при технологических взаимосвязях между потребителями предлагается за счёт операций с нечёткими числами, которыми представлен ущерб отдельных цехов, технологических линий или агрегатов.

Выводы, содержащиеся в **заключении**, обобщают теоретические и практические результаты диссертационной работы. Выводы достоверны, теоретически обоснованы и подтверждены результатами вычислительных экспериментов.

В приложении даны акты внедрения и оценка погрешности расчёта и реализации оптимального распределения мощностей при нечётком задании характеристик агрегатов.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и завершённостью, содержит новые научные результаты и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов.

Основные выводы и результаты диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследований и сформулированы автором структурно логично и содержательно. Материалы и результаты исследования изложены в объёме, достаточном для понимания их сути. Диссертационная работа написана грамотным языком,

корректным в научном и техническом отношении. Имеет место достаточно высокий математический уровень изложения материала.

4. Степень достоверности результатов и обоснованности выводов

Обоснованность и достоверность научных положений, теоретических выводов, результатов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием математического аппарата оптимизации, теории электрических цепей, принятия решений в условиях риска и неопределённости, апробированных математических пакетов обработки данных; подтверждается соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, а также положительными результатами внедрения предложенных методов, технических решений и мероприятий в условиях действующего производства.

5. Апробация работы и подтверждение опубликования её основных положений и результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. По материалам диссертации опубликовано 55 печатных работ, в том числе 23 статьи в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, 7 статей, проиндексированных в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 2 монографии.

Внедрение происходило в виде выполненных хозяйственных работ. Акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы представлены в приложении к диссертации.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

6. Научная новизна и теоретическая значимость результатов и выводов

Научная новизна основных положений и результатов работы заключается в следующем:

6.1. Разработан способ математического представления экономико-математических моделей генерирующего оборудования промышленных электростанций в виде кусочно-линейных зависимостей топливных затрат от нагрузки, отличительной особенностью которого является возможность учёта различных топливных смесей и их состава при изменении производительности котлов.

6.2. Разработан метод оптимизации распределения активных мощностей в системе электроснабжения промышленного предприятия с собственными неблочными электростанциями по критерию минимума затрат на выработку и распределение электроэнергии в условиях неопределённости исходных данных. Созданный метод отличается возможностью учёта разрывности и недифференцируемости экономико-математических моделей станционных агрегатов в условиях, когда сглаживание таких моделей привело бы к существенным ошибкам при выявлении оптимального режима. Неопределённость исходных данных учитывается путём математического представления характеристик станционных агрегатов и балансовых условий связи с энергосистемой на основе нечётких чисел.

6.3. Разработан метод математического представления электрических нагрузок, основанный на их задании в виде нечётких интервалов. Метод позволяет выполнять оперативную оценку ожидаемых величин нагрузок и параметров режима системы электроснабжения на основе плановых производственных показателей; отличается от существующих возможностью моделирования нагрузок, графики которых не

соответствуют нормальному закону распределения, что характерно практически для всех уровней промышленных систем электроснабжения.

6.4. Разработан метод расчёта эксплуатационных режимов систем электроснабжения, основанный на принципах последовательного эквивалентирования. Предложенный метод отличается от существующих большей универсальностью, гибкостью и удобной адаптацией к различным режимам систем электроснабжения, от нормальных до аварийных.

6.5. Разработана методика выбора положений РПН силовых трансформаторов заводских понизительных подстанций по критериям минимума потерь мощности в сетях низшего напряжения и минимума износа переключателей, позволяющий учесть неопределённость информации о нагрузках в разомкнутых сетях напряжением 3–10 кВ на основе критериев теории игр. Предложенный способ учёта износа устройства РПН основан на характеристиках жизненного цикла актива и позволяет учесть остаточный коммутационный ресурс РПН и экономическую целесообразность его обслуживания и ремонта.

6.6. Разработан метод оценки вклада собственных и сторонних потребителей (субабонентов) и источников питания СЭС в потокораспределение, потери мощности и их стоимость, использующий результаты расчёта потокораспределения. Метод позволяет при изменении нагрузки сторонних потребителей разрабатывать и реализовывать мероприятия по обеспечению наиболее полной компенсации стоимости потерь в СЭС предприятия с учётом технико-экономических показателей собственных электростанций.

6.7. Создан метод расчёта надёжности СЭС с собственными источниками электроэнергии при эксплуатации действующих СЭС и их реконструкции, включающий в себя оценку структурной надёжности на основе принципов последовательного эквивалентирования и оценку производственных рисков, связанных с нарушением электроснабжения потребителей и со снижением выдачи мощности собственными электростанциями. Разработана методика принятия решений при планировании реконструкции в условиях неопределённости информации о нагрузке потребителей на основе критерия Ходжа-Лемана. Для оценки ущерба от невыпуска продукции предложен способ, основанный на использовании арифметики нечётких чисел, позволяющий учесть технологические и электрические взаимосвязи между потребителями, наличие запаса и технологического резерва, а также время реакции того или иного участка или агрегата на отсутствие промежуточного продукта.

Теоретическая значимость исследований автора определяется тем, что результаты диссертационной работы являются развитием теории и методов математического моделирования крупных промышленных систем электроснабжения с собственной генерацией. Создана научно-методическая основа для совершенствования методов планирования деятельности энергохозяйства промышленных предприятий, дальнейшего развития теории установившихся и оптимальных режимов, разработки более эффективных методов и алгоритмов решения задач управления режимами систем электроснабжения.

7. Практическая значимость работы

Значимость результатов диссертационной работы для практики заключается в повышении экономичности и надёжности систем электроснабжения за счет расширения спектра задач, решаемых при управлении режимами, учета неопределённости параметров режима и энергетического оборудования, специфических свойств промышленных электростанций и технологических особенностей потребителей, применении математического аппарата принятия решений в условиях риска и неопределённости.

7.1. Разработанные метод оптимизации выработки активной мощности собственными электростанциями промышленного предприятия и методика выбора экономически целесообразного уровня напряжения на понизительных подстанциях

обеспечивают снижение затрат на выработку, приобретение и передачу электроэнергии и, следовательно, снижение доли энергозатрат в себестоимости готовой продукции предприятия.

7.2. Представленный способ математического представления экономико-математических моделей генерирующего оборудования заводских электростанций позволяет учесть зависимость состава топливной смеси котлоагрегатов от паропроизводительности при использовании нескольких видов энергоресурсов при решении задачи оптимизации режима системы электроснабжения.

7.3. Разработанный метод математического представления электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий при помощи нечетких интервалов дает возможность на основе плановой производительности цеха (подразделения) выполнить оперативную оценку ожидаемого суточного графика нагрузки.

7.4. Созданный метод оценки вклада в потокораспределение и потери мощности в системах электроснабжения потребителей и источников питания позволяет обеспечить наиболее полную компенсацию стоимости потерь электроэнергии сторонними потребителями при оказании им услуг по передаче электроэнергии, а также корректно оценивать переменные издержки при планировании эксплуатационных режимов систем электроснабжения.

7.5. Разработанный метод расчёта надёжности систем электроснабжения на основе показателей структурной надёжности и количественной оценки производственных рисков позволяет оценить ущерб от нарушения электроснабжения цеховых потребителей и от нарушения выдачи мощности собственными электростанциями на основе экспертных оценок вероятности аварийных отключений и времени восстановления при недостаточном объеме статистической информации.

7.6. Метод расчета установившегося режима систем электроснабжения на основе принципов последовательного эквивалентирования позволяет обеспечить гарантированное отыскание решения в условиях систем электроснабжения крупных предприятий, для которых характерно преобладание разомкнутых сетей над замкнутыми, несколько узлов примыкания к региональной энергосистеме, собственные источники электроэнергии на различных уровнях напряжения.

8. Замечания по диссертационной работе

8.1. 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.

8.2. 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.

8.3. 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.

8.4. Местные электростанции на промышленных предприятиях, формирующих систему рассредоточенной (распределённой) генерации, могут участвовать

в регулировании напряжения, однако этот вопрос соискатель не рассматривает, ограничивая системный эффект реализации данной задачи..

8.5. 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.

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

9. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Малафеева А.В. соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842:

9.1. *П.9.* Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором расширены знания об управлении эксплуатационными режимами систем электроснабжения крупных промышленных предприятий, содержит новые научно-обоснованные решения, применение которых позволит повысить эффективность и надёжность систем электроснабжения промышленных потребителей с собственными электростанциями.

9.2. *П.10.* Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе соискателя в науку. В диссертации представлены сведения о практической полезности результатов, рекомендаций и использования научных выводов.

9.3. *П.11–П.13.* Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях: 23 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 статей в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science. Научные публикации, изданные в период работы над диссертацией, соответствуют тематике диссертационной работы и с достаточной полнотой отражают её суть, основные результаты и выводы.

9.4. *П.14.* В диссертации и автореферате соискателем отмечается использование результатов научных работ, выполненных лично и в соавторстве, имеются ссылки на соавторов. Диссертация соответствует требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

10. Общее заключение

Представленная на отзыв диссертационная работа Малафеева А.В. является самостоятельной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней решена важная научно-техническая проблема повышения эффективности и надёжности систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии. Задачи, решаемые в работе, объединены общей научной идеей сочетания методов расчёта и оптимизации режимов систем электроснабжения и методов учёта неопределённости и риска при моделировании параметров режимов и оборудования и при принятии решений, что является проявлением системных свойств объекта исследования.

Основные научные выводы и практические рекомендации сделаны на основе подробного анализа проблемы с использованными автором способами, методами и методик. Содержание представленной диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы».

Содержание диссертации полностью соответствует заявленным целям и поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Диссертация написана грамотным языком, выводы и рекомендации изложены аргументировано. Основные научные результаты работы подробно изложены в публикациях в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК, а также в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science.

Сделанные в п.8 замечания носят частный характер и не снижают в целом положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа А.В. Малафеева полностью отвечает требованиям п.п. 914 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства от 24 сентября 2013 г. №842, а соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент
профессор кафедры электроэнергетики
ФГАОУ ВО «СФУ»,
доктор технических наук,
профессор

А. Герасименко

Герасименко Алексей Алексеевич

«11» декабря 2023 г.

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».

660074, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус №14(Г), ПИ СФУ, тел. +7-960-758-67-99, e-mail: gerasimenkoaa@yandex.ru

Подпись Герасименко Алексея Алексеевича заверяю



ФГАОУ ВО СФУ
Подпись *Герасименко А.* заверяю
Целопроеводитель
11 / *12* / 20*23*