

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
им. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИСЭМ СО РАН)



664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, 130
Тел. (395-2) 42-47-00
Факс (395-2) 42-67-96
E-mail: info@isem.irk.ru
от 11.10.2018 № 315/04-11
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ИСЭМ СО РАН,
д.т.в., профессор, член-кор. РАН
В.А. Стенников



« 11.10.2018 » 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Герасименко Алексея Алексеевича «Статистическая методология моделирования многорежимности в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

1. Актуальность диссертационного исследования

Повышение эффективности функционирования электросетевого комплекса России решением проблемы оптимальной компенсации реактивных нагрузок, заключающейся в определении расстановки, установленных мощностей и оптимальной загрузки источников реактивной мощности (РМ) как в проектируемых, так и в эксплуатируемых сетях, позволит снизить потери электроэнергии (ЭЭ), нормализовать уровни напряжений, повысить режимную управляемость электрических сетей и подключить новых электропотребителей. В этих условиях необходим аппарат учёта всей совокупности состояний (многорежимности) электрических сетей, определяемых в основном изменением электрических нагрузок. Решение этих проблем, особенно уменьшение потерь ЭЭ, позволяет снизить себестоимость передачи и распределения ЭЭ и в итоге, направлено на снижение энергоёмкости единицы валового внутреннего продукта (ВВП), высокая энергоёмкость которого в 3-4 раза превышает аналогичные показатели развитых стран. Эта задача согласуется с указом Президента РФ №889 от 14.06.2008 г и Энергетической стратегией России на период до 2030 года, предусматривающих снижение энергоёмкости ВВП к 2020 году не менее чем на 40 %.

Снижение потерь ЭЭ является реальной эксплуатационной технологией энергосбережения, а эффективное экономическое регулирование перетоков РМ – одной из важных проблем российской электроэнергетики. Эта технология

приобретает особую общероссийскую актуальность в связи с введением новых нормативных документов в части условий потребления РМ (приказ Минпромэнерго № 380 от 23.06.2015 г. «Порядок расчёта значений соотношения потребления активной и реактивной мощности... »).

Цели и задачи, содержание исследований, полученные научные и практические результаты и защищаемые положения рецензируемой диссертации в полной мере соответствуют приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждена Указом Президента РФ 07 июля 2011 года). В этой связи тема диссертации А.А. Герасименко, основная направленность которой составляет разработку основ статистической методологии полного учёта многорежимности в задачах анализа режимов и компенсации РМ, имеет большое технико-экономическое значение, и, безусловно, является актуальной.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа А.А. Герасименко состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Рукопись изложена на 344 страницах основного текста, содержит 30 рисунков и 41 таблицу; список литературы включает 333 наименования; имеются 13 приложений, подтверждающих некоторые разделы диссертации и содержащих документы, подтверждающие внедрения результатов работы.

Новые научные результаты, полученные автором, их достоверность и значимость для науки и практики представлены далее, в соответствии со структурой диссертации.

Во введении достаточно полно и убедительно представлена и обоснована актуальность и значимость решения проблемной задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок с полным учётом многорежимности, интегральных характеристик режимов применительно к постановкам оптимального функционирования и краткосрочного развития систем распределения ЭЭ, сформулирована научная новизна, практические результаты исследований и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена физическая и аналитическая суть и необходимость решения проблемной задачи компенсации РМ, история её развития и достигнутые в отечественной и зарубежной электроэнергетике программно-математические результаты. Автор справедливо отмечает высокий уровень решения данной задачи применительно к однорежимной постановке и отсутствие в широкой практике аппарата (математических моделей, методов и алгоритмов) приемлемого по трудоёмкости и качеству её решения с учётом всей совокупности электрических режимов на характерных (отчётных) интервалах времени. Из ряда альтернативных путей диссертант избрал классический, сформулировав указанную проблемную постановку как задачу нелинейного математического программирования, учитывая в ней динамический характер и преимущества многоэтапных (последовательных) статических решений на основе адаптивного подхода. При этом математически корректно (с использованием допущений) сформированная с учётом текущей экономической ситуации адди-

тивная функция дисконтированных затрат преобразована к критерию оптимальности, аналогичному статическому. Наряду с данной проектной задачей планирования развития систем сформулирована эксплуатационная задача оптимального функционирования системы распределения по критерию минимума потерь ЭЭ. В результате критического анализа существующих методов и алгоритмов решения однорежимных задач выбран наиболее эффективный и приспособленный к специфике решения задач энергетики (и с этим утверждением диссертанта следует согласиться) обобщённый метод приведенного градиента. На основе разработанной факторной модели графиков электрических нагрузок диссертантом предложено определять интегральные параметры системы и учитывать их в оптимизационных алгоритмах без непосредственного расчёта всей совокупности её режимов.

Вторая глава содержит основополагающие материалы статистического моделирования многорежимности, обусловленной преимущественно изменением электрических нагрузок в узлах распределительной системы. Первая исходная часть указанного моделирования реализована получением обобщённых графиков нагрузок – компактной (сжатой) статистической модели, факторного отображения взаимосвязи (взаимозависимости) реальных электрических нагрузок. Применение метода главных компонент к матрице корреляционных моментов (МКМ) позволило получить набор статистически не связанных (независимых ортогональных) графиков, малая совокупность которых (до $M=3-4$ -х) отображает исходную МКМ реальных сетей с требуемой точностью. Более того, полученные главные факторы, отражающие главные свойства признаков: плотность, неравномерность изменения нагрузок, оказались статистически устойчивыми, пригодными (с приемлемой точностью) для моделирования изменения нагрузок узлов за пределами исходной (обучающей) выборки. Этот результат представляет особую ценность.

Подтверждение отмеченных свойств репрезентативными моделирующими расчётами позволяет признать правильным утверждение диссертанта об универсальности введенных в практику моделирования ортогональных графиков и обоснованности введения термина «обобщённые графики нагрузок (ОГН)». Использование известных или уточняемых по предложенным процедурам математических ожиданий мощностей и M линейных комбинаций ОГН позволяет восстановить исходные изменения нагрузок до отражения 85-95 % полной дисперсии нагрузок.

Полученные результаты явились основой построения алгоритмов учёта многорежимности в задачах анализа, обобщения режимов и оптимальной компенсации реактивных нагрузок, рассматриваемых в следующих главах диссертации.

В третьей главе, связанной со второй частью исходного статистического моделирования, предложена стохастическая модель, учитывающая множество установившихся режимов системы распределения ЭЭ с использованием полученных статистически устойчивых ОГН. При этом моделирование исходных нагрузок с помощью ОГН ориентировано на использование режимной информации от современных автоматизированных систем. В главе обоснованы вычислительные алгоритмы определения следующих интегральных характеристик: потерь ЭЭ, диаграмм и диапазонов изменения анализируемых параметров

режимов, на учёте которых базируется решение задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок. Невысокая трудоёмкость вычисления интегральных характеристик, соответствующая одному расчёта установившегося режима для средних нагрузок и дополнительному (до 2-4 раз) решений линейных уравнений с неизменной матрицей Якоби, определяет основу эффективности разработанных методов и оптимизационных алгоритмов. В главе и приложениях также представлены результаты оценок точности для ряда тестовых и реальных схем Красноярской энергосистемы.

Четвёртая глава диссертации А.А. Герасименко содержит комплекс расчётных наработок (алгоритмов, расчётных приёмов и способов), полученных по результатам аналитических и расчётно-экспериментальных исследований, обеспечивающих возможность уменьшения методической и информационной составляющих погрешности, а также увеличения достоверности расчёта технической составляющей потерь ЭЭ.

В результате указанного обобщения автору удалось дополнить разработанную методику статистического учёта многорежимности комплексным учётом влияния схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов на точность расчёта нагрузочных потерь ЭЭ. В рамках созданной методики разработаны методы и алгоритмы определения (уточнения) температуры и соответственно адекватного учёта активного сопротивления проводов и жил воздушных и кабельных линий, предложен формализованный способ учёта дополнительного нагревания проводов воздушных линий (ВЛ) в зависимости плотности нагрузки и атмосферных факторов, способ учёта загрузки и структуры схем (динамические поправки); обосновано введение поправки в метод средних нагрузок при расчёте потерь ЭЭ по месячному отпуску ЭЭ и среднемесячной температуре и другие факторы.

Из-за неполноты информации о нагрузках обеспечение высокой надёжности расчёта потерь ЭЭ в распределительных сетях достигается восстановлением режимов электропотребления с использованием стохастической модели графиков и построением комбинированного алгоритма расчёта потерь, заключающегося в минимизации систематической погрешности расчёта потерь до значений, близких к нулевым, и с рассеянием, практически не выходящим за ошибки исходной информации. Разработанный комплекс алгоритмов и методов поддерживает расчёты установившихся и оптимальных режимов, их интегральных характеристик. Следует отметить также, что фактор многорежимности, вызванный изменением схем, учтён полученным уравнением регрессии роста потерь ЭЭ и оценивается по схемам нормального эксплуатационного состояния.

Пятая глава является итоговой и обобщающей, ее содержание и результаты соответствуют цели и задачам диссертации. Приведены разработанные методика и алгоритм оптимального выбора источников РМ в системах распределения электрической энергии. Результаты, особенно в части стохастического учёта множества режимов, подготовлены содержанием предыдущих глав. Опираясь на алгоритм оптимизации мгновенных режимов и статистическое моделирование графиков электрических нагрузок, диссертант предлагает на основе метода обобщённого приведенного градиента реализовать алгоритм стохастической оптимизации на интервале времени. Предложенный способ учёта множества режимов в начальной и в каждой точке оптимизационной тра-

ектории посредством введённых интегральных характеристик позволяет эффективно учесть всю совокупность электрических режимов и контролируемые функциональные и балансовые ограничения, значения целевой функции, выполнить суммирование экономических характеристик множества режимов без их непосредственного последовательного расчёта. В этой части особенно проявляется эффективность применения статистического подхода. Его применение научно обосновано и подтверждено выполнением расчётов. Работоспособность алгоритмов подтверждена программными разработками диссертанта. По сути, в диссертации предложена новая модификация метода приведенного градиента. Научное значение этого результата особенно ценно и, по нашему мнению, выходит за рамки данной проблемной задачи.

В шестой главе представлены результаты практической реализации разработанных математических моделей, методов и алгоритмов в составе программных разработок расчётов установившихся режимов и их интегральных характеристик, оптимальной компенсации реактивных нагрузок по критериям минимума потерь активной мощности и оптимального распределения существующих источников РМ на интервале времени с учётом многорежимности по критерию минимума потерь ЭЭ.

Оценка точности программ выполнена методом статистических испытаний в результате непосредственного воспроизводства всей совокупности характерных и оптимальных режимов на множестве схем электрических сетей и систем напряжением 35–220 кВ; показана достаточная для практических целей точность решения эксплуатационных задач. Практическая ценность разработанного программно-вычислительного аппарата подтверждается пятнадцатью актами внедрения (Приложение Н) в промышленное производство и учебный процесс.

В заключении автор диссертации формулирует и обобщает главные научные и практические результаты исследований и обосновывает вывод, что в работе создана единая статистическая методология компактного нетрудоёмкого учёта и анализа множества установившихся режимов (многорежимности) в проблемной задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок в системах распределения электрической энергии.

Достаточно обширные приложения диссертации дополняют содержание отдельных исследований, содержат сведения об их достоверности, качестве, трудоёмкости и практической ценности.

3. Общая методология исследования

Общая идеология исследований, реализованная в диссертации А.А. Герасименко, опирается на комплекс методов и методик, определяющих направление теоретических, расчётно-экспериментальных и практических подходов к изучению проблемы оптимальной компенсации реактивных мощностей в системах распределения ЭЭ и электроснабжения объектов. Применительно к взаимосвязанным реализациям данной проблемной задачи оптимального развития и функционирования диссертант обоснованно и успешно применил вероятностно-статистический аппарат во взаимодействии с глубоко проработанным детерминированным методом оптимизации. Обоснованность такого взаимодей-

ствия связана с неполнотой, частичной неопределённостью информации об изменении электрических нагрузок и в меньшей мере схемных состояний указанных электрических систем, что, в общем, и определяет характер многорежимности в данной проблемной задаче. Отмеченное представляет основную содержательную особенность задачи, а представленные её решения - главное достоинство диссертации. Для решения составляющих задач данной проблемы соискатель применил современный математический аппарат: классификаций в факторном пространстве, корреляционного и регрессионного анализа и моделирования, статистических испытаний, нелинейного математического программирования, моделирования, расчёта, анализа и оптимизации установившихся режимов электрических систем. В результате анализа и обобщения, установленных при выполнении теоретических и расчётно-экспериментальных исследований основных результатов и закономерностей автор разработал статистические модели электрических нагрузок и анализа установившихся режимов, набор расчётных приёмов, методов и алгоритмов улучшения надёжности вычисления интегральных характеристик, алгоритмы решения задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок в эксплуатационной и проектной постановках со статистическим моделированием многорежимности. Данные решения воплощены в программно-вычислительный аппарат для ЭВМ, который проверен и нашёл применение в учебном процессе и на производстве.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Правильность, достоверность и адекватность разработанных соискателем математических моделей, алгоритмов и программ для ЭВМ, и соответственно, защищаемых научных результатов, положений и выводов определяются обоснованной постановкой, логической последовательностью и связанностью всех этапов диссертационного исследования, качественным анализом и обобщением результатов. Отмеченные положения подтверждены статистически представительными объёмами сложных и трудоёмких по подготовке, проведению и обработке результатов расчётно-экспериментальных исследований, корректным использованием математического аппарата при проведении исследований, верификационными расчётами по данным статистических испытаний с использованием полного объёма исходной информации об изменениях режимов сетей на суточном и месячном интервалах применительно к ряду тестовых и реальных электрических схем Красноярской энергосистемы, а также за счёт сопоставления с результатами, полученными с помощью лицензированных программных продуктов.

Научные положения и результаты исследований, полученные А.А. Герасименко, представлены в трудах многих всероссийских и международных конференций, опубликованы в ряде знаковых научных изданий, нашли отражение в учебной вузовской литературе всероссийского уровня и, в итоге, применение на предприятиях электроэнергетики.

5. Основные научные результаты, их новизна и значимость

Научная новизна полученных результатов. Диссертантом получен ряд результатов теоретических и расчётно-экспериментальных исследований, соответствующих в полной мере критерию научной новизны и подтвержденных рядом публикаций в ведущих журналах РФ (в том числе в органах РАН) и зарубежных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Наиболее значимые из них, по нашему мнению, являются следующие:

1. Методические основы формирования динамического функционала, критерия решения стохастической многоэтапной оптимизационной задачи краткосрочного развития систем распределения ЭЭ на основе адаптивного подхода.

2. Модифицированная методика статистического сжатого моделирования и реконструкции информации о реальных коррелированных электрических нагрузках ортогональными главными факторами. Восстановление графиков нагрузки систем распределения ЭЭ, характеризующихся недостаточной информационной обеспеченностью.

3. Математическая модель совокупности установившихся электрических режимов, алгоритмы и программа для ЭВМ расчёта интегральных характеристик систем распределения ЭЭ.

4. Комплекс методов, способов и вычислительных алгоритмов снижения методической ошибки при определении потерь электроэнергии модифицированным детерминированным и стохастическим методами (программы REG10PVT, ORESA).

5. Модификация метода обобщённого приведенного градиента в алгоритмах оптимальной компенсации РМ при стохастическом учёте и моделировании многорежимности в задачах эксплуатации и краткосрочного развития систем распределения ЭЭ.

6. Методика и алгоритм решения проектной задачи оптимального выбора источников РМ в системах распределения ЭЭ с учётом всей совокупности характерных режимов.

7. Алгоритмы и программа для ЭВМ решения эксплуатационной задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок при статистическом учёте всей совокупности характерных режимов на заданном интервале времени (программа ORESA).

Результаты диссертации представляют теоретический задел для разработки программного обеспечения общесистемного (отраслевого) уровня.

Значимость полученных результатов. Диссертационная работа Герасименко А. А. выполнена на высоком теоретическом уровне по тематике, актуальной для электроэнергетики России, и вносит большой вклад в решение важной научно-технической проблемы оптимальной компенсации реактивных нагрузок в системе распределения электрической энергии.

6. Практическая ценность результатов диссертационной работы.

Практическая значимость диссертационных исследований заключается в разработке математических моделей и методов, вычислительных алгоритмов и программных средства для ЭВМ эффективной компенсации реактивных нагрузок

зок, подтверждаемая пятнадцатью актами внедрения и другими практическими документами. Три программы расчёта потерь ЭЭ и оптимальной компенсации реактивных мощностей приняты в состав программно-математического обеспечения ряда предприятий электроэнергетики и зарегистрированы в государственном в Реестре программы для ЭВМ. Российской Федерации (приложения М и Н к рукописи диссертации). Наряду с отмеченным, диссертантом подготовлены и изданы две монографии и три учебных пособия общероссийского уровня, широко применяемых в учебной работе и практике специалистов электроэнергетического профиля.

7. Соответствие содержания паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике;

П.7 Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

П.13 Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

8. Апробация и публикация результатов диссертационной работы

По теме диссертации опубликовано 20 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий (в том числе две статьи индексируются в Scopus), рекомендованных ВАК для публикаций материалов докторских диссертаций, пять монографий и учебных пособия и получены три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

9. Замечания по диссертационной работе

По материалам рукописи и автореферата диссертации отмечаем следующее:

1. Для сокращения числа анализируемых графиков нагрузок, которые в рамках адаптивного подхода корректируются по мере уточнения информации, в первой главе диссертации обосновывается возможность перехода от решения динамической задачи к решению статической задачи. Полученная формулировка статической задачи включает функцию времени и, на наш взгляд, по-прежнему остается динамической. Кроме того, не ясен способ получения исходных графиков нагрузок и способ их достоверизации.

2. В формулировке задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок в циклах оперативного управления (1.12-1.14) отсутствует явный учет времени и не содержатся ограничения на перетоки и токи по линиям. Связано ли это с отсутствием подробного описания состава компонент вектора переменных?

3. Во второй главе предложен оригинальный подход к использованию факторного анализа для компактного описания множества суточных графиков нагрузок. В его основе лежит спектральное разложение матрицы корреляционных моментов (МКМ), получаемого с использованием стандартных библиотечных

процедур. Оценивалась ли автором возможность влияния обусловленности МКМ и ее размерности на численную устойчивость решения проблемы спектрального анализа?

4. В диссертации рассматриваются только суточные графики нагрузок, но в ЭС могут быть и электростанции, работающие по диспетчерскому графику. Как автор учитывает наличие таких генераций?

5. В четвертой главе диссертации, приведены три метода расчета температуры поверхности провода воздушной и кабельной линий с учетом действия ряда режимных и метеорологических факторов. В то же время автор не анализирует влияния на потери различия значений модулей тока вдоль линии. Может ли этот фактор оказать заметное влияние на оценки полученных автором потерь?

6. В пятой главе автором для определения мест установки компенсирующих устройств используется приближенный метод, основанный на непрерывной идеализации изменения дискретной величины. Не проводилось ли сопоставление получаемого таким образом решения с решением, получаемым методами дискретной оптимизации?

Отмеченные замечания не снижают значение и ценность полученных в диссертации главных научных и практических результатов. Диссертация написана технически и литературно грамотно, в доказательном стиле, хорошо иллюстрирована и аккуратно оформлена.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации, отражает её основные положения и соответствует основной идее и выводам.

Заключение. На основании вышеизложенного диссертационная работа Герасименко А.А. «Статистическая методология моделирования многорежимности в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, направленной на решение одной из важнейших проблем электроэнергетики – проблемы оптимальной компенсации реактивной мощности в системах распределения электрической энергии. Решение этой проблемы на основе разработанной статистической методологии моделирования многорежимности следует квалифицировать как ощутимый вклад в создание научных методов решения проблемных задач в области электрификации России. Актуальность, научная новизна, практическая значимость, содержание и публикации диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук и п.п. 9-14, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями Постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», а её автор, Герасименко Алексей Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником Отдела электроэнергетических систем (ОЭС) ИСЭМ СО РАН д.т.н., проф. Голуб И.И., старшим научным сотрудником ОЭС, к.т.н., доцентом Войтовым О.Н.

Отзыв на диссертацию обсужден и утвержден на семинаре отдела электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук, протокол № 9 от 8.10.2018 г.

Воропай Николай Иванович
Заведующий отделом
электроэнергетических систем ИСЭМ СО РАН
д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН

Воропай Н. И.



Сведения о ведущей организации:

Полное и сокращенное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).
Место нахождения	664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130.
Телефон	+7(3952) 500-646, +7(3952) 42-67-96
Адрес электронной почты	info@isem.irk.ru
Адрес сайта организации	http://isem.irk.ru