

На правах рукописи

Шагидуллин Андрей Владиславович

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ
ПО ЭКВИВАЛЕНТНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.09.03 -
Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Грачева Елена Ивановна

Официальные оппоненты: **Федоров Олег Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Управление инновационной деятельностью», профессор;

Табачникова Татьяна Владимировна,
кандидат технических наук, доцент, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра электроэнергетики, доцент.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет».**

Защита состоится «14» октября 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний Ученого совета, к. 301.

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

Автореферат разослан « 10 » 08 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших проблем обеспечения эффективного функционирования систем электроэнергетики и промышленных предприятий является планирование электропотребления. Службы энергосистем, составляя планы на последующие сутки, месяц, год, решают задачу планирования электропотребления – соотношения между потребности в электроэнергии и методами ее удовлетворения. Согласно Федеральному закону от 23.11.2009 N 261 - ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» все промышленные предприятия и объекты электроэнергетики должны проводить энергообследование и разрабатывать планы мероприятий по энергосбережению с целью повышения энергоэффективности. В современных экономических условиях планирование электропотребления – один из определяющих факторов эффективной работы оборудования, что является составной частью общей концепции развития промышленности.

Задача планирования электропотребления состоит в расчете ожидаемых графиков нагрузки и анализе факторов, влияющих на их изменение. В зависимости от количества учитываемых факторов различают одно- и многофакторные методы.

Однако, несмотря на существенную значимость и возрастающую актуальность проблемы повышения достоверности объемов планируемых расходов электроэнергии на промышленных предприятиях, она не решена в достаточной степени из-за отсутствия необходимых данных по определению искомым закономерностей расходов электрической энергии промышленными электропотребителями, выявлению и оценке возможных способов энергосбережения. Решению этих задач посвящена диссертационная работа.

Степень разработанности. Решению задач совершенствования и развития методов планирования электропотребления посвящены работы Бляхера Р.М., Богданова В.А., Гамазина С.И., Германа И.М., Головкина П.И., Грачевой Е.И., Ежилова В.Х., Кароля Н.Б., Коновалова Ю.С., Конюховой Е.А., Крумма Л.А., Кугелевичуса И.Б., Львова Ю.А., Макоклюева Б.И., Мамедярова О.С., Рабиновича М.А., Резникова В.П., Седова А.В., Ставровского А.Н., Шевченко В.В. и других. В известных работах недостаточно точно определены потери электроэнергии в цеховых сетях промышленных предприятий, алгоритмы расчета которых представлены в диссертационной работе.

Целью работы является разработка методики планирования расхода электроэнергии на промышленных предприятиях по эквивалентному сопротивлению цеховых сетей.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- 1) анализ современного состояния рынка низковольтных коммутационных аппаратов при решении задач импортозамещения;
- 2) исследование влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- 3) разработка алгоритмов и моделей учета влияния факторов на определение эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей;
- 4) разработка математических моделей планирования расхода электроэнергии на основе эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- 5) разработка мероприятий, направленных на снижение электропотребления на промышленных предприятиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) предложены принципы и методы эквивалентирования распределительных электрических сетей низкого напряжения, основанные на равенстве эквивалентного сопротивления в исходной схеме и ее модели, позволяющие достоверно определять и анализировать величину потерь электроэнергии;
- 2) впервые разработаны алгоритмы и математические модели учета основных параметров электрооборудования, определяющих эквивалентное сопротивление низковольтных цеховых сетей;
- 3) разработана новая методика планирования электропотребления промышленными предприятиями, основанная на моделировании эквивалентного сопротивления цеховых сетей с учетом установленных низковольтных коммутационных аппаратов;
- 4) программная реализация разработанной методики планирования электропотребления промышленными предприятиями;
- 5) выработаны рекомендации по снижению электропотребления промышленными предприятиями, реализуемые за счет замены низковольтных коммутационных аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные алгоритмы, методики и математические модели позволяют:

- 1) оценить влияние схемно-режимных факторов на точность расчёта эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей, минимизирована ошибка расчета этого показателя в зависимости от загрузки оборудования и структуры схемы;
- 2) оценивать и прогнозировать электропотребление промышленных предприятий с учетом уточненной величины потерь электроэнергии по эквивалентному сопротивлению цеховой сети;

3) снижать электропотребление промышленных предприятий, путем замены низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от отработанного ресурса.

Методология и методы диссертационного исследования определялись характером поставленных задач и опирались на положения теории электрических цепей, теории вероятностей и математической статистики, методы моделирования в среде MATLAB. Режимные исследования и расчеты выполнялись на ПЭВМ с использованием стандартных и специально разработанных алгоритмов и программ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей промышленных предприятий.

2. Методика планирования расхода электроэнергии на промышленных предприятиях, разработанная на основе моделирования эквивалентного сопротивления цеховых сетей промышленных предприятий.

3. Результаты исследований и рекомендации по замене низковольтных коммутационных аппаратов, направленные на снижение электропотребления на промышленных предприятиях.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы достигается использованием при решении поставленных задач математических методов, экспериментальной обоснованностью принятых допущений, сопоставлением результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международных молодежных конференциях «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2011, 2012, 2013, 2014), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011), Международных научно-практических конференциях «Федоровские чтения» (г. Москва, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), Межрегиональной научно-практической конференции «Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2012), Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012» (г. Севастополь, 2012), Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (г. Иваново, 2012, 2013), Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2012), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2013), XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых

«Современные техника и технологии» (г. Томск, 2013), Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2013), а также обсуждались на аспирантско-магистерских семинарах, посвященный «Дню энергетика» в КГЭУ.

Внедрение. Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- при определении прогнозного значения электропотребления, с выделением расхода электроэнергии на потери и технологию и при реализации программы замены низковольтных коммутационных аппаратов с учетом отработанного ресурса, что позволило снизить величину расхода электроэнергии на 1,5 % на участке низковольтной сети ПАО «Казаньоргсинтез» при применении разработанной методики;

- при определении величины эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем сетей и его использование для осуществления контроля потерь электроэнергии в процессе проектирования и формирования результатов энергоаудита промпредприятий в АО «Казанский Гипронефтепром»;

- в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 41 научная работа, из них в изданиях по перечню ВАК 9 статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований и 2-х приложений. Содержит 151 страницу основного машинописного текста, проиллюстрированного 45 рисунками и 34 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выявлена степень разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе выполнены обзор и анализ существующих методов планирования и прогнозирования электропотребления, рассмотрены основные задачи и сформулированы основные этапы реализации методики, выявлены особенности планирования расхода электроэнергии на промышленных предприятиях.

Вторая глава посвящена анализу современного состояния рынка низковольтных коммутационных аппаратов (НКА) и исследованию влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей.

Исследованы ассортимент и цена продукции отечественных ведущих фирм-производителей низковольтных аппаратов, таких как таких как ИЕК, ЕКФ, Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), завод «Контактор», Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ), Владикавказский завод «Электроконтактор» и «Дагэлектроавтомат»

Определены зависимости и построены графики потерь мощности в контактных системах автоматических выключателей и контакторов от номинального тока различных заводов-изготовителей (рис. 1, 2).

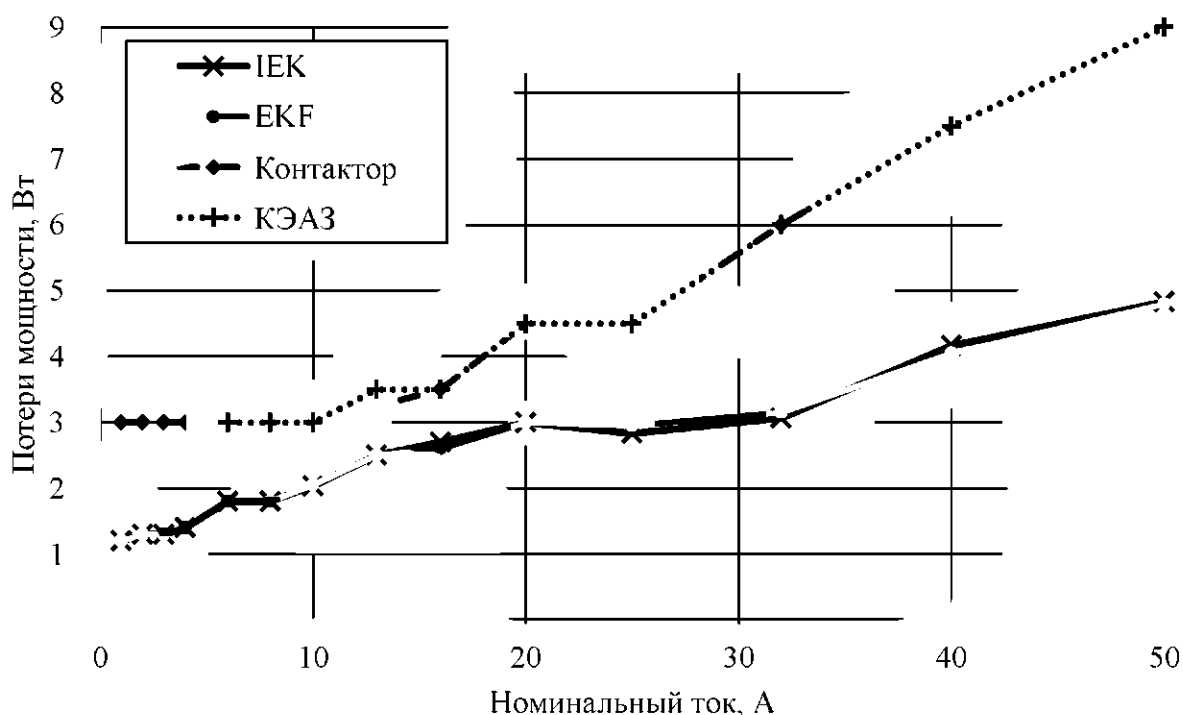


Рисунок 1 - Зависимости потерь мощности в контактных системах автоматических выключателей от их номинального тока ($I_H = 1 \div 50$ А)

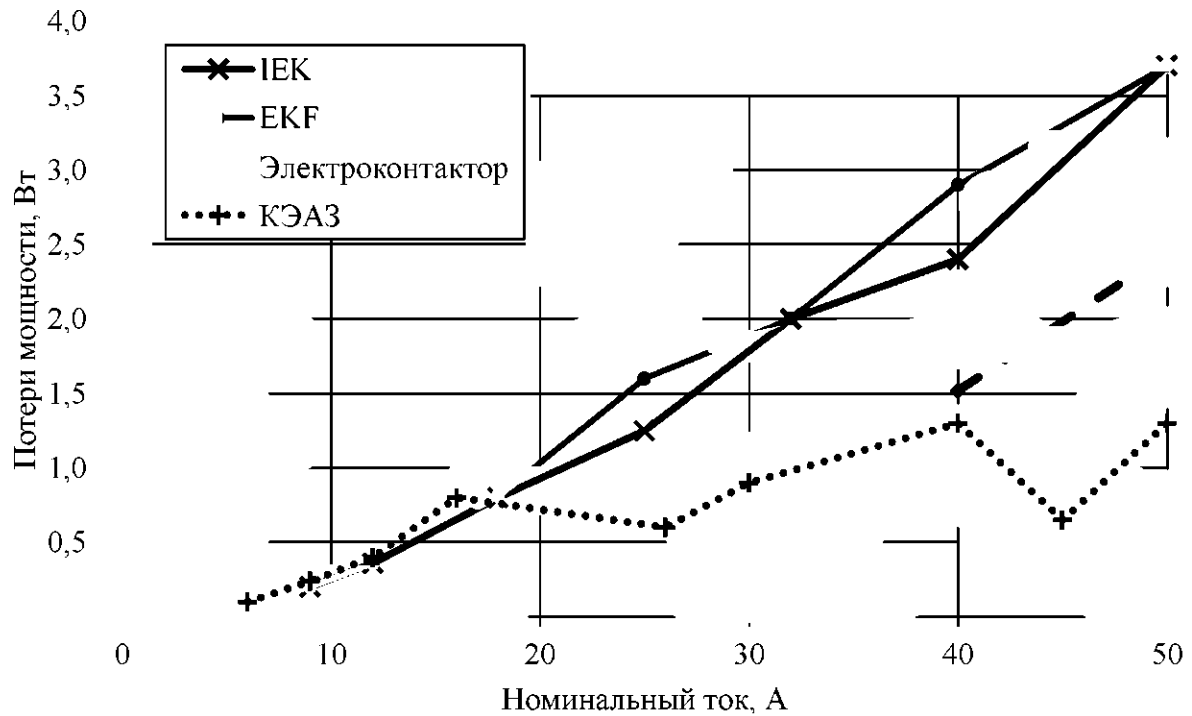


Рисунок 2 - Зависимости потерь мощности в контактных системах контакторов от их номинального тока ($I_H = 3 \div 50$ А)

Приведены экспериментальные исследования сопротивлений контактов и контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов микрометром МІ 3242. По полученным экспериментальным данным определены аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактных соединений аппаратов от номинального тока (табл. 1, 2).

Таблица 1 - Виды аппроксимирующих функций зависимостей сопротивлений контактных соединений автоматических выключателей от номинального тока

Фирма	Аппроксимирующая функция
IEK	$R_{ав} = 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot I_H^{-2,02} + 1,08$
EKF	$R_{ав} = 1,99 \cdot I_H^{-2} + 0,08 \cdot I_H^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
Контактор	$R_{ав} = 2,07 \cdot e^{0,02 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} - 0,43 \cdot I_H^{-2}$
КЭАЗ	$R_{ав} = 1,84 \cdot I_H^{-2} + 0,07 \cdot I_H^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$

Таблица 2 - Виды аппроксимирующих функций зависимостей сопротивлений контактных соединений контакторов и магнитных пускателей от номинального тока

Контакторы	IEK	$R_k = 4,84 \cdot 10^{-4} \cdot I_H^{-2,01} + 0,06$
	EKF	$R_k = -86,4 \cdot e^{-8,9 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} + 86 \cdot I_H^{-2}$
	Электро-контактор	$R_k = 0,18 \cdot I_H^{-2} + 0,01 \cdot I_H^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-4} - 4,48 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
	КЭАЗ	$R_k = 1,88 \cdot I_H^{-2} + 0,02 \cdot I_H^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
Магнитные пускатели	IEK	$R_{МП} = 6472 \cdot I_H^{-1,69}$
	EKF	$R_{МП} = -72,1 \cdot e^{-6,5 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} + 64 \cdot I_H^{-2}$
	Электро-контактор	$R_{МП} = 2,35 \cdot I_H^{-2} + 0,04 \cdot I_H^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-4} + 5,14 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
	КЭАЗ	$R_{МП} = 0,25 \cdot I_H^{-2} + 0,03 \cdot I_H^{-3} - 7,7 \cdot 10^{-4} + 5,12 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$

Исследована динамика изменения значений эквивалентного сопротивления ($R_{\text{экв}}$) участка цеховой сети (рис. 3) при учете и неучете основных параметров оборудования, таких как: температура нагрева проводников $\Theta_{\text{пр}}$; сопротивления коммутационных аппаратов $r_{i,\text{ап}}$ и k_3^2 - среднеквадратичный коэффициент загрузки линии.

Эквивалентное сопротивление радиальной сети определяется по выражению:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i,20} \cdot l_i \left[1 + \alpha (\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \sum_{i=1}^m r_{i,\text{ап}}}{n}, \quad (1)$$

где температура жилы проводника:

$$\Theta_{\text{пр}} = k_3^2 \cdot (T_{\text{доп}} - \Theta_{\text{окр}}) + \Theta_{\text{окр}}, \quad (2)$$

r_{20} – удельное сопротивление 1 м линии при 20°C , мОм/м; l – длина линии, м; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала провода линии; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы кабеля; $\Theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; n – количество приемников электроэнергии; m – количество аппаратов в схеме.

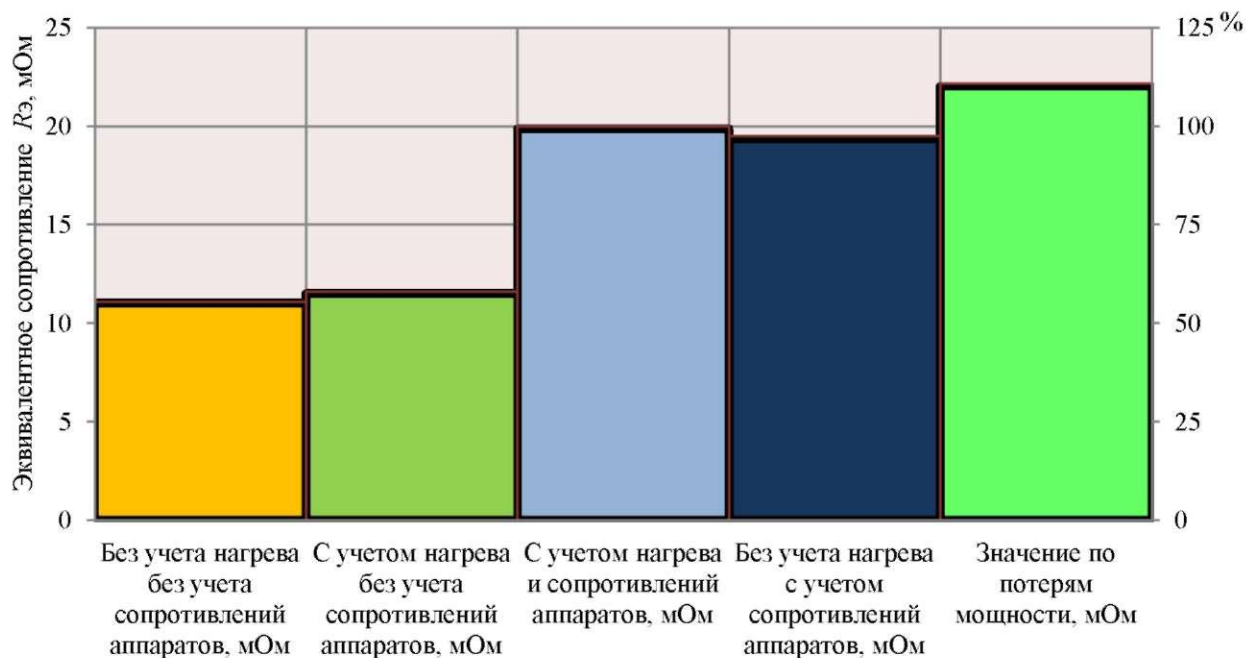


Рисунок 3 - Значения эквивалентного сопротивления радиального участка цеховой сети с учетом влияния основных параметров оборудования

Аналогичные исследования по изменению значений эквивалентного сопротивления при учете и неучете основных параметров оборудования проведены для схем с преобладанием магистральных линий, получающих питание от шинпровода.

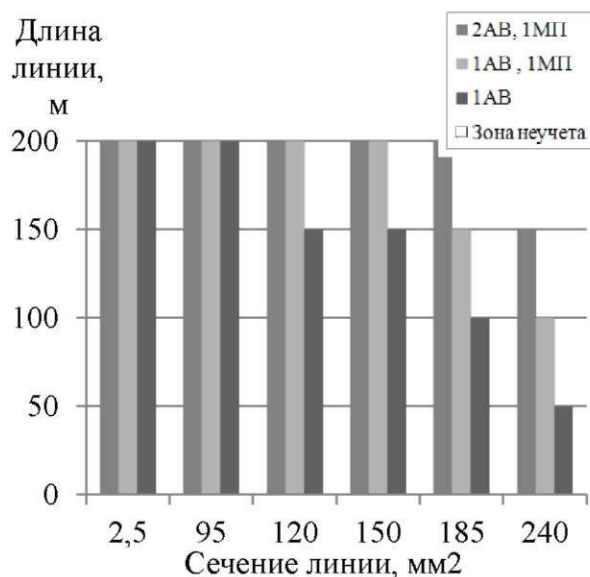


Рисунок 4 - Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 4 радиальными линиями

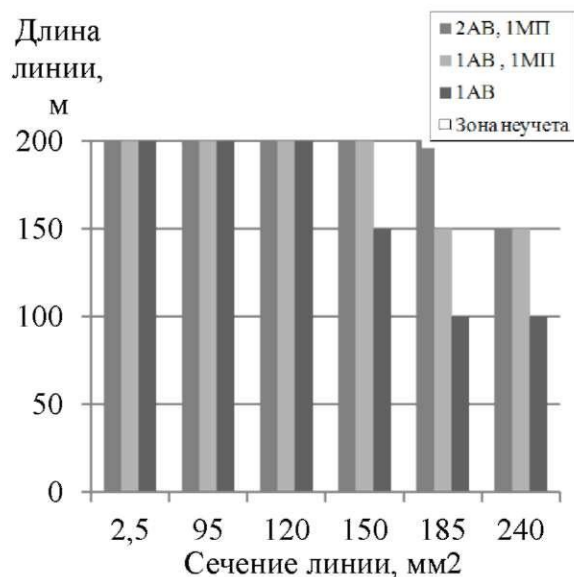


Рисунок 5 - Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 6 радиальными линиями

По результатам исследований разработаны номограммы (рис. 4, 5) условий учета-неучета сопротивлений коммутационных аппаратов для

радиальных схем цеховых сетей со следующими диапазонами параметров: количество приемников электроэнергии 4-12; длина линии 5-200 м; сечение линии 2,5 – 240 мм²; различное количество коммутационных аппаратов на линии.

В третьей главе разработана методика планирования электропотребления на промышленных предприятиях на основе моделирования эквивалентного сопротивления внутрицеховых сетей.

По смоделированному эквивалентному сопротивлению (R_3^{cp}) участка механического цеха определяются потери электроэнергии (ΔW) по выражению:

$$\Delta W = \frac{R_3^{cp} P_{cp}^2 T}{U_{cp}^2 \cos^2 \varphi_{cp}}, \quad (3)$$

где P_{cp} - средняя мощность электроприемников, МВт; T - расчетный период, ч; U_{cp} - напряжение сети, В; $\cos \varphi_{cp}$ - средний коэффициент мощности приемников электроэнергии.

Для оценки эквивалентного сопротивления получена регрессионная зависимость от среднего допустимого длительного тока линий ($I_{доп\ ср}$), средней длины линий ($l_{ср}$), количества линий (n), среднего коэффициента загрузки линий (k_3) и температуры окружающей среды (θ_0):

$$\begin{aligned} R_3 = & 48,55 - 1,01 \cdot I_{доп\ ср} + 2,34 \cdot l_{ср} - 2,15 \cdot n - 16,74 \cdot k_3 + 0,08 \cdot \theta_0 - \\ & - 0,04 \cdot I_{доп\ ср} \cdot l_{ср} + 0,06 \cdot I_{доп\ ср} \cdot n + 0,08 \cdot I_{доп\ ср} \cdot k_3 - 0,05 \cdot l_{ср} \cdot n + \\ & + 0,22 \cdot l_{ср} \cdot k_3 + 0,25 \cdot n \cdot k_3 + 0,18 \cdot k_3 \cdot \theta_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где входящие в полиномы величины принадлежат следующим диапазонам изменения: $I_{доп\ ср} \in [20 \div 35]$ А; $l_{ср} \in [3 \div 30]$ м; $n \in [10 \div 16]$; $k_3 \in [0,45 \div 1]$; $\theta_0 \in [2 \div 30]$ °С.

С учетом неизменности технологии потери электроэнергии для исследуемого участка цеховой сети составляют 2,77% от беспотерьного (непосредственно с шин) потребления электроэнергии, тогда расчетный отпуск электроэнергии в сеть составит:

$$W_p = \frac{100}{2,77} \cdot \frac{R_3^{cp} P_{cp}^2 T}{U_{cp}^2 \cos^2 \varphi_{cp}}, \quad (5)$$

где R_3^{cp} - эквивалентное сопротивление участка цеха с учетом роста сопротивления аппаратов.

В качестве мероприятия по экономии электроэнергии предлагается замена низковольтных коммутационных аппаратов на новые аппараты.

Замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя достичь экономии от замены 32х АВ и МП 10,38 тыс. руб. для участка механического цеха с суммарной мощностью силового пункта 26,9 кВт. Замена на 60% «ресурса» позволяет окупить стоимость аппаратов и повысить надежность работы оборудования. Замена при 40% отработанного ресурса – является убыточной.

Четвертая глава посвящена апробации разработанной методики планирования расхода электроэнергии промышленными предприятиями на примере участка цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез» (рис.6).

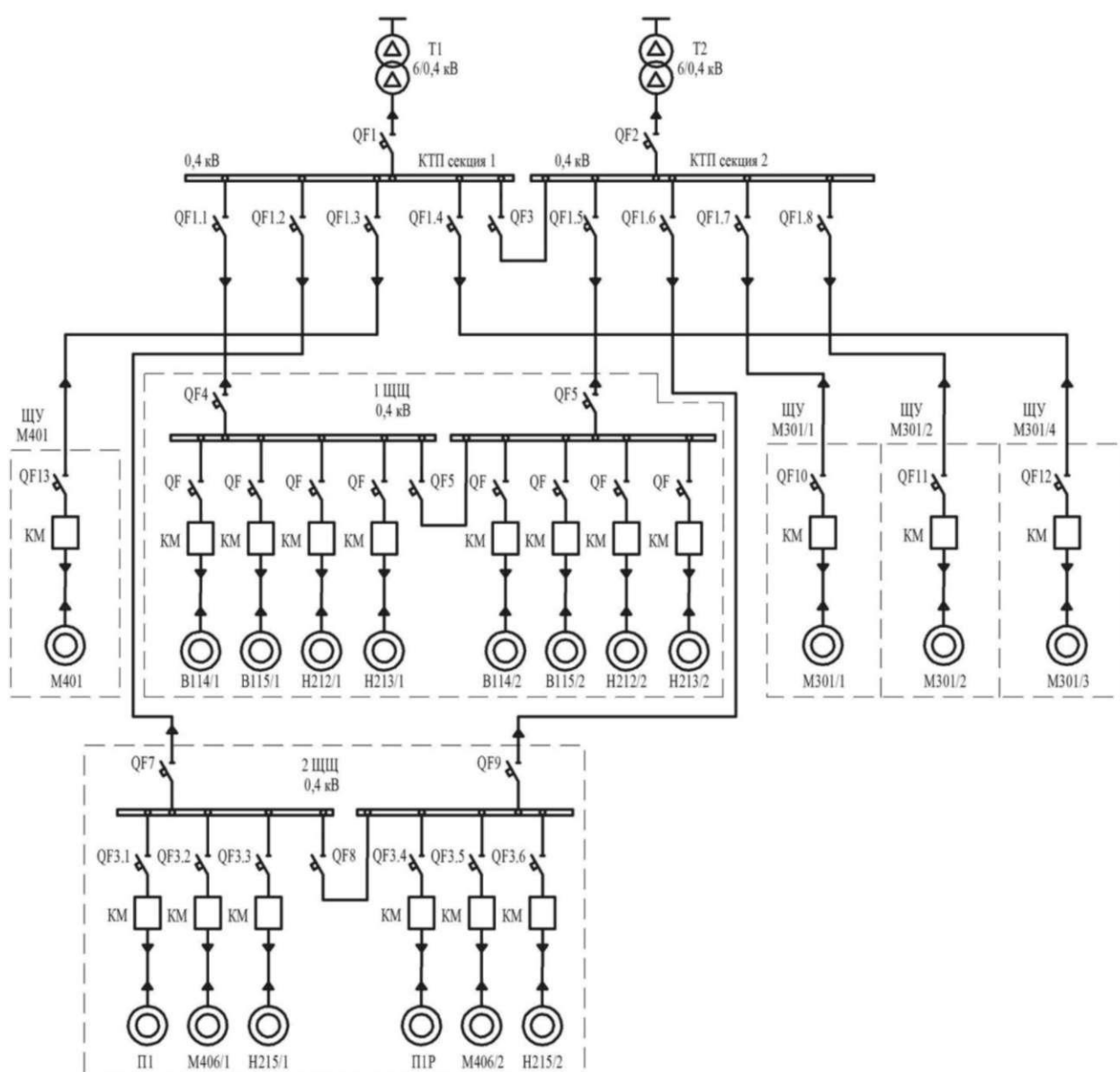


Рисунок 6 - Схема распределительной сети 0,4кВ

Для рассматриваемого участка сети ПАО «Казаньоргсинтез» для составления уравнения регрессии линии сгруппированы с учетом

номинальных токов аппаратов защиты (автоматических выключателей) по следующим характеристикам:

- автоматические выключатели с $I_{нз} = 25 \div 63$ А, длина линии $l_{ср} = 20 \div 70$ м;
- автоматические выключатели с $I_{нз} = 80 \div 160$ А, длина линии $l_{ср} = 30 \div 100$ м;
- автоматические выключатели с $I_{нз} = 250 \div 400$ А, длина линии $l_{ср} = 10 \div 170$ м;
- автоматические выключатели с $I_{нз} = 630 \div 1000$ А, длина линии $l_{ср} = 5 \div 165$ м.

Разработанная окончательная модель эквивалентного сопротивления участка цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез» имеет следующий вид:

$$R_3 = 78,06 - 0,11 \cdot I_{доп\ ср} + 0,50 \cdot l_{ср} - 7,95 \cdot n - 9,11 \cdot k_3 + 0,045 \cdot \theta_0 + \\ + 0,014 \cdot I_{доп\ ср} \cdot n - 0,019 \cdot l_{ср} \cdot n + 0,036 \cdot l_{ср} \cdot k_3 + \\ + 0,077 \cdot n \cdot k_3 - 0,014 \cdot n \cdot \theta_0 + 0,24 \cdot k_3 \cdot \theta_0. \quad (6)$$

При неизменности технологического процесса в последующие годы беспотерное потребление электроэнергии (W_{6n}) от начального эквивалентного сопротивления ($R_{3,0}$) цеховой сети будет иметь зависимость:

$$W_{6n} = \frac{100}{3,51} \cdot \frac{R_{3,0} P_{ср}^2 T}{U_{ср}^2 \cos^2 \varphi_{ср}}, \quad (7)$$

где 3,51 – процент потерь электроэнергии от беспотерного потребления электроэнергии.

$$\frac{\Delta W_{2014}}{W_{6n\ 2014}} \cdot 100\% = \frac{12,52\ \text{МВт}}{356,6\ \text{МВт}} \cdot 100\% = 3,51\%;$$

$$\frac{\Delta W_{2015}}{W_{6n\ 2015}} \cdot 100\% = \frac{12,65\ \text{МВт}}{360,4\ \text{МВт}} \cdot 100\% = 3,51\%,$$

где ΔW_{2014} , ΔW_{2015} – потери электроэнергии на участке цеховой сети, изображенной на рис. 6 за 2014 и 2015 гг. соответственно; $W_{6n\ 2014}$, $W_{6n\ 2015}$ – беспотерное потребление электроэнергии (расход электроэнергии на технологию) на том же участке сети за 2014 и 2015 гг.

С учетом выражений (2) и (6) расчетный отпуск электроэнергии в сеть составит:

$$W_p = \frac{R_3^{ср} P_{ср}^2 T}{U_{ср}^2 \cos^2 \varphi_{ср}} + \frac{R_{3,0} P_{ср}^2 T}{U_{ср}^2 \cos^2 \varphi_{ср}} \cdot \frac{100}{3,51}. \quad (8)$$

Блок-схема определения эквивалентного сопротивления и расчетного отпуска электроэнергии для радиальных схем, реализованная в программной среде MATLAB, представлена на рис. 7.

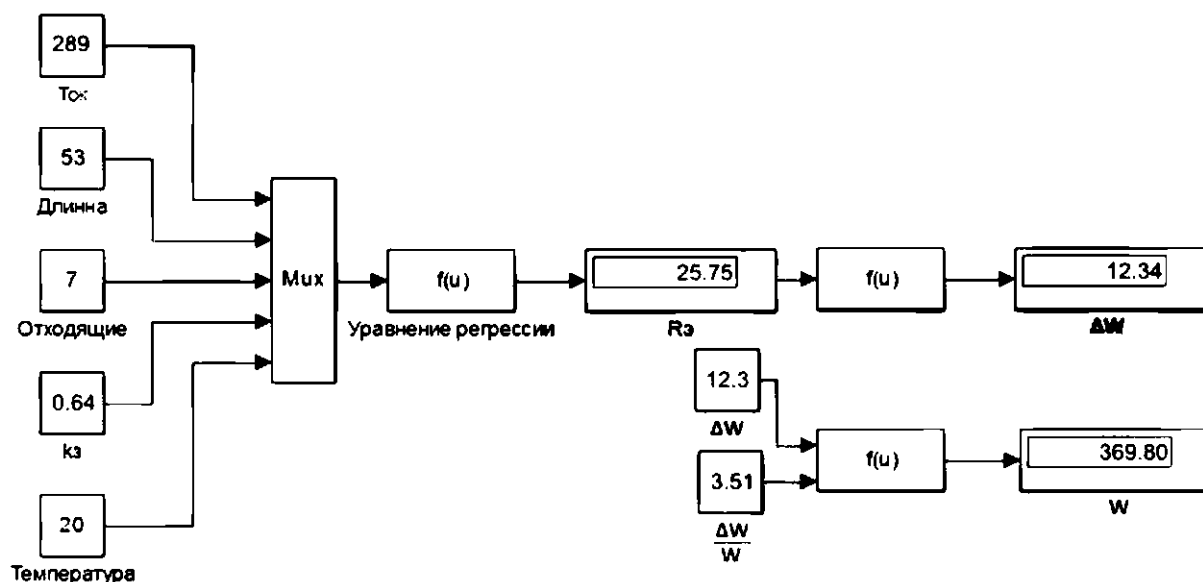


Рисунок 7 - Блок-схема определения эквивалентного сопротивления и расчетного отпуска электроэнергии для цеховых радиальных схем электроснабжения в программной среде MATLAB

В качестве проверки адекватности регрессионной модели (6) использован подход Закгейма Д.А., который заключается в том, что задается допустимое отклонение искомой величины в процентах.

Если во всех точках плана отклонение значения, полученного по регрессионной модели от фактического значения не превышает допустимого, то считается, что модель адекватно описывает процесс.

В исследуемой схеме (рис. 6), если задаться допустимой точностью модели определения эквивалентного сопротивления 5%, показано, что отклонения не превышают заданные значения и уравнение адекватно описывает процесс, погрешность в определении расчетного отпуска электроэнергии составляет менее 2% (табл. 3).

Таблица 3 - Результаты вычислений значений функции цели в дополнительных точках

Год наблюдения	R_3 по уравнению регрессии (6)	R'_3 , вычисленное поэлементно для каждой линии	$ R'_3 - R_3 $	Расхождение $(R_3 - R'_3) / R'_3 \cdot 100, \%$	Расчетный отпуск электроэнергии в сеть W_{p2} , МВтч	Фактический отпуск электроэнергии в сеть W , МВтч	Погрешность $(W_p - W) / W \cdot 100, \%$
2014	25,75	24,66	1,09	4,4	369,8	373,1	-1,03
2015	27,23	28,63	1,40	-4,9	370,3	374,7	-1,19

Проведена оценка эффективности предлагаемых мероприятий по экономии электроэнергии на промышленном предприятии ПАО «Казаньоргсинтез», которая показала, что замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя снизить расход электроэнергии на 6,4 МВтч в год замены и на 8,2 МВтч в будущем году, что составляет 1,7% и 2,2% соответственно. На рис. 8 представлено изменение расчетного отпуска электроэнергии с учетом замены низковольтных коммутационных аппаратов.

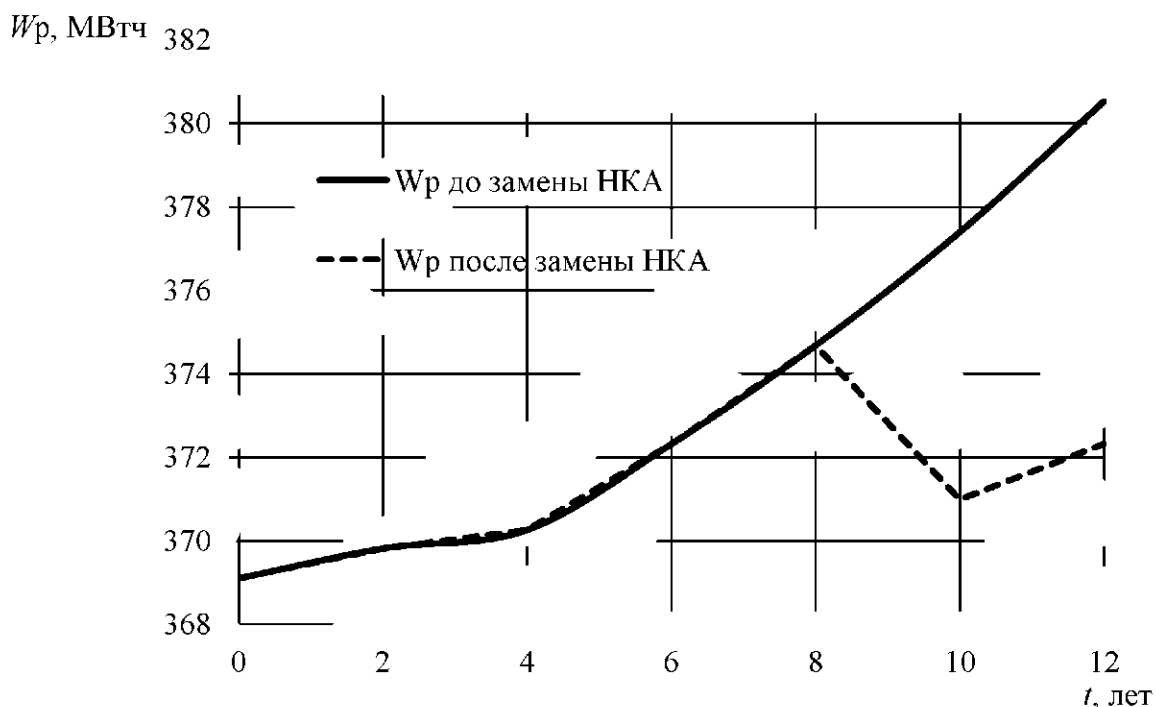


Рисунок 8 - Зависимости изменения расчетного отпуска электроэнергии (W_p) от времени эксплуатации до и после замены НКА

В приложениях приводятся таблицы с указанием зон учета-неучета сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов, при вычислении эквивалентного сопротивления цеховых сетей, текст программы расчета эквивалентного сопротивления радиальных схем и электропотребления цеха в среде MATLAB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в диссертации, свидетельствуют о решении актуальной научно-технической задачи в области электроснабжения, заключающейся в совершенствовании методов планирования электропотребления промышленными предприятиями, что обеспечивает рациональное внедрение

принципов энергосбережения.

Итоги выполненного исследования:

1. В результате аналитического обзора методов планирования электропотребления определены их особенности, основными из которых являются неучет режимов эксплуатации и модернизации оборудования производства. Большинство методов рассматривается колебание электропотребления, как непостоянный процесс, состоящий из двух составляющих: периодической и остаточной, описываемых регрессионными и стохастическими моделями соответственно.

2. Установлены основные виды, показатели и задачи формирования фактических и плановых балансов электроэнергии объектов электроэнергетики и промышленных предприятий, а также определены этапы реализации методики планирования электропотребления, включающие в себя способы обработки данных, методы расчетов, необходимые для осуществления всего цикла планирования расхода электроэнергии.

3. Выявлены особенности технических характеристик низковольтных коммутационных аппаратов отечественных фирм-производителей ИЕК, ЕКФ, КЭАЗ, «Контактор» и «Электроконтактор».

4. Экспериментально установлены соотношения сопротивлений контактов низковольтных коммутационных аппаратов отечественных фирм-производителей в зависимости от номинальных токов аппаратов и выявлены зависимости изменения сопротивления контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки подключенного оборудования.

5. Разработаны методика и математические модели зависимости эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем сетей в функции таких параметров, как сечение и длина линий сети, количество и тип коммутационных аппаратов, установленных на линии, температура окружающей среды, нагрузка оборудования.

6. Разработан алгоритм использования среднего (за год) эквивалентного сопротивления сети как годового планового показателя для осуществления оперативного контроля за ходом выполнения плана электропотребления и потерь электроэнергии, а также показана возможность объективной сравнительной оценки уровня потерь (что невозможно сделать путем сравнения традиционных процентов потерь) и определять фактическое их снижение от совокупного действия мероприятий, внедренных как в текущем, так и в предыдущие годы.

7. Разработан алгоритм, структурная схема и программа расчета электропотребления цеха и сопротивления радиальных схем ПАО «Казаньоргсинтез» в программной среде MATLAB. Для повышения точности расчетов по регрессионной зависимости (6) определения эквивалентного сопротивления показан порядок группирования линий

цеховой сети с учетом их длин, сечений и установленных на линиях низковольтных коммутационных аппаратов. Определена динамика изменения электропотребления и относительных потерь электроэнергии цеха ПАО «Казаньоргсинтез» с учетом времени эксплуатации оборудования. Проведена технико-экономическая оценка замены низковольтных коммутационных аппаратов на их более энергоэффективные аналоги для цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез».

Рекомендации:

8. Для снижения трудоемкости вычислений и сокращения расчетов эквивалентных сопротивлений цеховых сетей разработан алгоритм и определены зоны учета-неучета сопротивлений контактных соединений НКА, погрешность определения значений эквивалентных сопротивлений составила при этом менее 5%.

9. В качестве мероприятия по энергосбережению предложена замена низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от срока отработанного ресурса и проведена технико-экономическая оценка данного мероприятия.

10. Разработанные специализированные модели определения беспотерного электропотребления (7) и расчетного отпуска электроэнергии в промышленную сеть (8) могут быть использованы для эффективного планирования мероприятий по энергосбережению. Предлагаемые математические модели позволяют также проводить достоверную технико-экономическую оценку проводимых мероприятий.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

11. Проведение исследований, направленных на разработку методики планирования расхода электроэнергии, с учетом разработанных рекомендаций и выявления факторов, определяющих изменение технологических режимов производства, как в цеховых сетях 0,4 кВ, так и 6 (10) кВ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Шагидуллин, А.В. 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.

2. Шагидуллин, А.В. Расчет сопротивлений контактных соединений и потерь мощности автоматических выключателей./ Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, А.Н. Хаерова // Главный энергетик. – 2013.

– № 9. – С. 23–27.

3. Шагидуллин, А.В. Применение методики оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и цеховых сетей. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 11. – С. 23–28.

4. Шагидуллин, А.В. 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.

5. Шагидуллин, А.В. Прогнозирование надежности электрооборудования цеховых сетей. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 2. – С. 28–33.

6. Шагидуллин, А.В. Расчет эквивалентного сопротивления радиальных схем при вычислении потерь электроэнергии. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 9. – С. 10–16.

7. Шагидуллин, А.В. Моделирование законов изменения функциональных параметров низковольтных аппаратов. / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – №3(26). – С. 66–69.

8. Шагидуллин, А.В. Моделирование влияния параметров оборудования на эквивалентное сопротивление цеховых магистральных сетей. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 10. – С. 10–15.

9. Шагидуллин, А.В. Энергоэффективность мероприятий по экономии электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – №1(32). – С. 64–67.

Публикации в других научных изданиях:

10. Шагидуллин, А.В. Исследование характеристик надежности низковольтных аппаратов / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Материалы докладов VI международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – Т.1. – С. 118 – 119.

11. Шагидуллин, А.В. Исследование показателей надежности автоматических выключателей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Шагидуллина // 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.

12. Шагидуллин, А.В. Определение сопротивления контактных

соединений автоматических выключателей различными способами / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Федоровские чтения – 2011. XLI Всероссийская научно-практическая конференция. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 142-144

13. Шагидуллин, А.В. Применение результатов экспериментов для оценки сопротивлений контактных систем низковольтных аппаратов способами / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Материалы докладов VII международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» / Т. 1. – Казань: КГЭУ, 2012. – С. 200-201

14. Шагидуллин, А.В. 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.

15. Шагидуллин, А.В. 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. 310.

16. Шагидуллин, А.В. 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.

17. Шагидуллин, А.В. 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.

18. Шагидуллин, А.В. 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.

19. Шагидуллин, А.В. Влияние функциональных параметров низковольтных аппаратов на потери активной мощности / А.В. Рыбакова, А.В. Шагидуллин // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2012. – № 4 (10). – С. 90-95.

20. Шагидуллин, А.В. Моделирование и анализ схем цехового

электроснабжения для определения эквивалентного сопротивления сети / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Материалы докладов VIII международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» » / Под общ. ред. Ректора КГЭУ Э.Ю.Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – С. 190-191

21. Шагидуллин, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование сопротивлений контактных систем автоматических выключателей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова // Электрика. – 2013. – № 3. – С. 20–26.

22. Шагидуллин, А.В. Особенности компоновки и технические характеристики оборудования систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 25–28.

23. Шагидуллин, А.В. 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.

24. Шагидуллин, А.В. Влияние технических характеристик элементов низковольтных сетей на величину эквивалентного сопротивления / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева, А.В. Рыбакова // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 15–19 апреля 2013 г.) В 3 т. Т. 1. – Томск: Изд-во ФГБОУ ВПО Томский политехнический университет, 2013. – С. 107-108.

25. Шагидуллин, А.В. Моделирование влияния изменения параметров электрооборудования на величину эквивалентного сопротивления систем внутрицехового электроснабжения. / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2013. – № 7. – С. 2–6.

26. Шагидуллин, А.В. Разработка моделей оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. / Е.И. Грачева, А.В. Рыбакова, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2013. – № 8. – С. 37–41.

27. Шагидуллин, А.В. Влияние компоновочных решений на эквивалентное сопротивление участка низковольтной сети / А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, Е.И. Грачева // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ // Специальный выпуск №1. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия – 2013». – Иваново: Изд-во ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,

2013. – С. 306-309.

28. Шагидуллин, А.В. 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.

29. Шагидуллин, А.В. Выбор критерия оценки технического состояния низковольтных аппаратов / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева, А.В. Рыбакова // «Научному прогрессу – творчество молодых», международная молодежная науч. конф. по естественнонауч. и техн. дисциплинам (2013; Йошкар-Ола). Международная молодежная научная конференция по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», 19-20 апр. 2013 г. [Текст]: [материалы и доклады]: в 3 ч. / ред-кол.: В.А. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – Ч.2: Материалы и доклады. – С. 106-107

30. Шагидуллин, А.В. 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.

31. Шагидуллин, А.В. Моделирование параметров надежности элементов цеховых сетей / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2013. – № 11. – С. 34–38.

32. Шагидуллин, А.В. Определение и прогнозирование потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях промышленных предприятий использованием регрессионного анализа / А.В. Шагидуллин // Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – № 1 (6). – С. 142-150.

33. Шагидуллин, А.В. Применение методики оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и цеховых сетей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // Материалы докладов IX международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Изд-во Казанского государственного энергетического университета, 2014. – Т.1. – С. 164–165.

34. Шагидуллин, А.В. Определение сопротивления контактных соединений и температуры контактных площадок низковольтных аппаратов различными методами. / Е.И. Грачева, А.Н. Хаерова, А.В. Шагидуллин // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2014. – №3. – С. 46-51.

35. Шагидуллин, А.В. Возможные погрешности определения эквивалентного сопротивления низковольтных радиальных цеховых сетей промышленных предприятий / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Сборник

научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. – № 3 часть 1 (8-1). – С. 247-253.

36. Шагидуллин, А.В. Обработка результатов экспериментальных данных для определения законов распределения сопротивлений контактных соединений автоматических выключателей. / Е.И. Грачева, А.Н. Хаерова, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2014. – № 7. – С. 2–5.

37. Шагидуллин, А.В. Влияние параметров электрооборудования на расчет эквивалентного сопротивления шинпровода при вычислении потерь электроэнергии. / Е.И. Грачева, А.Н. Хаерова, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2014. – № 8. – С. 2–5.

38. Шагидуллин, А.В. Регрессионные модели зависимости эквивалентного сопротивления радиальных цеховых сетей от основных факторов / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Фёдоровские чтения – 2014. Материалы XLIV Международной научно-практической конференции (Москва, 12-14 ноября 2014 г.) / под общей ред. Б.И. Кудрина и Ю. В. Матюниной. – М.: Издательство МЭИ, 2014. – С. 71-73.

39. Шагидуллин, А.В. Вероятностные модели зависимости эквивалентного сопротивления радиальных цеховых сетей от основных параметров оборудования / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Электрика. – 2015. – № 2. – С. 7–12.

40. Шагидуллин, А.В. Мероприятия по экономии электроэнергии в цеховых сетях 0,4 кВ / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Фёдоровские чтения – 2015. XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 11-12 ноября 2015 г.) / под общей ред. Б. И. Кудрина, Ю. В. Матюниной. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 130-134.

41. Шагидуллин, А.В. Мероприятия по повышению энергоэффективности сетей до 1 кВ / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Сборник статей всероссийской научно-технической конференции Актуальные проблемы электроэнергетики. А.Б. Дарьенков (отв. редактор). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2015. – С. 165-169.

Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве:

[1, 3, 30, 33] – выполнение исследования, обработка результатов;

[2, 12, 18, 24, 29] – получение функциональных зависимостей, выбор методики исследования;

[4, 5, 10, 11, 16, 23, 28] – постановка задачи, обзор подходов и методик оценки надежности низковольтных коммутационных аппаратов, обработка результатов;

- [6, 8, 14, 17] – выполнение расчетов, обработка результатов;
- [7, 20, 25, 31] – постановка задачи исследования, выбор методики исследования, моделирование в среде MATLAB;
- [9, 15] – разработка алгоритма, выполнение расчетов, обработка результатов;
- [13, 22, 27, 35, 37, 40] – обобщение результатов исследований и формулирование выводов;
- [19, 26, 38] – моделирование закономерностей, разработка алгоритма;
- [21, 34] – измерение и обработка экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний;
- [36, 39, 41] – обработка данных и анализ полученных результатов.

Шагидуллин Андрей Владиславович

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ
ПО ЭКВИВАЛЕНТНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 08.08.2016 г. Формат 60x84^{1/16}. Печ. л. 1,0.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 112.

Отпечатано в типографии ООО «Изображение»
420049, г. Казань, ул. Нурсултана Назарбаева, 27