

На правах рукописи



Грачева Елена Ивановна

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы
и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Чебоксары 2014

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Официальные оппоненты:

Гамазин Станислав Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

Бабокин Геннадий Иванович

доктор технических наук, профессор, Новомосковский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», заведующий кафедрой «Электротехника»

Федоров Олег Васильевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «ВНИИР–Прогресс», г. Чебоксары

Защита состоится «24» октября 2014 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж, к. 310).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу 428015, г. Чебоксары, Московский пр., д. 15, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « 26 » 06 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.301.06



Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокий уровень приоритетности энергосберегающей политики в современной России обусловлен целым рядом факторов. В некоторых отраслях промышленности доля суммарных энергозатрат в себестоимости отдельных видов продукции составляет более 55 %. В современных условиях наблюдается тенденция снижения производства энергоресурсов, в связи с чем происходит постоянное повышение значимости проблемы энергосбережения. При этом экономия ЭЭ может быть представлена как источник дополнительной энергии, и поэтому она должна осуществляться в тех случаях, где затраты на энергосберегающие технологии будут меньше, чем затраты на добычу первичных топливно-энергетических ресурсов.

На данном этапе развития энергетики предъявляются все более жесткие требования к системе определения потерь ЭЭ, трудности в учете и контроле которых обусловлены вероятностно определенными или неопределенными исходными данными. Все это делает приоритетным постоянное развитие методических подходов к решению данной проблемы. В связи с этим целесообразным является развитие теории и методов расчета потерь ЭЭ, а также методов планирования мероприятий по снижению потерь, методов расчета надежности элементов сетей 0,4 кВ.

Как показывает опыт разработки и производства низковольтных коммутационных аппаратов в ОАО «ВНИИР–Прогресс» и на ЗАО «ЧЭАЗ» существующие методики расчета функциональных параметров при их применении для расчетов в сложных цеховых электрических сетях отличаются большой трудоемкостью. Неполнота информации и сложности при определении показателей качества функционирования и составляющих потерь ЭЭ заставляют использовать методы стандартного и нечеткого регрессионного анализа.

Проблемам исследования эффективности функционирования элементов систем энергетики, оптимизации режимов работы электрических сетей, надежности контактных соединений, изучения структуры потерь ЭЭ, а также вопросам управления электропотреблением уделялось и уделяется пристальное внимание. Весомый вклад в их решение внесли Д.А. Арзамасцев, А.Б. Власов, В.Э. Воротницкий, С.И. Гамазин, А.Г. Годжелло, Е.Г. Егоров, Ю.С. Железко, В.И. Идельчик, В.Н. Казанцев, Г.М. Каялов, Е.А. Конюхова, Б.И. Кудрин, В.А. Мантров, Г.А. Немцев, Г.А. Осипенко, В.Г. Пекелис, Г.Е. Поспелов, Г.П. Свинцов, Н.М. Сыч, О.В. Федоров, В.В. Шевченко, Ю.В. Щербина и другие ученые московской, ленинградской, киевской и других научных школ.

Однако, несмотря на большую значимость проблемы повышения эффективности субъектов электроэнергетики и промышленного производства и растущее применение систем автоматизированного учета ЭЭ актуальными остаются вопросы дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов расчета и анализа потерь ЭЭ, разработки многокритериальных подходов к оптимиза-

ции систем передачи и распределения ЭЭ с целью повышения надежности и эффективности их функционирования.

Таким образом, основными аспектами предлагаемого системного подхода к точному учету ЭЭ являются:

– **Экономический:**

1) решение вопроса о целесообразности проведения энергоаудита на предприятии;

2) выявление «очагов» наибольших потерь и, как следствие, повышение эффективности энергосберегающих мероприятий и снижение энергоемкости выпускаемой на предприятиях продукции;

3) уточнение величины удельного расхода ЭЭ на выпуск продукции с выделением расхода ЭЭ на технологию и потери;

4) уточнение себестоимости проектных работ;

5) повышение эффективности эксплуатации оборудования с устранением режимов недогрузки и перегрузки;

6) оптимизация мест установки приборов учета и контроля ЭЭ;

7) повышение эффективности борьбы с хищением ЭЭ;

8) повышение точности планирования расхода ЭЭ;

9) повышение качества тарифного регулирования стоимости передачи ЭЭ в электрических сетях.

– **Организационный:**

1) выявление узлов и элементов систем цехового электроснабжения с наибольшими потерями;

2) определение порядка последовательности замены оборудования с учетом количества циклов срабатываний.

Изложенное обусловило актуальность решения научной проблемы, имеющей важное значение для экономики страны, которое заключается в повышении точности методов расчета потерь ЭЭ в системах внутрицехового электроснабжения и осуществлении принципов энергосбережения.

Цель работы – развитие теоретических основ и совершенствование методов оценки эффективности функционирования систем цехового электроснабжения, обеспечивающих качественное проектирование, реконструкцию и эксплуатацию низковольтных электрических сетей промышленных предприятий.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие научные и практические задачи:

– разработка информационной базы данных основных параметров оборудования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий для расчета потерь ЭЭ;

– предложение классификации по потерям ЭЭ в контактах низковольтных коммутационных аппаратов;

– выявление зависимости величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в системах це-

хового электроснабжения, от номинальных данных аппаратов;

- разработка методов комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов с учетом их технического состояния;

- разработка методов и математических моделей на базе стандартного регрессионного анализа для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в низковольтных цеховых сетях, учитывающие структуру и динамику их изменения;

- разработка методов нечеткого регрессионного анализа для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации.

Методы исследований. Основной фактический материал, используемый для получения расчетных соотношений и подтверждающий достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций, получен в объединениях ОАО «Москвич» (г. Москва) и Казанском ОАО «Органический Синтез» (г. Казань).

Методика исследований определялась содержанием каждой решаемой задачи и базировалась на использовании методов планирования эксперимента, методов стандартного и нечеткого регрессионного анализа, методов математической обработки результатов эксперимента, теории электрических цепей, статистической теории погрешностей, теории надежности, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций, теории электрических аппаратов, положений и основ электроснабжения. Теоретические исследования сопровождались разработкой математических моделей в виде программных продуктов и их использованием при реализации программ энергосбережения.

Научная новизна результатов исследований, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- предложена классификация по потерям ЭЭ в контактах коммутационных аппаратов, применяемых в сетях низкого напряжения, в зависимости от конструктивных особенностей аппаратов;

- разработаны методы определения аналитических зависимостей величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов от их номинальных параметров по результатам экспериментальных исследований;

- предложен критерий технического состояния и разработаны методы комплексной оценки параметров эффективности функционирования низковольтных аппаратов;

- определения основные закономерности изменения сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов по результатам экспериментальных исследований и моделирования, что позволяет эффективно управлять эксплуатационными режимами цеховых сетей;

- разработаны модели, позволяющие учитывать изменение сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов в зависимости от сроков и режимов эксплуатаций и уточнять величину токов короткого замыкания по

фактическому техническому состоянию цепей электрооборудования низковольтных сетей;

- разработан алгоритм оценки погрешности расчета эквивалентного сопротивления цеховых сетей с использованием метода статистических испытаний при моделировании режимов низковольтных сетей;

- разработаны стандартные регрессионные модели для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в цеховых сетях с учетом основных параметров оборудования, позволяющие учитывать динамику развития сетей;

- формализована задача и разработаны математические модели нечеткого регрессионного анализа, используемые для оценки потерь ЭЭ в цеховых сетях в случае неопределенности задания исходной информации и позволяющий эффективно планировать мероприятия по энергосбережению.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью поставленных задач, целесообразностью принятых допущений; адекватностью используемого математического аппарата и разработанных моделей исследуемым процессам; хорошей сходимостью данных теоретических вычислений с результатами экспериментальных исследований и испытаний лабораторных и промышленных образцов в объединениях ОАО «Москвич» (г. Москва) и Казанском ОАО «Органический Синтез» (г. Казань), сопоставлением проведенных исследований с опубликованными материалами других авторов.

Практическая ценность работы:

1. Определены области применения и выданы рекомендации по использованию методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Разработана информационная база исходных данных схемных и режимных параметров систем цехового электроснабжения, используемая для анализа, оценки и прогнозирования потерь ЭЭ.

3. Разработаны математические модели зависимости величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов от их номинальных параметров по результатам экспериментальных исследований, позволяющие определять основные технические характеристики низковольтных коммутационных аппаратов и уточнять оптимальные варианты установки энергоэффективных по потерям мощности в контактных системах низковольтных аппаратов и на линиях цеховых сетей.

4. Разработаны метод и алгоритмы, применяемые для комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов в зависимости от их технического состояния в процессе эксплуатации, позволяющие определять их работоспособность и ресурс, а также планировать программу замены и ремонтов электрооборудования цеховых сетей.

5. Разработаны математические модели, позволяющие учитывать закономерности изменения сопротивления контактных систем низковольтных аппа-

ратов в зависимости от сроков и режимов эксплуатации оборудования и уточнять величину токов короткого замыкания в низковольтных сетях.

6. Разработаны стандартные регрессионные модели для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в цеховых сетях с учетом основных параметров оборудования, позволяющие учитывать динамику развития сетей, уточнять составляющие балансов ЭЭ по предприятию, цехам и осуществлять контроль за расходом ЭЭ.

7. Разработаны методы и модели нечеткого регрессионного анализа, используемые для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации, позволяющие эффективно внедрять мероприятия по энергосбережению, а также управлять режимами эксплуатации цеховых электрических сетей.

Теоретические и практические результаты работы использованы:

- при проведении энергетических обследований предприятий и организаций Государственным бюджетным учреждением «Управление по обеспечению рационального использования и качества топливно-энергетических ресурсов Республики Татарстан» во исполнение Федерального закона Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»;

- при уточнении величины удельного расхода ЭЭ на выпуск продукции с выделением расхода на технологию и потери в Казанском ОАО «Органический Синтез»;

- при планировании, прогнозировании электропотребления, при определении величины потерь ЭЭ в низковольтных электрических сетях и при проведении плановых предупредительных ремонтов электрооборудования на заводе Бутилового Каучука ОАО «Нижекамскнефтехим»;

- при составлении расходной части электробаланса и уточнении сроков замены низковольтных электрических аппаратов с учетом количества циклов коммутаций, что позволило достичь экономии ЭЭ до 50 % в низковольтных электрических сетях в ООО «Таткабель».

А также ценность диссертационной работы состоит в передаче и использовании методов для оценки конкурентоспособности разрабатываемых коммутационных аппаратов в ОАО «ВНИИР – Прогресс» (г. Чебоксары).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Области применения и рекомендации по использованию основных детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Информационная база данных схемно-режимных параметров оборудования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий, позволяющая обеспечить практическую реализацию методов расчета потерь ЭЭ.

3. Методы и алгоритмы определения сопротивлений контактных соеди-

нений низковольтных аппаратов с учетом их основных технических характеристик.

4. Методы комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения.

5. Стандартные регрессионные модели и методы определения потерь ЭЭ в системах цехового электроснабжения, учитывающие структуру и динамику развития цеховых сетей.

6. Методы нечеткого регрессионного анализа для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений» (Москва, 16–20 ноября 2009 г.), научно-техническом форуме с международным участием «Высокие технологии – 2004», «Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение» (Ижевск, 24–28 мая 2004 г.), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» (XII, XVI, XVII Бенардосовских чтениях, Иваново, 1–3 июня 2005 г., 1–3 июня 2011 г., 29–31 мая 2013 г.), VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Санкт-Петербург, 2004 г.), XVI, XLII, XLIII Международных научно-практических конференциях «Федоровские чтения», Москва, 9–11 ноября 2011 г., 7–9 ноября 2012 г., 6–8 ноября 2013 г., МЭИ), Всероссийских заочных научно-технических конференциях (Computer-Based Conferences) II ВНТК «Современные промышленные технологии» (Нижний Новгород, апрель 2005 г.), Республиканских научных конференциях «Проблемы энергетики» (Казань, 1996 и 1998 гг.), научно-технических конференциях: «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение» (Новомосковск, 2002 г.), «Электроснабжение, энергосбережение и электроремонт» (Новомосковск, 2000 г.), «Электрооборудование, электроснабжение, электропотребление» (Москва, 1995 г., МЭИ), 8-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ–2012”» (Севастополь, 2012), Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) (Иваново, 17–19 апреля 2012 г.), научно-практической конференции с международным участием (XLI неделя науки СПб ГПУ, Санкт-Петербург, 3–8 декабря 2012 г.), 10-ой Всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2012 г., ВоГТУ), Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2012 г. УГАТУ).

Публикации. Результаты исследований, включая научные положения, выводы и рекомендации автора, содержатся в 105 опубликованных работах, в том числе в шести монографиях и восьми учебных пособиях. В изданиях по перечню ВАК опубликовано 43 статьи.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 5 глав и содержит: машинописный текст на 364 страницах, 83 рисунка, 40 таблиц, список литературы из 266 наименований, а также приложения на 61 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность работы, ее цель, решаемые задачи, новизна научных положений, их практическая ценность, обосновывается целесообразность исследований функциональных характеристик электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий с целью повышения эффективности их проектирования, реконструкции и эксплуатации.

В первой главе предлагается классификация наиболее распространенных методов расчета потерь ЭЭ (рис. 1). Случайный характер процесса электроснабжения потребителей не всегда позволяет получить детерминированные зависимости для его интегральных характеристик – таких как расход ЭЭ или потери ЭЭ в сети.

Основной трудностью на этом пути является отсутствие достоверной и полной информации. Потери активной энергии в элементах цеховых сетей обычно вычисляют с целью использования их в технико-экономических расчетах, в частности, в расходной части электробаланса предприятий разного уровня.

Эта статья расходной части электробаланса не может быть определена непосредственными измерениями, и поэтому ее приходится находить прямым расчетом по величинам фактических нагрузок, пользуясь общеизвестными формулами. Потери ЭЭ можно также определять с использованием вероятностно-статистических методов. При этом расчет потерь мощности усложняется тем, что для их вычисления требуется знание закона изменения нагрузки в расчетный период времени.

В рыночных условиях страны достоверный учет потерь ЭЭ и их снижение до оптимальных значений приобретает существенное значение.

Поскольку применение оценочных методов не учитывает значительное число факторов, влияющих на реальную структуру потерь ЭЭ, их численное значение по уровням напряжения, для обоснования уточненных потерь в зависимости от имеющейся информации допускается использование точных схемно-технических методов.

Фактические (отчетные) потери в экономическом плане являются строго детерминированными величинами, жестко связанными с денежными средствами, полученными за проданную энергию.

В настоящее время разработано большое количество методов расчета потерь ЭЭ в сетях различных напряжений. Совершенствование этих методов идет в основном в двух направлениях: максимального уточнения их с учетом возможно большего числа факторов и облегчения практического использования методов путем введения упрощений и, следовательно, снижения точности расчета.

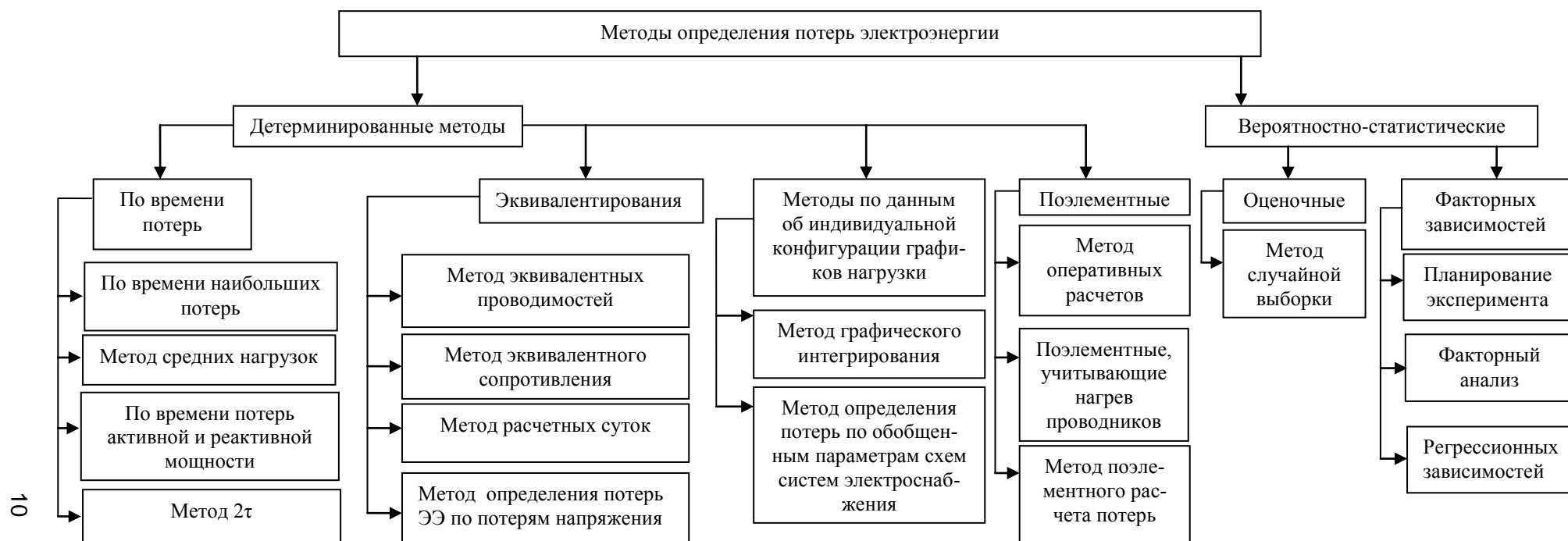


Рис. 1. Классификация методов определения потерь ЭЭ в системах промышленного электроснабжения

Приведены области применения и рекомендации по использованию детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ.

Сформулированы научные и практические задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во второй главе представлялось целесообразным исследовать цеховые сети напряжением 0,4 кВ некоторых промышленных предприятий г. Казани с выявлением их конструктивных и эксплуатационных особенностей.

В результате обследования схем цехового электроснабжения определены основные конструктивные и эксплуатационные особенности характеристик электрооборудования: фирма-производитель коммутационных аппаратов; количество аппаратов, установленных на линии – от 1 до 7; длина линий - от 1 до 300 м; сечение линий – от 25 до 250 мм²; коэффициент загрузки линий от 0,1 до 1,5. Показано, что представленные характеристики сети независимы друг от друга, носят вероятностный характер и обусловлены условиями процессов технологии, конструкцией схемы сети и расположением оборудования в цехе.

Обосновано, что данные пределов изменения длин линий, коэффициента их загрузки, мощности приемников ЭЭ и количества аппаратов, установленных на линии, отражают наиболее полную статистическую информацию о параметрах цеховых сетей для анализа потерь ЭЭ в сетях низкого напряжения.

Электрические сети напряжением до 1 кВ вследствие их большой протяженности характеризуются довольно высокими потерями ЭЭ. В настоящее время, когда наблюдается рост стоимости ЭЭ, повышение точности расчетов потерь в этих сетях является актуальной задачей. Непосредственное их измерение вызывает существенные трудности и дает большую погрешность в результатах. Поэтому наиболее точный способ вычисления потерь ЭЭ – расчетный, широко применяемый на практике.

Потери ЭЭ для участка трехфазной сети определяются по выражению

$$\Delta W = 3I^2 R \tau, \quad (1)$$

где I и R – эффективный ток и сопротивление кабеля или провода участка сети; τ – время потерь.

Сопротивление участка сети определяется маркой, сечением и длиной проводника, температуры его токопроводящей жилы, являющейся функцией температуры окружающей среды и нагрузки проводника.

В результате исследования выявлено, что при расчете сопротивления R участка сети при определении потерь ЭЭ необходимо учитывать влияние не только температуры токопроводящих жил, но и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов

$$R = R_{20}l[1 + \alpha(\theta - 20)] + \sum_1^K R_K. \quad (2)$$

где R_{20} – сопротивление 1 м линии при 20 °С; l – длина линии, м; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления 1/°С; θ – температура жилы провода, °С; $\sum_1^K R_K$ – сумма сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, установленных на линии.

Дополнительные погрешности вносят неточный учет длин линий, старение изоляции и т.п.

Температура жилы провода будет зависеть от его токовой нагрузки и температуры окружающей среды и может быть определена по зависимостям на рис. 2.

Другим важным моментом при определении сопротивления участка сети является учет влияния сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов. В литературе приводятся данные о значениях этих сопротивлений, но весьма приблизительные, что обуславливает необходимость детальных исследований данных параметров аппаратов.

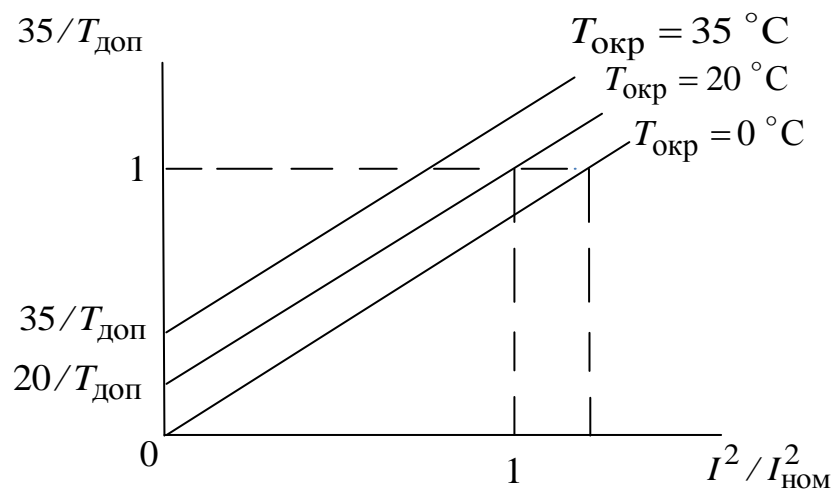


Рис. 2. Зависимости температуры жилы провода $T / T_{\text{доп}}$ от токовой нагрузки $I^2 / I_{\text{ном}}^2$ и температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$

Рассмотрим участок цеховой сети от трансформаторной подстанции ТП до потребителей ЭЭ Н (рис. 3) с коммутационными аппаратами низкого напряжения: автоматическими выключателями АВ1–АВ3, предохранителями ПР1, ПР2, контактными разъединителями КР1, КР2. Для данной схемы участка цеховой сети были определены потери ЭЭ без учета и с учетом сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов и нагрева проводов. Результаты расчетов показали, что при учете нагрева проводов и сопротивлений

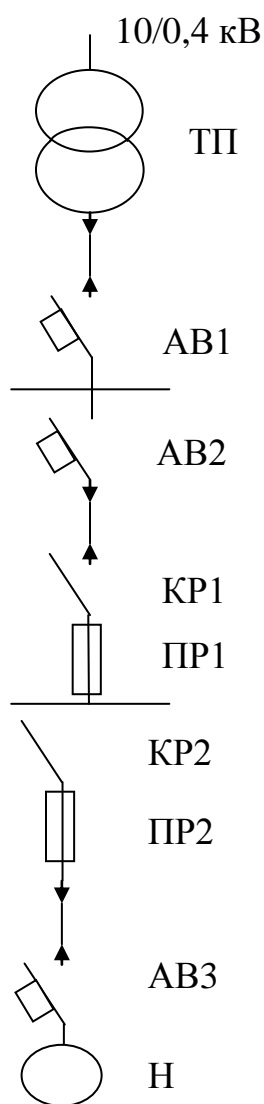


Рис. 3. Схема низковольтной сети от трансформаторной подстанции до потребителя

контактных соединений потери ЭЭ оказались на 65 % больше, чем без их учета.

Для определения потерь ЭЭ цеховой сети предлагается следующий алгоритм расчета:

1) вычислить дополнительный нагрев проводов линии по зависимости $T/T_{\text{доп}} = f(I^2/I_{\text{ном}}^2)$ на рис. 2, где $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы провода или кабеля;

2) определить дополнительную длину линии Δl , зависящую от токовой нагрузки, длины l и числа коммутационных аппаратов n на линии, для данной допустимой температуры нагрева проводов, используя номограмму на рис. 4;

3) рассчитать сопротивление линии R_3 с учетом дополнительной длины и нагрева проводов по формуле

$$R_3 = r_{20}[1 + \alpha(T - 20)](l + \Delta l); \quad (3)$$

4) определить потери ЭЭ

$$\Delta W = 3I^2 R_3 \tau. \quad (4)$$

В результате исследований установлено, что отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, влияющих на эти параметры, ведет к погрешностям при расчете потерь ЭЭ.

Анализ схем цехового электроснабжения ряда промышленных предприятий показал, что необходим учет следующих конструктивных и эксплуатационных характеристик оборудования: число коммутационных аппаратов, принятых к установке на линии, длина, сечение, нагрузка и коэффициент загрузки линии.

Обосновано, что при расчетном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей необходимо иметь информацию о следующих величинах:

– точном значении длин и количества линий цеховых сетей;

– перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;

– сопротивлениях контактных соединений коммутационных аппаратов и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой и, при этом,

сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;
– данных о графиках нагрузки.

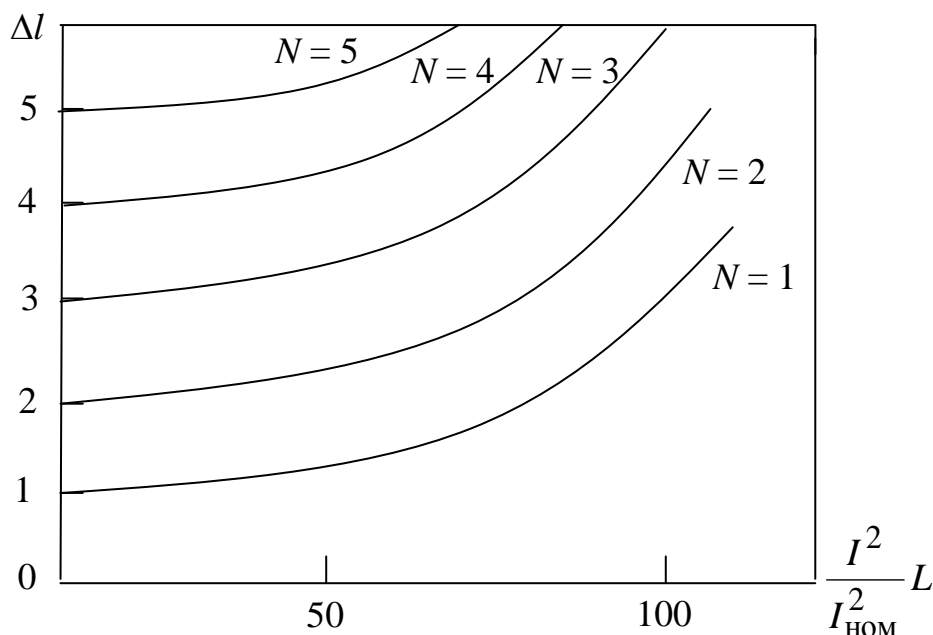


Рис. 4. Номограмма зависимости дополнительной длины линии Δl от токовой нагрузки линии $I^2 / I_{ном}^2$, длины линии L , м, числа коммутационных аппаратов на линии для данной допустимой температуры нагрева проводов

В третьей главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях промышленного электроснабжения. Показано, что по конструктивным особенностям аппараты можно разделить на следующие 3 группы:

- аппараты, имеющие кроме силовых контактов в силовой цепи добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле), такие как: автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы;
- аппараты, имеющие относительно большое сопротивление силовой цепи, такие как предохранители;
- аппараты, имеющие только переходное сопротивление контактов, такие как рубильники, пакетные выключатели.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что основное сопротивление силовой цепи аппарата включает в себя сопротивление таких элементов, как контактная группа, датчик теплового реле, катушка максимального реле. Сопротивление болтовых присоединений аппарата составляет небольшую долю общего сопротивления коммутационного аппарата.

Поскольку в справочной литературе отсутствует информация о сопротивлениях большинства низковольтных коммутационных аппаратов (а те данные, что приводятся, носят весьма приближенный характер), возникает проблема исследования законов изменения сопротивлений контактных соединений различных групп аппаратов. Для решения этой задачи были проведены измерения со-

противлений силовых цепей аппаратов методом амперметра-вольтметра.

Как показали исследования, результаты измерений практически не зависят от величины, времени воздействия и рода тока, протекающего через контакты при испытании (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерений сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов, мОм

Аппараты	Ток переменный						Ток по- стоянный
	$0,5I_{\text{НОМ}}$			$I_{\text{НОМ}}$			5–10А
	Время протекания тока, мин						
	0	5	10	0	5	10	10
Автоматический выключатель АЕ2056 $I_{\text{НОМ}} = 80 \text{ А}$	3,83	3,80	3,85	3,82	3,80	3,88	3,84
Предохранитель ПН-2 $I_{\text{НОМ}} = 250 \text{ А}$	0,48	0,49	0,51	0,50	0,51	0,52	0,50
Магнитный пускатель ПМЕ-211 $I_{\text{НОМ}} = 25 \text{ А}$	32,5	33,0	34,0	32,0	33,0	34,0	33,0
Рубильник Р $I_{\text{НОМ}} = 100 \text{ А}$	0,67	0,68	0,68	0,67	0,68	0,69	0,68
Пакетный выключатель ПВЗ-60 $I_{\text{НОМ}} = 63 \text{ А}$	1,06	1,08	1,08	1,07	1,08	1,09	1,08

На рис. 5 представлены графики зависимостей сопротивлений аппаратов от номинального тока.

На основании метода наименьших квадратов, по полученным в эксперименте измерениям выявлена функциональная зависимость между эквивалентным сопротивлением контактных соединений коммутационного аппарата и величиной номинального тока аппарата (табл. 2).

В процессе эксплуатации оборудования систем цехового электроснабжения, одними из основных элементов которых являются коммутационные аппараты, в результате износа происходит переход с одного уровня работоспособности (функционирования) на другой, более низкий.

Работоспособность контактов предлагается оценивать зависимостью сопротивлений контактных соединений аппаратов от числа переключений. Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_0 увеличивается и достигает критического значения $R_{\text{кр}}$, при котором происходит

отказ коммутационного аппарата.

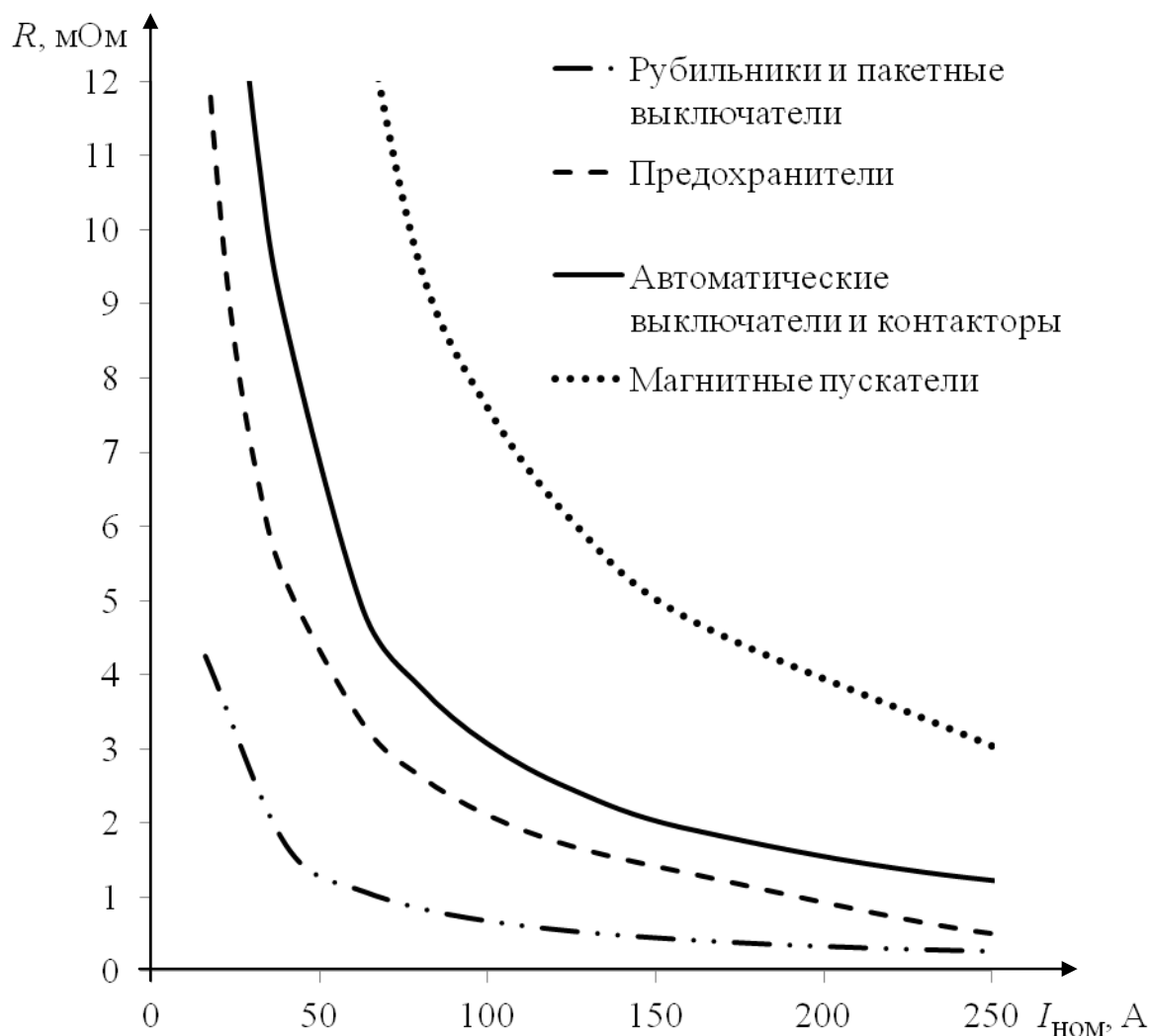


Рис. 5. Графики зависимостей сопротивлений аппаратов от номинального тока

Под отказом контактов наиболее часто понимается превышение контактным сопротивлением некоторого порогового значения. В связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения

$$R_{кр} = a \cdot R_0, \quad (5)$$

где a – коэффициент, зависящий от типа аппарата.

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_0 вычисляется на основании выражений, представленных в табл. 2.

**Аналитические зависимости сопротивлений контактных соединений
коммутационных аппаратов от номинального тока**

Аппараты	Номинальный ток $I_{\text{ном}}, \text{А}$	Аналитическая зависимость сопротивления от номи- нального тока
Магнитные пускатели	< 70	$R = 825 / I_{\text{ном}}$
	≥ 70	$R = 760 / I_{\text{ном}}$
Автоматические выключате- ли и контакторы	< 60	$R = 349 / I_{\text{ном}}$
	≥ 60	$R = 307 / I_{\text{ном}}$
Предохранители	< 200	$R = 210 / I_{\text{ном}}$
	≥ 200	$R = 125 / I_{\text{ном}}$
Рубильники и пакетные выключатели	Любое значение	$R = 68 / I_{\text{ном}}$

Сопротивление контактов можно рассматривать как случайную функцию количества коммутационных циклов $r(z)$

$$r(z) = R_0 + \int_0^z v dz, \quad (6)$$

где R_0 – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата; v – скорость изменения сопротивления контактов;
или

$$r(z) = R_0 + vz. \quad (7)$$

Параметры R_0 и v с достаточной степенью достоверности можно считать некоррелированными (независимыми), так как R_0 определяется качеством производственного процесса, а величина v для конкретной конструкции аппарата – совокупностью факторов эксплуатационного характера.

Установлено, что эмпирические функции сопротивлений контактов аппаратов описываются нормальным законом. Полученный вывод позволяет применить метод малой выборки Стьюдента для расчета среднего значения начального сопротивления контактных соединений всей генеральной совокупности аппаратов с требуемой доверительной вероятностью.

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} f(r) dr. \quad (8)$$

Нижний предел интегрирования r_0 определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления $r_{\text{кр}}$ всей выборки значений сопротивлений аппаратов.

Так как текущие значения $r(z)$ распределяются по нормальному закону, то

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left(-\frac{r-r_{\text{ср}}}{2\sigma_r^2}\right) dr, \quad (9)$$

где $r_{\text{ср}}$ – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов; σ_r – среднее квадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций средние квадратические отклонения практически линейно зависят от времени (для коммутационных аппаратов можно считать от количества циклов), т.е.

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (10)$$

где σ_v – среднее квадратическое отклонение скорости изменения сопротивления контактов v .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций $f(z)$ необходимо продифференцировать выражение (8) по количеству циклов. Вместо r и σ_r подставляются значения $r(z)$ и $\sigma_r(z)$ из соотношений (6) и (10). Значение dr/dz представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (6)

$$dr = v dz \quad (11)$$

или

$$dr = \frac{r - r_{0.\text{ср}}}{z} dz. \quad (12)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}} \left\{ 3\sigma_{r0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{r0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{cp}}{\sigma_v} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + (r_{kp} - r_{0.cp}) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v_{cp}}{\sigma_v} - \frac{r_{kp} - r_{0.cp}}{\sigma_v z} \right)^2 \right] \right\}. \quad (13)$$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно S и S_1 , т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{cp}}, \quad S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{0.cp}}, \quad \theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{0.cp}}{v_{cp}}, \quad \theta_2 = \frac{r_{kp} - r_{0.cp}}{v_{cp}}.$$

Таким образом,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (14)$$

Вероятность безотказной работы контактов определяется по выражению

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} dz. \quad (15)$$

Практическое применение данного метода прогнозирования надежности контактов показано для магнитных пускателей (рис. 6).

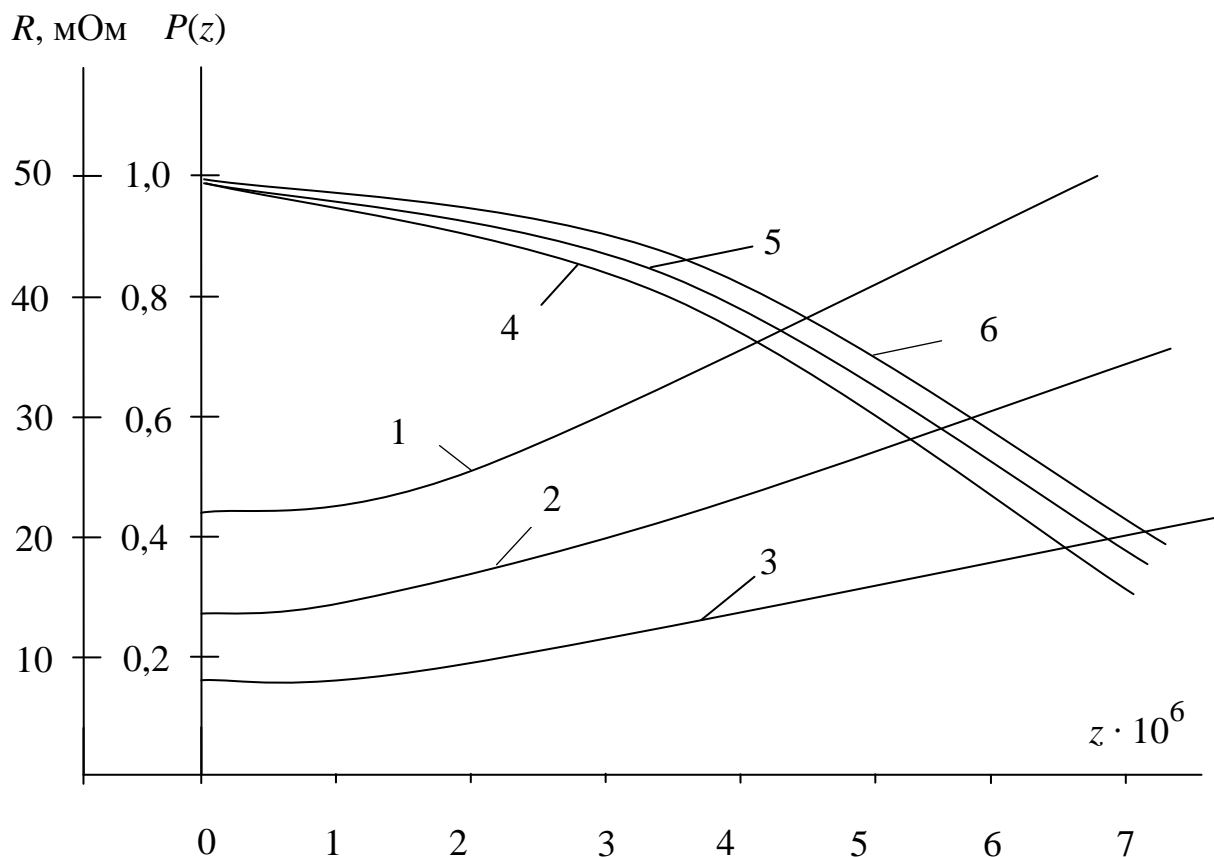


Рис. 6. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 1 – $I_H = 40$ А, 2 – $I_H = 63$ А, 3 – $I_H = 80$ А; зависимость вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 4 – $I_H = 40$ А, 5 – $I_H = 63$ А, 6 – $I_H = 80$ А

Износ контактов вызывает снижение надежности работы коммутационных аппаратов и рост потерь мощности в них. Это является весьма важным при определении потерь ЭЭ в цеховых сетях, где при короткой длине линий цеховых сетей эквивалентное сопротивление линии оказывается соизмеримым с сопротивлением коммутационного аппарата.

В четвертой главе приводятся теоретическое обоснование и практическая необходимость применения методов планирования эксперимента для построения математического описания функционирования систем цехового электроснабжения на базе достоверизации схемно-режимных параметров.

Определение потерь ЭЭ в цеховых сетях является задачей, решаемой в условиях неопределенности, поскольку имеется неопределенность в исходных данных, обусловленная неточными значениями длин и количества линий сети, температурными режимами, эксплуатационными характеристиками оборудования и т.п.

Наличие неопределенности в исходной информации ведет к тому, что фактические потери ЭЭ будут в большей или меньшей степени отличаться от их вычисленного значения. При этом возникает необходимость не только

получить вероятностно-статистические модели зависимости потерь ЭЭ сети от ее обобщенных параметров, но и наиболее точно рассчитать интервалы изменения этих параметров.

Для формирования регрессионных моделей, в которых функцией цели выступают потери мощности и эквивалентное сопротивление цеховой сети, в качестве факторов выбраны основные обобщенные характеристики радиальной сети:

x_1 – отношение суммарной длины линий цеховой сети к количеству линий, т.е. средняя длина линий

$$l_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n l_i / n, \quad (16)$$

где l_i – длина i -й линии цеховой сети, м; n – количество линий;

x_2 – величина, равная количеству линий n ;

x_3 – величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий сети $r_{\text{Э}20}$ при 20 °С

$$r_{\text{Э}20} = 31,3 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i}, \quad (17)$$

где S_i – сечение i -й линии, мм²; $31,3 / S_i$ – сопротивление 1 м алюминиевой линии сечением S_i при 20 °С, Ом/м; в случае, когда участок сети выполнен проводами или кабелями с медными жилами, используется величина $18,5 / S_i$;

x_4 – параметр квадрата среднеквадратичной загрузки линий сети

$$k_3^2 = \sum_{i=1}^n k_{3i}^2 / n, \quad (18)$$

где $k_{3i} = I_i / I_{\text{ном}i}$ – загрузка i -й линии; I_i – ток в i -й линии, А; $I_{\text{ном}i}$ – номинальный ток в линии S_i -го сечения, А;

x_5 – температура окружающей среды, θ_0 , °С.

С параметром фактора x_3 имеет прямую связь величина сопротивления коммутационных аппаратов, принятых к установке на линии данного сечения. Определив по значению x_3 номинальный ток линии, можно вычислить сопротивление аппарата, используя зависимости табл. 2. На основании статистиче-

ских данных считаем, что в среднем на линии цеховой сети установлены 2 автоматических выключателя.

В табл. 3 указаны первоначальные границы изменения факторов.

Таблица 3

Первоначальные границы изменения факторов

Фактор	$X_{i\min}$	$X_{i\text{cp}}$	$X_{i\max}$	$\Delta X_i = (X_{i\max} - X_{i\min}) / 2$
$x_1 \rightarrow l_{\text{cp}}, \text{ м}$	10	55	100	45
$x_2 \rightarrow n$	10	15	20	5
$x_3 \rightarrow r_{\text{э}20}, \text{ МОм/м}$	0,261	1,108	1,956	0,848
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,09	0,545	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0, ^\circ\text{C}$	5	20	35	15

Эквивалентное сопротивление радиальных сетей предлагается вычислять по выражению, в котором представлены все факторы,

$$R_{\text{э}} = \{r_{\text{э}20} \cdot l[1 + 0,004(\theta_{\text{ж}} - 20)] + \sum r_{\text{к}}\} \cdot 1/n; \quad (19)$$

$$\theta_{\text{ж}} = k_3^2(80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (20)$$

где $\theta_{\text{ж}}$ – температура жилы кабеля, 80 – допустимая температура нагрева жилы кабеля.

Для реализации поставленной задачи использован дробный факторный эксперимент (ДФЭ) типа 2^{5-1} с генерирующим соотношением $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$.

В результате вычислений и исключения незначимых коэффициентов получены регрессионные зависимости $R_{\text{э}}$ (эквивалентного сопротивления цеховой сети) и ΔP (потерь мощности)

$$R_{\text{э}} = 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + 0,23 x_5 - 1,3 x_1 x_2 - 3,19 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + 1,22 x_2 x_3 - 0,24 x_2 x_4 - 0,4 x_3 x_4 + 0,95 x_4 x_5; \quad (21)$$

$$\Delta P = 48 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + 3,34 x_5 - 12 x_1 x_2 -$$

$$+ 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + 3,62 x_2 x_3 - 13,9 x_2 x_4 + 9,8 x_3 x_4 - 10,5 x_3 x_5. \quad (22)$$

Для магистральных схем, линии которых, в большинстве случаев, представляют собой шинопроводы с распределенной электрической нагрузкой, в качестве факторов, определяющих потери мощности и эквивалентное сопротивление, выступают такие величины, как длина шинопровода, количество приемников, подключенных к шинопроводу и т.д.

Потери мощности в магистральных сетях определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 I_{\text{э}}^2 R_{\text{эш}}, \quad (23)$$

где $R_{\text{эш}}$ – эквивалентное сопротивление шинопровода вычисляемое по выражению

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{20} \cdot l \cdot \frac{1}{6(1+1/n_{\text{ш}})(2+1/n_{\text{ш}})} + r_{\text{п}}/n_{\text{ш}} \right] \cdot [1 + \alpha(\theta_{\text{ш}} - \theta_0)] + r_{\text{к}}/n_{\text{ш}} \quad (24)$$

Здесь r_{20} – сопротивление 1 м шинопровода при 20 °С, мОм; l – длина шинопровода, м; $n_{\text{ш}}$ – количество приемников, присоединенных к шинопроводу; $r_{\text{п}}$ – сопротивление провода ответвления от шинопровода, мОм; $I_{\text{э}}$ – эффективный ток, А; $r_{\text{к}}$ – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С; $\theta_{\text{ш}}$ – температура шинопровода, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С.

Интервалы изменения факторов и регрессионные зависимости определения $R_{\text{ш}}$ и $\Delta P_{\text{ш}}$ представлены в тексте диссертации.

В пятой главе обоснована целесообразность применения множественной регрессии для расчета и прогнозирования потерь ЭЭ в системах цехового электроснабжения в условиях неопределенности задания исходной информации.

В связи с возможной неопределенностью исходной информации о сети расширим границы изменения факторов.

Границы изменения факторов, а также их кодированные значения представлены в табл. 4.

Границы изменения факторов

Фактор	X_{imin}	X_{imax}	\tilde{x}_{imin}	\tilde{x}_{imax}
$x_1 \rightarrow l_{cp}, \text{ м}$	5	150	-1,1	2,1
$x_2 \rightarrow n$	6	24	-1,8	1,8
$x_3 \rightarrow r_{20}, \text{ мОм/м}$	0,21	3,13	-2,4	1,1
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,04	1,69	-1,1	2,5
$x_5 \rightarrow \theta_0, ^\circ\text{C}$	0	40	-1,3	1,3

Очевидно, что после расширения границ изменения факторов возникает вопрос о том, насколько правомерно это расширение. Не оказалась ли область изменения какого-либо фактора слишком заужена или наоборот значительно расширена. И в том, и в другом случае не будут получены достоверные сведения о функции цели, а именно об эквивалентном сопротивлении и потерях мощности (ЭЭ). В частности, зауженная область изменения какого-либо фактора не позволит рассмотреть более полно изменение функции цели, возможно упущение какого-либо критического значения. А чрезмерное расширение диапазона изменения факторов приведет к неоправданно громоздким и долгим расчетам.

Если учитывать, что x и z – это величины изменяющегося фактора, то их неразличимость указывает на то, что с изменением x на z значение эквивалентного сопротивления изменилось незначительно. Следовательно, интервал изменения между x и z можно изменить еще.

При этом отношение неразличимости можно представить в виде

$$x \approx z \leftrightarrow [\hat{y}(x) - \hat{y}(z)]^2 \leq \rho^2(x, z), \quad (25)$$

где x и z – значения факторов; $\hat{y}(x)$ и $\hat{y}(z)$ – значения функции цели при x и z соответственно; $\rho^2(x, z)$ – определенная на X симметричная, неотрицательная функция, порожденная неточностью модели $\hat{y}(x)$ и задающая порог различимости допустимых решений.

Результаты вычислений показывают, как изменяется функция цели R_3 – эквивалентное сопротивление сети – в зависимости от приращения факторов. В качестве оценочного критерия рассматривается параметр $[\hat{y}(x) - \hat{y}(z)]^2$ – квадрат разности значений функции цели при изменении параметров x и z соот-

ветственно. Чем ближе значение этого параметра к полученному – $\rho^2(x, z)$, тем более существенное влияние на функцию цели оказывает варьирование значений факторов. Другими словами, если выполняется условие $[y(x) - y(z)]^2 < \rho^2(x, z)$, то эквивалентное сопротивление сети меняется незначительно.

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее целесообразно разбивать на мелкие интервалы варьирования и расширять границы изменения таких факторов, как x_1 – средняя длина линий; x_2 – величина, равная количеству линий n ; x_3 – величина, равная среднему удельному сопротивлению линий сети $r_{э20}$ при 20 °С, так как для них $[y(x) - y(z)]^2 > \rho^2(x, z)$. Указанные факторы оказывают наибольшее влияние на величину эквивалентного сопротивления сети, поэтому имеет смысл более детально рассмотреть интервалы варьирования этих факторов.

В нечетком регрессионном анализе функция отклика (в нашем случае это потери мощности и эквивалентное сопротивление сети) и коэффициенты нечеткого уравнения регрессии представляются в виде нечетких множеств, имеющих треугольные функции принадлежности (рис. 7).

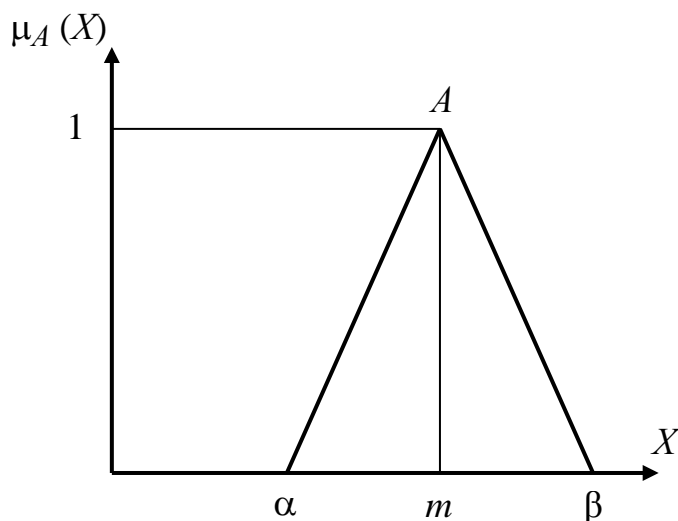


Рис. 7. Треугольная функция принадлежности $\mu_A(x)$ LR-типа

Значение функции принадлежности нечеткого множества A на основном интервале $[\alpha, \beta]$ можно вычислить, предварительно получив значение центра основного интервала m

$$m = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{2}; \quad (26)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L(m-x) & \text{для } x \in [\alpha, m], \\ R(x-m) & \text{для } x \in [m, \beta]. \end{cases} \quad (27)$$

При этом нечеткий регрессионный анализ позволяет найти интервал оценивания коэффициентов регрессии $b_0 \dots b_n$.

Точечные значения коэффициентов регрессии b_i используются в качестве первоначальных результатов обработки наблюдений. Их недостаток в том, что неизвестно, с какой погрешностью они воспроизводят оцениваемый параметр. В этом случае и решается задача о приближении коэффициента b_i не одним числом, а целым интервалом $\tilde{b}_i = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$.

Оценка искомого параметра считается интервальной, если она представлена двумя числами – концами интервала.

Задача интервального оценивания состоит в следующем: по данным выборки (т.е. используя полученные значения функций эквивалентного сопротивления и потерь мощности (ЭЭ)) рассчитать числовой интервал $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$, относительно которого с предварительно выбранной вероятностью γ можно сказать, что внутри этого интервала находится точное значение искомого параметра.

Таким образом, исходная информация о зависимых переменных – эквивалентном сопротивлении R_Σ и потерях мощности ΔP – задана детерминировано, что позволяет осуществлять построение как стандартной регрессионной модели, так и нечетких регрессионных моделей. Центральная линия регрессии комбинированного метода совпадает со стандартной линией регрессии, о чем свидетельствует равенство коэффициентов регрессии в уравнениях стандартной регрессии с коэффициентами, обозначающими выборочные средние значения. Однако наличие уравнений, содержащих доверительные интервалы, позволяет учесть вариант с неопределенной исходной информацией. Таким образом, если невозможно точно определить коэффициенты регрессии, то можно указать интервал, в котором находятся точные значения, что уже существенно облегчает расчеты. Кроме того, уменьшение надежности γ (доверительной вероятности, т.е. вероятности того, что в полученном интервале значений лежит истинное значение величины сопротивления линий и потерь мощности (ЭЭ) в линиях цеховой сети) приведет к сужению доверительного интервала, а, следовательно, и к увеличению точности оценки.

В результате проведения энергетического обследования низковольтных электрических сетей Казанского ОАО «Органический Синтез» для канализационной насосной станции (рис. 8) установлено соотношение сопротивлений линий и коммутационных аппаратов (рис. 9).

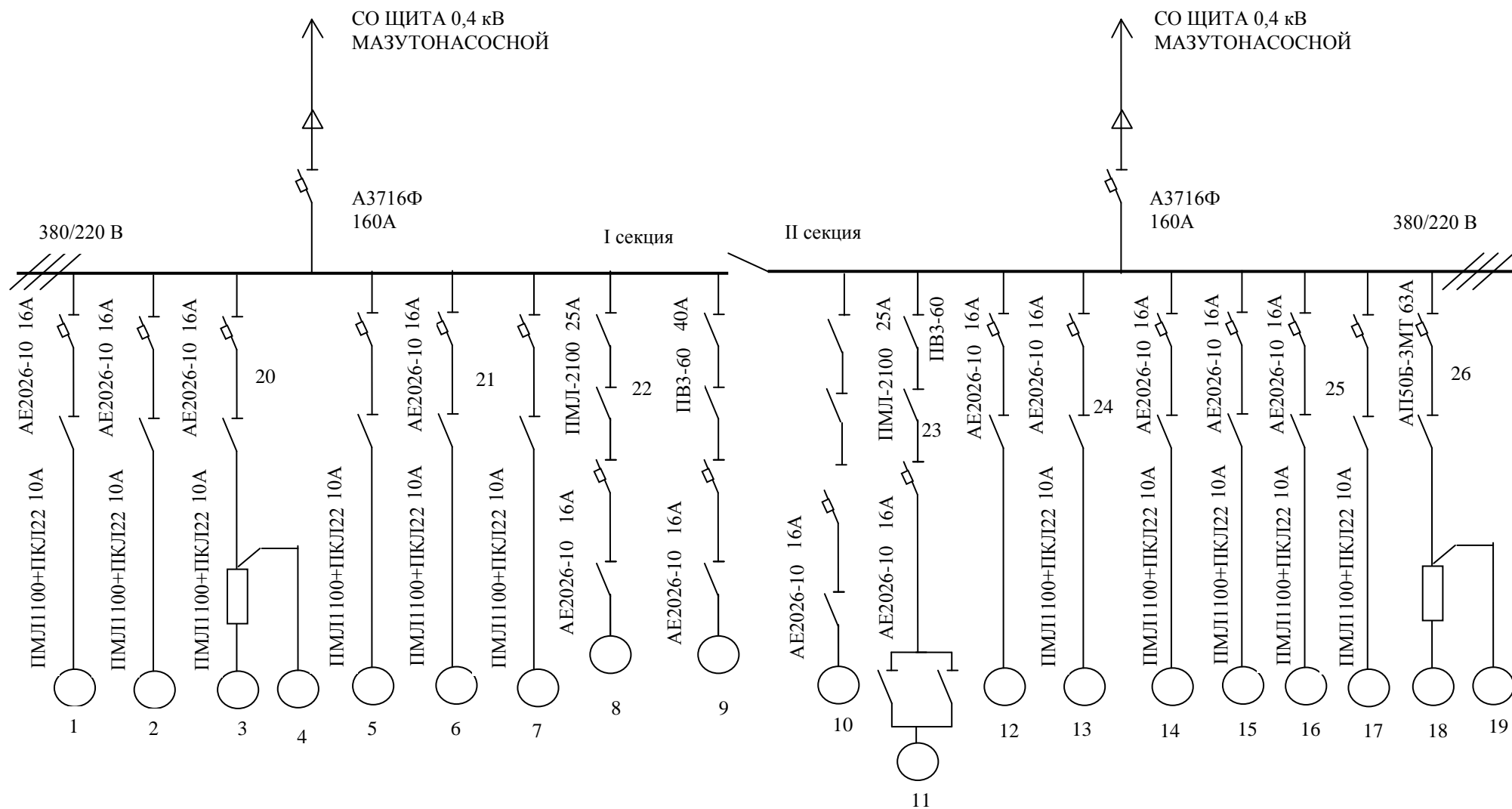


Рис. 8. Схема канализационной насосной станции

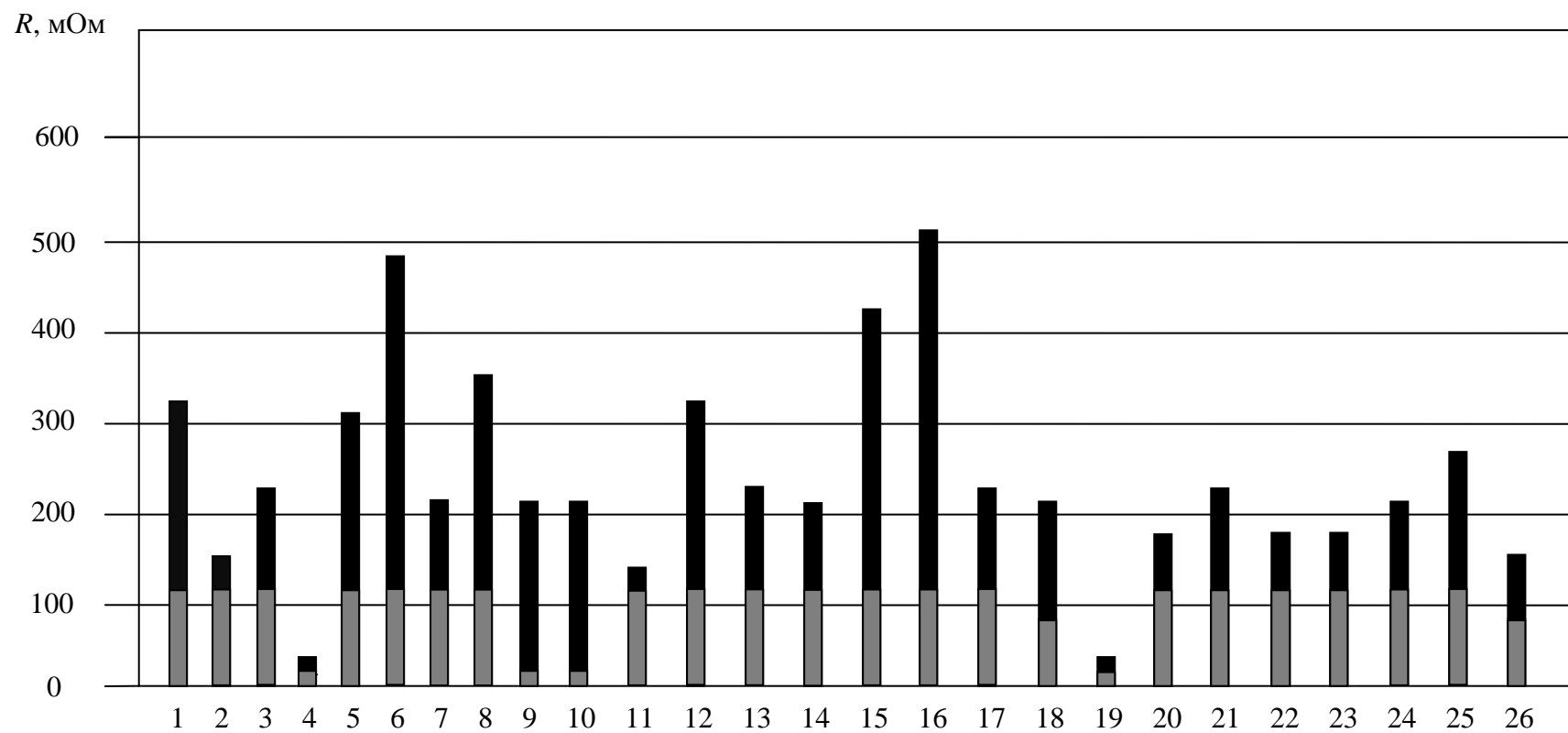


Рис. 9. Соотношение сопротивления линии R_L (■) и коммутационной аппаратуры R_K (■)

Технико-экономическая оценка показала, что для снижения уровня потерь в цеховой сети и экономии ЭЭ целесообразна замена на новые аппараты – автоматических выключателей и магнитных пускателей через 12 лет эксплуатации (рис. 10).

Величина потерь ЭЭ зависит от конфигурации сети, ее элементов, а также схемных и режимных параметров системы внутрицехового электроснабжения. Поэтому безотказная работа отдельных элементов системы напрямую определяет не только качество и надежность электроснабжения потребителей, но и минимальный уровень потерь ЭЭ.

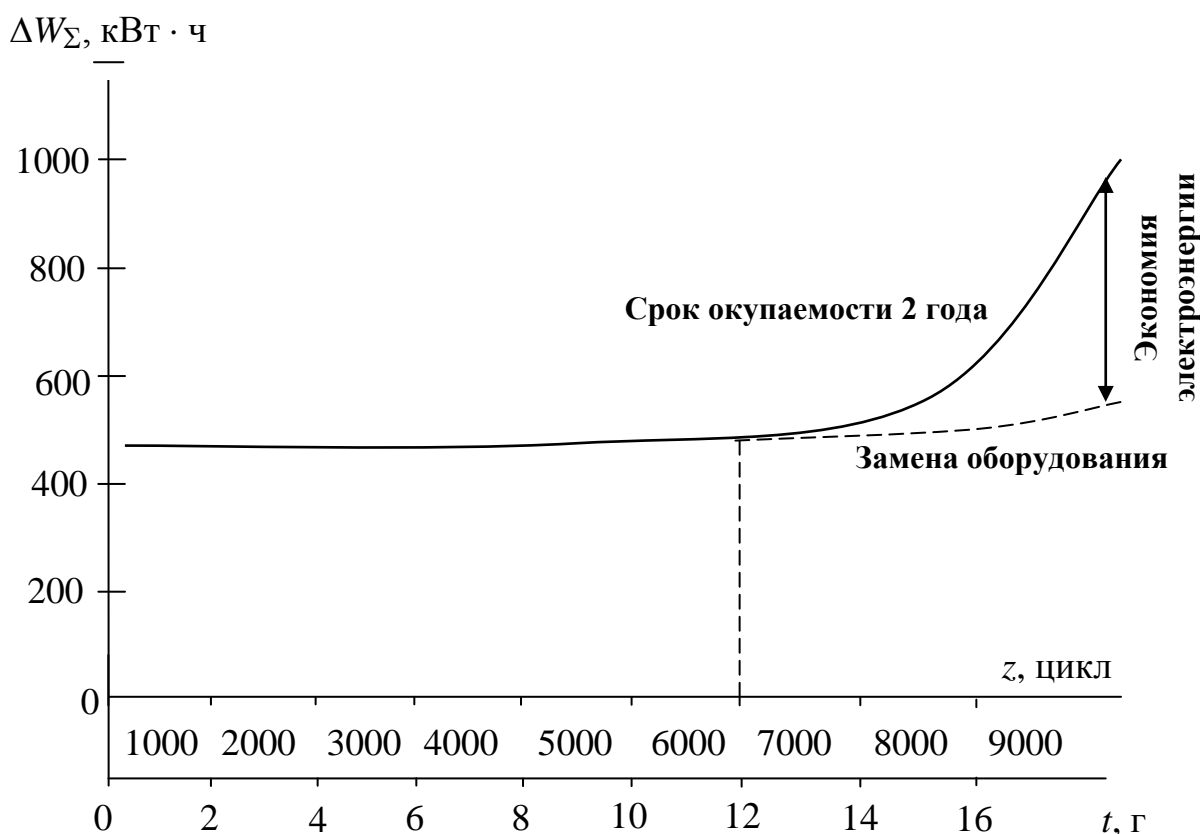


Рис. 10. Изменение величины потерь электроэнергии в линиях цеховой сети насосной станции в процессе эксплуатации в зависимости от времени и количества коммутационных циклов низковольтных аппаратов

Срок окупаемости при этом составит около двух лет и в дальнейшем приведет к годовой экономии ЭЭ в 5000 кВт·ч в год. При этом следует отметить, что силовая нагрузка и количество коммутационных аппаратов участка цеховой сети составляют менее сотой доли процента в объеме предприятия. Замена автоматических выключателей и магнитных пускателей после 12-ти лет эксплуатации позволяет снизить величину потерь ЭЭ до 50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в диссертации, решена актуальная научно-техническая проблема в области электроснабжения, имеющая важное значение для экономики страны и заключающаяся в развитии теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий, что обеспечивает рациональное внедрение принципов энергосбережения.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ современных методов определения потерь ЭЭ, который показал, что детерминированные методы имеют большие погрешности, связанные с отсутствием точной информации об исходных данных и принятием тех или иных допущений. Вероятностно-статистические методы расчета требуют большого количества исходной информации, а также сложных математических вычислений, что затрудняет их использование в случае многовариантного выполнения расчетов. Доказано, что при структурных изменениях схемы требуется периодическое исследование погрешностей методов расчета потерь. При выборе метода определения потерь ЭЭ необходимо соблюдать условие соответствия методической и информационной погрешностей. Определены области применения и выданы рекомендации по использованию методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Показано, что при расчетном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей необходимо иметь информацию о следующих параметрах оборудования:

- точном значении длин и количества линий цеховых сетей;
- перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;
- сопротивлении контактных соединений коммутационных аппаратов и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой и, при этом, сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;
- данных о графиках нагрузки.

3. По результатам экспериментальных исследований низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях промышленного электроснабжения, установлено, что по конструктивным особенностям аппараты можно разделить на следующие 3 группы:

- аппараты, имеющие кроме силовых контактов в силовой цепи добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле), такие как автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы;
- аппараты, имеющие относительно большое сопротивление силовой цепи, такие как предохранители;
- аппараты, имеющие только переходное сопротивление контактов, такие как рубильники, пакетные выключатели.

4. По результатам экспериментальных исследований выявлено, что сопротивления различных групп элементов силовой цепи аппаратов подчиняются общим для каждой группы закономерностям изменения, так, например, сопротивление болтовых присоединений подключения аппарата кабелем составляет незначительную долю в общем сопротивлении аппарата; основное сопротивление аппарата составляют сопротивления следующих элементов:

- контактной группы;
- датчика теплового реле;
- катушки максимального реле.

5. По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработаны методы и аналитические выражения для определения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от их номинальных данных и построены номограммы.

6. В результате экспериментальных исследований предложен критерий оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого выступает сопротивление контактных соединений, позволяющий учесть динамику изменения потерь мощности, и установлены коэффициенты кратности (превышения) значения сопротивления контактов по величине их допустимого перегрева относительно номинальных значений.

7. Разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

8. Установлено, что для оценки и прогнозирования потерь ЭЭ в цеховых сетях целесообразно разрабатывать регрессионные модели определения эквивалентного сопротивления цеховых сетей в функции основных параметров оборудования, как длина, загрузка и сечение линий сети, количество коммутационных аппаратов на линии и температура окружающей среды. Эти модели учитывают динамику изменения схемных и режимных характеристик электрических сетей, а значит, пригодны для многократного использования.

Обосновано, что целесообразно формировать графические зависимости, позволяющие определять эквивалентное сопротивление цеховых сетей любой конфигурации.

9. Показано, что разработанные регрессионные модели при доступном объеме исходной информации обеспечивают достаточную (10 %) точность, подтвержденную поэлементным расчетом для схем цеховых сетей различной конфигурации.

10. Разработаны методы и математические модели нечеткого регрессионного анализа для случая неопределенности задания исходной информации, что приводит к увеличению точности оценки потерь ЭЭ.

Положения диссертации опубликованы в следующих основных работах:

Публикации по перечню рецензируемых изданий ВАК.

1. Грачева Е.И. Оценка величины потерь электроэнергии в низковольтных коммутационных аппаратах / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2009. –

№ 7–8. – С. 74–81. (авт. уч. 8 с.)

2. Грачева Е.И. Прогнозирование изменения сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов различными методами / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8. – С. 44–52. (авт. уч. 9 с.)

3. Грачева Е.И. Расчетное определение потерь электроэнергии в цеховых сетях / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2009. – № 11–12. – С. 51–59. (авт. уч. 9 с.)

4. Грачева Е.И. Анализ надежности цеховых сетей / Е.И. Грачева, Е.Е. Гиззатуллина // Проблемы энергетики. – 2003. – № 5–6. – С. 166–169. (авт. уч. 2 с.)

5. Грачева Е.И. Анализ потерь электроэнергии систем цехового электропитания / Е.И. Грачева, Н.А. Копытова // Проблемы энергетики. – 2011. – № 9–10. – С. 78–85. (авт. уч. 4 с.)

6. Грачева Е.И. Анализ структуры систем цехового электропитания предприятий машиностроительной отрасли / Е.И. Грачева, Н.А. Копытова // Проблемы энергетики. – 2011. – № 5–6. – С. 73–78. (авт. уч. 3 с.)

7. Грачева Е.И. Анализ функциональных параметров и структуры систем внутрицехового электропитания / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 1–2. – С. 99–106. (авт. уч. 4 с.)

8. Грачева Е.И. Вероятностное прогнозирование изменения сопротивления изоляции кабелей и проводов линий цеховых сетей / Е.И. Грачева, М.Н. Золотарская // Проблемы энергетики. – 2008. – № 5–6. – С. 63–67. (авт. уч. 3 с.)

9. Грачева Е.И. Исследование надежности функционирования цеховых сетей / Е.И. Грачева, Д.Х. Нагуманова // Проблемы энергетики. – 2004. – № 11–12. – С. 50–55. (авт. уч. 3 с.)

10. Грачева Е.И. Исследование тепловых процессов в замкнутых контактах низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Проблемы энергетики. – 2004. – № 5–6. – С. 103–106. (авт. уч. 2 с.)

11. Грачева Е.И. Метод нечеткого регрессионного анализа для определения потерь электроэнергии в цеховых сетях / Е.И. Грачева, Н.А. Трусова // Проблемы энергетики. – 2007. – № 9–10. – С. 63–72. (авт. уч. 5 с.)

12. Грачева Е.И. Моделирование законов изменения потерь мощности в автоматических выключателях / Е.И. Грачева, И.В. Ившин, Ю.И. Солуянов, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова // Проблемы энергетики. – 2012. – № 3–4. – С. 81–90. (авт. уч. 3 с.)

13. Грачева Е.И. Оперативное прогнозирование режима электропотребления / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова, В.А. Хатанов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 27–29. (авт. уч. 1 с.)

14. Грачева Е.И. Определение расхода электроэнергии на основе математической модели / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова // Промышленная энергетика. – 1999. – № 4. – С. 24–25. (авт. уч. 1 с.)

15. Грачева Е.И. Оценка величины потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 1–2. – С. 108–117. (авт. уч. 5 с.)

16. Грачева Е.И. Прогнозирование надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Проблемы энергетики. – 2005. – № 1–2. – С. 95–99. (авт. уч. 3 с.)
17. Грачева Е.И. Расчет сопротивления стягивания контактных соединений / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 1–2. – С. 147–153. (авт. уч. 4 с.)
18. Грачева Е.И. Реализация метода прогнозирования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Промышленная энергетика. – 2011. – № 11. – С. 16–25. (авт. уч. 5 с.)
19. Грачева Е.И. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений сопротивлений коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 11–12. – С. 176–180. (авт. уч. 3 с.)
20. Грачева Е.И. Структурно-балансовая модель промышленного предприятия / Е.И. Грачева, Р.С. Сайтбаталова, Р.У. Галеева // Проблемы энергетики. – 1999. – № 11–12. – С. 82–88. (авт. уч. 3 с.)
21. Грачева Е.И. R-оптимальные планы для исследования систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, Н.А. Труслова // Проблемы энергетики. – 2007. – № 7–8. – С. 72–81. (авт. уч. 5 с.)
22. Грачева Е.И. Некоторые вопросы анализа статической устойчивости систем электроснабжения / Р.С. Сайтбаталова, Е.И. Грачева // Электричество. – № 4. – 2001. – С. 2–4. (авт. уч. 1,5 с.)
23. Грачева Е.И. Влияние теплофизических процессов на нагрев контактов низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 2–5. (авт. уч. 2 с.)
24. Грачева Е.И. Влияние технического состояния систем контактного соединения низковольтных коммутационных аппаратов на эксплуатационные характеристики цеховых сетей / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Промышленная энергетика. – 2006. – № 7. – С. 14–18. (авт. уч. 2 с.)
25. Грачева Е.И. Отказы электрооборудования цеховых низковольтных сетей и выявление законов распределения из вероятностных характеристик / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2013. – № 3–4. – С. 68–74. (авт. уч. 4 с.)
26. Грачева Е.И. Выбор критерия оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2010. – № 1–2. – С. 46–53. (авт. уч. 3 с.)
27. Грачева Е.И. Особенности исследования надежности низковольтных аппаратов цеховых сетей / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2008. – № 9–10. – С. 44–51. (авт. уч. 3 с.)
28. Грачева Е.И. Особенности определения эффективности функционирования цеховых сетей / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 9–10. – С. 58–66. (авт. уч. 4 с.)
29. Грачева Е.И. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2005. – № 9–10. – С. 47–55. (авт. уч. 4 с.)

30. Грачева Е.И. Учет нагрева элементов цеховых сетей при определении потерь электроэнергии / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 5–6. – С. 86–91. (авт. уч. 3 с.)
31. Грачева Е.И. Сравнительное исследование эксплуатационных характеристик низковольтных аппаратов / А.В. Шагидуллина, Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2011. – № 1–2. – С. 46–55. (авт. уч. 5 с.)
32. Грачева Е.И. К расчету потерь электроэнергии в цеховых сетях / В.В. Шевченко, Е. И. Грачева // Промышленная энергетика. – 1996. – № 7. – С. 27–28. (авт. уч. 1 с.)
33. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в цеховых сетях напряжением до 1000 В / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 2001. – № 10. – С. 33–35. (авт. уч. 2 с.)
34. Грачева Е.И. Определение сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 2002. – № 1. – С. 42–43. (авт. уч. 1 с.)
35. Грачева Е.И. Оценка сопротивлений контактных соединений коммутационной аппаратуры на основе статистической информации / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2013. – № 1–2. – С. 45–56. (авт. уч. 8 с.)
36. Грачева Е.И. Классификация низковольтных коммутационных аппаратов по техническим и конструктивным особенностям. / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2013. – № 7–8. – С. 60–67. (авт. уч. 5 с.)
37. Грачева Е.И. Исследование показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей. / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 73–80. (авт. уч. 5 с.)
38. Грачева Е.И. Методика проведения эксперимента по определению сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2014. – № 1–2. – С. 51–59. (авт. уч. 5 с.)
39. Грачева Е.И. Расчет сопротивлений контактных соединений и потерь мощности автоматических выключателей. / Е.И. Грачева, О.В. А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, А.Н. Хаерова // Главный энергетик. – 2013. – № 9. – С. 23–27. (авт. уч. 2 с.)
40. Грачева Е.И. Применение методики оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и цеховых сетей. / Е.И. Грачева, О.В. А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 11. – С. 23–28. (авт. уч. 2 с.)
41. Грачева Е.И. Прогнозирование надежности электрооборудования цеховых сетей. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 2. – С. 28–33. (авт. уч. 3 с.)
42. Грачева Е.И. Разработка алгоритма оценки надежности низковольтных коммутационных аппаратов на основе статистических данных. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Надежность и безопасность энергетики.

– 2014. – №1(24). – С. 49–52. (авт. уч. 2 с.)

43. Грачева Е.И. Учет схемно-режимных факторов при расчете потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ. / Е.И. Грачева, А.Н. Шакиров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 38–44. (авт. уч. 4 с.)

Прочие опубликованные работы.

44. Грачева Е.И. Влияние эксплуатационных характеристик электрооборудования на функциональные параметры систем внутризаводского электроснабжения / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2010. – № 8. – С. 29–32. (авт. уч. 2 с.)

45. Грачева Е.И. Некоторые вопросы работы электрических сетей и систем: учеб. пособие / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 108 с.

46. Грачева Е.И. Некоторые особенности анализа надежности и потерь в элементах систем электроснабжения: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 259 с.

47. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.И. Грачева. – М.: МЭИ, 1996. – 17 с.

48. Грачева Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 128 с.

49. Грачева Е.И. Потребление электроэнергии и электрические нагрузки: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 112 с.

50. Грачева Е.И. Применение ЭВМ для исследования систем электроснабжения промышленных предприятий: учеб. пособие / Е.И. Грачева. – 2-е изд. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 55 с.

51. Грачева Е.И. Расчеты потерь энергии в распределительных сетях низкого напряжения / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики: Материалы докл. респ. науч. конф. – Казань: Казан. фил. МЭИ (ТУ), 1996. – С. 41–42. (авт. уч. 2 с.)

52. Грачева Е.И. Составление и анализ балансов потребления электрической энергии промышленными предприятиями: учеб. пособие / В.Ю. Белашов, В.О. Иванов, Е.И. Грачева. //– Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. – 148 с. (авт. уч. 100 с.)

53. Грачева Е.И. Инновационные направления развития ОАО «Сетевая компания» Республики Татарстан / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, Р.Ю. Хабибуллин // Электрика. – 2012. – № 8. – С. 7–11. (авт. уч. 2 с.)

54. Грачева Е.И. Расчетно-экспериментальное исследование сопротивлений контактных систем автоматических выключателей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова // Электрика. – 2013. – № 3. – С. 20–26. (авт. уч. 3 с.)

55. Грачева Е.И. Особенности компоновки и технические характеристики оборудования систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 25–28. (авт. уч. 2 с.)

56. Грачева Е.И. Некоторые аспекты энергоанализа основных энергетических показателей России и Германии / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2013. – № 6. – С. 31–34. (авт. уч. 2 с.)

57. Грачева Е.И. Расчет вероятности безотказной работы и контактного сопротивления низковольтных аппаратов с использованием программы Matlab-Simulink / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2013. – № 6. – С. 43–48. (авт. уч. 3 с.)

58. Грачева Е.И. Моделирование оценки погрешности расчета эквивалентных сопротивлений цеховых сетей с использованием метода статистических испытаний / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2013. – № 9. – С. 17–20. (авт. уч. 2 с.)

59. Грачева Е.И. Моделирование параметров надежности элементов цеховых сетей / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2013. – № 11. – С. 34–38. (авт. уч. 2 с.)

60. Грачева Е.И. Анализ параметрической надежности электрических контактов: монография / Е.И. Грачева. // – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 144 с.

61. Грачева Е.И. Вероятностно-статистические и детерминированные способы расчета потерь электроэнергии в низковольтных сетях промышленных предприятий / Е.И. Грачева // Материалы докл. итоговой науч. конф. профессорско-преподавательского состава. – Казань: Казан. фил. МЭИ (ТУ), 1995. – С. 9–10. (авт. уч. 2 с.)

62. Грачева Е.И. Исследование внутренней структуры изоляции электрооборудования цеховых сетей / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 13; под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск, 2006. – С. 192–201. (авт. уч. 5 с.)

63. Грачева Е.И. Исследование параметров системы электроснабжения с использованием методов нечеткого регрессионного анализа / Е.И. Грачева, Р.Г. Идиятуллин // Электрика. – 2010. – № 2. – С. 15–20. (авт. уч. 6 с.)

64. Грачева Е.И. Исследование показателей надежности автоматических выключателей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Шагидулина // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения) 1–3 июня 2011 г. В 2 т. Т. 1. – Электроэнергетика. – Иваново, 2011. – С. 206–208. (авт. уч. 1 с.)

65. Грачева Е.И. Зависимость срока службы автоматических выключателей от эксплуатационных характеристик / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева, А.В. Рыбакова // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения) 29–31 мая 2013 г. В 2 т. Т. 1. – Электроэнергетика. – Иваново, 2013. – С. 251–254. (авт. уч. 1 с.)

66. Грачева Е.И. Исследования эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2011. – № 6. – С. 8–11. (авт. уч. 2 с.)

67. Грачева Е.И. Надежность электроэнергетических систем и их объектов: монография / Е.И. Грачева, Н.В. Денисова, В.О. Иванов. // – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 163 с. (авт. уч. 81 с.)

68. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий и пути повышения надежности их работы: учеб. пособие / Е.И. Грачева, В.О. Иванов, Н.В. Денисова. // – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008. – 271 с. (авт. уч. 135 с.)

69. Грачева Е.И. Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие / Е.И. Грачева, А. Р. Сафин. //– Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 120 с. (авт. уч. 60 с.)

70. Грачева Е.И. Применение R-оптимальных планов для исследования функциональных параметров систем электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, Р.Г. Идиятуллин // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: Материалы докл. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием; под общ. ред. Б.И. Кудрина и Ю.В. Матюниной. В 2 т. Т. 1. – М.: МЭИ (ТУ), 2009. – С. 146–154.(авт. уч. 5 с.)

71. Грачева Е.И. Теплофизические процессы, влияющие на нагрев контактов низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение: Материалы науч.-техн. форума с международным участием «Высокие технологии – 2004» 24–28 мая 2004 г. – Ижевск, 2004. – С. 40–44. (авт. уч. 3 с.)

72. Грачева Е.И. Энергосбережение: монография / Е.И. Грачева, Н.В. Денисова, В.О. Иванов.// – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 296 с. (авт. уч. 140 с.)

73. Грачева Е.И. Комплексная оценка режимов электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 13; под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск, 2006. – С. 221–229. (авт. уч. 5 с.)

74. Грачева Е.И. Моделирование и оценка возможных погрешностей функциональных характеристик низковольтных аппаратов / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // IV Камские чтения: сб. докл. межрегион. науч.-практ. конф. 27 апреля 2012 г. В 3 ч. Ч. 3. / Ред. кол. Д.С. Садриев и др.; под ред. д-ра физ.-мат. наук С.Н. Тимергалиева. – Набережные Челны: Изд-во Кам. гос. инж.-эконом. акад., 2012. – С. 169–171. (авт. уч. 2 с.)

75. Грачева Е.И. Анализ параметров надежности автоматических выключателей российских и зарубежных производителей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидулина // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докл. 11-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 2 октября 2010 г.) / Под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. – Липецк: Изд. центр «Дефакто», 2010. – С. 214–217. (авт. уч. 2 с.)

76. Грачева Е.И. Структура энергобаланса промышленного предприятия / Е.И. Грачева, Р.У. Галеева, Р.С. Саитбаталова, И.А. Хатанова // Материалы докладов республиканской научно-технической конференции «Проблемы энергетики», посвященной 80-летию плана ГОЭЛРО и созданию Казанского государственного энергетического университета: тр. Казан. гос. энерг. ун-та, 2000. – С. 64–65. (авт. уч. 0,5 с.)

77. Грачева Е.И. Определение электропотребления промышленного предприятия на основе удельных норм расхода электроэнергии / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова, Р.У. Галеева, И.А. Хатанова // Материалы докладов республиканской научно-технической конференции «Проблемы энергетики», посвященной 80-летию плана ГОЭЛРО и созданию Казанского государственного

энергетического университета: тр. Казан. гос. энерг. ун-та, 2000. – С. 65. (авт. уч. 0,4 с.)

78. Грачева Е.И. Планирование электропотребления на основе математической модели / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова, Р.У. Галеева, И.А. Хатанова // Материалы докл. респ. науч.-техн. конф. «Проблемы энергетики», посвященной 80-летию плана ГОЭЛРО и созданию Казанского государственного энергетического университета: тр. Казан. гос. энерг. ун-та, 2000. – С. 73. (авт. уч. 0,4 с.)

79. Грачева Е.И. Оценка уровня потерь электроэнергии в цеховых сетях промышленного электроснабжения / Е.И. Грачева, Е.Е. Гиззатуллина // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докл. Всерос. школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН В.Е. Алемасова 2–4 октября 2002 г. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2002. – С. 102–103. (авт. уч. 1 с.)

80. Грачева Е.И. Моделирование влияния изменения параметров электрооборудования на величину эквивалентного сопротивления систем внутрицехового электроснабжения. / Грачева Е.И., Сафин А.Р., Шагидуллин А.В. // Электрика. – 2013. – № 7. – С. 2–6. (авт. уч. 3 с.)

81. Грачева Е.И. Разработка моделей оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. / Грачева Е.И., Рыбакова А.В., Шагидуллин А.В. // Электрика. – 2013. – № 8. – С. 37–41. (авт. уч. 3 с.)

82. Грачева Е.И. Исследование параметров системы электроснабжения с использованием методов регрессионного анализа с целью получения адекватных моделей / Р.Г. Идиятуллин, Е.И. Грачева // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: Материалы докл. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием; под общ. ред. Б.И. Кудрина и Ю.В. Матюниной. В 2 т. Т. 1. – М.: МЭИ (ТУ), 2009. – С. 122–131. (авт. уч. 5 с.)

83. Грачева Е.И. Нормирование расхода электрической энергии на промышленных предприятиях / В.О. Иванов, В.Ю. Белашов, Н.В. Денисова, Е.И. Грачева. // учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005. – 161 с. (авт. уч. 53 с.)

84. Грачева Е.И. Анализ систем цехового электроснабжения и потерь электроэнергии на предприятиях машиностроительной отрасли / Н.А. Копытова, Е.И. Грачева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. Семнадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов 24–25 февраля 2011 г. В 3 т. Т. 3. – М.: Издательский до МЭИ, 2011. – С. 335–337. (авт. уч. 2 с.)

85. Грачева Е.И. Учет нагрева элементов цеховых сетей низкого напряжения на величину потерь электроэнергии / О.В. Наумов, Е.И. Грачева // ХLI Неделя науки СПбГПУ: Материалы науч.-практ. конф. (с международным участием). Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012. – С. 58–59. (авт. уч. 1 с.)

86. Грачева Е.И. Методы оптимизации для исследования систем электроснабжения: учеб. пособие / Р.С. Саитбаталова, Е.И. Грачева, М.В. Блохин. // – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2001. – 76 с. (авт. уч. 30 с.)

87. Грачева Е.И. Математическое моделирование и оптимизация систем электроэнергетики: учеб. пособие / А.Р. Сафин, Е.И. Грачева. // – Казань: Казан.

гос. энерг. ун-т, 2012. – 80 с. (авт. уч. 50 с.)

88. Грачева Е.И. Применение пакета оптимизации «Optimization Toolbox» системы Matlab для выбора рациональной схемы электроснабжения / А.Р. Сафин, Е.И. Грачева // Электрика. – 2010. – № 12. – С. 24–26. (авт. уч. 1,5 с.)

89. Грачева Е.И. Моделирование законов надежности низковольтных аппаратов на основе статистической информации / А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, Е.И. Грачева // Электроэнергетика. «Энергия – 2012»: Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) 17–19 апреля 2012 г. В 3 т. Т. 3. – Иваново, 2012. – С. 80–83. (авт. уч. 2 с.)

90. Грачева Е.И. Сравнительный анализ технических параметров автоматических выключателей российских и зарубежных производителей / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Федоровские чтения 2012: Материалы докл. XLII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи 7–9 ноября 2012 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 104–106. (авт. уч. 1 с.)

91. Грачева Е.И. Определение сопротивления контактных соединений автоматических выключателей различными способами / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Федоровские чтения 2011: Материалы докл. XVI Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи 9–11 ноября 2011 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 142–144. (авт. уч. 2 с.)

92. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в радиальных сетях низкого напряжения / Н.В. Анисимова, Е.И. Грачева // Федоровские чтения 2013: Материалы XLIII Международн. науч.-практ. конф. 6–8 ноября 2013 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 94–98. (авт. уч. 3 с.)

93. Грачева Е.И. Вероятностно-статистические модели определения эквивалентного сопротивления цеховой сети / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Федоровские чтения 2013: Материалы XLIII Международн. науч.-практ. конф. 6–8 ноября 2013 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 117–118. (авт. уч. 1 с.)

94. Грачева Е.И. Моделирование параметров надежности аппаратов, применяемых в цеховых сетях / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Федоровские чтения 2013: Материалы XLIII Международн. науч.-практ. конф. 6–8 ноября 2013 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 121–124. (авт. уч. 1 с.)

95. Грачева Е.И. Прогнозирование изменения функциональных параметров низковольтных аппаратов / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева, А.В. Рыбакова // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: Материалы докл. 8-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Севастополь, 2012. – С. 61–64. (авт. уч. 2 с.)

96. Грачева Е.И. Определение срока службы контактов автоматических выключателей / А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, Е.И. Грачева // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежная науч. конф.: сб. тр. В 5 т. Т. 2. – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 63–64. (авт. уч. 1 с.)

97. Грачева Е.И. Классификация методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Вузовская наука – региону: Материалы десятой Всерос. науч.-

техн. конф. В 2 т. Т. 1. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – С. 185–186. (авт. уч. 1 с.)

98. Грачева Е.И. Исследование погрешностей методов расчета потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежная науч. конф.: сб. тр. В 5 т. Т. 2. – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 61–62. (авт. уч. 1 с.)

99. Грачева Е.И. Исследование погрешностей методов расчета потерь электроэнергии в сетях промышленного электроснабжения / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Электроэнергетика. «Энергия – 2012»: Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) 17–19 апреля 2012 г. В 3 т. Т. 3. – Иваново, 2012. – С. 140–141. (авт. уч. 1 с.)

100. Грачева Е.И. Анализ цеховой сети промышленного предприятия / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Электроэнергетика. «Энергия – 2012»: Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) 17–19 апреля 2012 г. – Иваново, 2012. – С. 89–90. (авт. уч. 1 с.)

101. Грачева Е.И. Анализ методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Шакиров, Е.И. Грачева // Электрика, 2012. – № 11. – С. 26–28. (авт. уч. 2 с.)

102. Грачева Е.И. Анализ методик расчета потерь электроэнергии во внутризаводских сетях электроснабжения / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева. – М.: ВИНТИ РАН, 1995. – № 3. – С. 50. (авт. уч. 0,5 с.)

103. Грачева Е.И. Определение эквивалентного сопротивление линий цеховых сетей напряжением до 1000 В с учетом их технического состояния / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Электроснабжение, энергосбережение и электроремонт: Тез. докл. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. Б.И. Кудрина, Б.В. Жилина / РХТУ им Д.И. Менделеева, Новомосковский институт. – Новомосковск, 2000. – С. 7–9. (авт. уч. 2 с.)

104. Грачева Е.И. Расчет потерь электроэнергии в цеховых сетях. / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Электрооборудование, электроснабжение, электропотребление: Тез. докл. науч.-техн. метод. конф. (Москва, 15–17 ноября 1995 г.). Под общей ред. Б.И. Кудрина. – М.: Электрика, 1995. – С. 35–36. (авт. уч. 1 с.)

105. Грачева Е.И. Оптимальное размещение трансформаторных подстанций в системе электроснабжения промышленного предприятия. / А.Р. Сафин, Е.И. Грачева // Электрика. – 2014. – № 2. – С. 2–8. (авт. уч. 2 с.)

Подписано в печать. Объем 2,3 п.л.

Тираж экз. Заказ № .

Типография Издательства Казанского государственного
энергетического университета

420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51