

На правах рукописи



Садыков Руслан Рустемович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент Грачева Елена Ивановна.

Официальные оппоненты:

Бабокин Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горных предприятий» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»;

Бородин Максим Владимирович, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой «Электроснабжение» Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».

Защита диссертации состоится «30» октября 2018 года в 12³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан « 24 » августа 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.И. Бойчевский

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В современных условиях становления рыночных отношений в России, с внедрением нового электрооборудования в системах внутризаводского электроснабжения, проблема исследования и анализа надежности функционирования технических устройств становится одной из самых главных. Известно, что во время пусконаладочных работ при вводе новых промышленных объектов выявляются и устраняются причины ненадежной работы оборудования и установок. Многие из этих причин объясняются недостатками проектно-конструкторских разработок, в которых не анализировались факторы надежности.

В настоящее время на предприятиях формируются системы управления производственными активами (СУПА). Современные тенденции развития промышленного комплекса показывают, что в соответствии с Концепцией СУПА основные этапы принятия решения о воздействии на актив должны включать в себя: сбор, обработку и хранение исходных данных; оценку технического состояния и вероятности отказа оборудования; планирование работ по текущему обслуживанию и ремонту; выполнение запланированных работ.

Как правило, для моделирования вероятностных характеристик надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в качестве объекта исследования рассматриваются распределительные сети 6–10 кВ. Но, как показывает опыт эксплуатации, вероятностные характеристики надежности функционирования внутрицеховых систем низкого напряжения, с учетом целого комплекса воздействующих факторов, часто не поддающихся количественной оценке, и множества элементов оборудования, имеют сложные зависимости и требуют детального исследования при моделировании на этапах проектирования и эксплуатации. Таким образом, разработка и реализация алгоритмов оценки и повышения эффективности функционирования внутрицехового электроснабжения является актуальной задачей.

Объект исследования: системы внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий.

Предмет исследования: функциональные характеристики оборудования внутрицехового электроснабжения.

Цель работы. Разработка алгоритмов и методики оценки надежности цеховых сетей для повышения эффективности функционирования и проектирования систем электроснабжения.

Идея работы. Заключается в разработке методики и моделей для оценки и повышения эффективности эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения, что позволяет улучшить функциональные характеристики цеховых сетей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе требуется решение следующих задач:

- анализ вероятностных характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий цеховых сетей на основании статистических данных эксплуатации оборудования;

- определение допустимых кратностей превышения сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов по условиям технической эксплуатации на основании экспериментальных данных тепловизионного обследования;

- разработка алгоритма и метода комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов;

- разработка алгоритма и методики определения показателей надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов отношения.

Методы исследования. В работе использовались методы теории надежности и теории вероятностей, математической статистики, теории электрических аппаратов, методы моделирования в программной среде Matlab. Обработка статистической информации и расчеты выполнены на ПЭВМ с использованием стандартных и разработанных моделей и программ.

Научная новизна работы:

- на основании статистических эксплуатационных данных доказана гипотеза о возможности применения нормального закона распределения вероятностных характеристик и определены параметры надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях и кабельных линиях низкого напряжения;

- в качестве критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов предложена величина коэффициента превышения сопротивлений контактных соединений аппаратов;

- по условиям технической эксплуатации и экспериментальным исследованиям тепловизионного контроля, в отличие от используемых ранее значений предельно допустимых температур нагрева контактов, установлены допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов, позволяющие не допускать развития дефектов коммутационной аппаратуры и предотвращать аварийные ситуации;

- разработаны алгоритм и методика комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях с определением функциональной зависимости между параметрами сопротивлений контактных соединений и вероятностью времени безотказной работы аппаратов;

- разработаны алгоритм и методика определения параметров надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов, определяемых отношением вероятности времени безотказной работы относительно первого присоединения потребителей.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в разработке методики оценки и повышения эффективности функционирования систем внутрицехового электроснабжения, позволяющей уточнять компоновочные решения оборудования схем на этапе проектирования и эксплуатации;

- в обеспечении эффективного внедрения мероприятий по повышению уровня надежности схем цеховых сетей, оцениваемого по разработанному алгоритму, за счет применения усовершенствованного оборудования;

- в достижении повышения достоверности значений прогнозируемых характеристик надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения за счет применения алгоритмов с использованием коэффициентов отношения;

- в обеспечении эффективной эксплуатации низковольтной коммутационной аппаратуры за счет использования предлагаемого критерия допустимой кратности превышения сопротивления контактных соединений, позволяющего предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также уточнять сроки и повышать качество проведения планово-предупредительных ремонтов и текущих обследований оборудования.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 11%, сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории надежности.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ). Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на ПАО «Казаньоргсинтез», ОАО «Казанский медико-инструментальный завод» и в учебный процесс КГЭУ.

Новые научные положения, выносимые на защиту:

- результаты статистического исследования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых на линиях цеховых сетей с выявлением нормального закона распределения;

- математическая модель критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого предложена величина коэффициента превышения сопротивлений контактов аппарата;

- результаты тепловизионных обследований низковольтных аппаратов, позволяющие установить допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов;

- алгоритм и методика комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов с определением параметров их надежности и величины сопротивлений контактных соединений;

- алгоритм и методика определения параметров надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с использованием коэффициентов отношения вероятностей времени безотказной работы исследуемого числа присоединенных потребителей, к вероятности времени безотказной работы первого присоединения.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной научно-практической конференции «Научные исследования: от теории к практике» (г. Чебоксары, 2015), XI, XII Международных молодежных научных конференциях «Тинчуриные чтения» (г. Казань, 2016, 2017), XIX Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития» (г. Москва, 2015), XLI Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (г. Москва, 2015), IV Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования в XXI веке» (г. Новосибирск, 2016), LIII Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск, 2015), а также обсуждались на аспирантско-магистерских семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, входящем в систему цитирования СКОПУС; 1 авторское свидетельство программы для ЭВМ; 23 – тезисы докладов на конференциях и статьи в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Общий объем диссертации – 194 страницы, в том числе 164 страницы основного текста, 55 рисунков, 25 таблиц, списка литературы из 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлена степень разработанности, сформулированы цель, решаемые зада-

чи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

Первая глава посвящена анализу научных концептуальных положений в области исследования надежности систем электроснабжения. Выделены основные направления повышения надежности.

Вторая глава посвящена исследованию характеристик надежности оборудования цеховых сетей.

В качестве исходной информации об отказах низковольтного электрооборудования представлены статистические данные, полученные на ПАО «Казаньоргсинтез» по результатам эксплуатационных наблюдений в течение ряда лет.

В результате обработки статистической информации определены параметры надежности низковольтного оборудования и доказана гипотеза применения нормального закона распределения вероятностных характеристик.

В третьей главе представлено исследование технического состояния эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов на основании экспериментальных и расчетных данных.

По результатам данных тепловизионного контроля установлено, что температуры нагрева коммутационных аппаратов при равных условиях эксплуатации в момент измерения (рабочий ток и коэффициент загрузки) не равны между собой. Следствием неравенства температур является неравенство сопротивлений контактных соединений. Причина этого – в имеющихся пленках на контактах аппаратов.

Тепловизионное обследование низковольтного оборудования выявило, что в дефектных электрических аппаратах из-за образования контактных пленок и неровностей площади контактирования наблюдается недопустимое увеличение температуры контактных соединений. В результате чего сопротивление контактов относительно начального увеличилось в среднем в 1,9–3 раза.

Введено понятие коэффициента допустимой кратности превышения сопротивления контактов по условиям режимов технической эксплуатации

$$k_{п.с} = \frac{r}{r_0}, \quad (1)$$

где r_0 – начальное сопротивление контактного соединения аппарата (таблица 1); r – фактическое сопротивление контактного соединения аппарата в условиях эксплуатации.

Таблица 1 – Начальное сопротивление контактов аппаратов

Тип аппарата	Величина номинального тока, $I_{НОМ}$, А	Эмпирическая зависимость сопротивления от величины номинального тока
Магнитный пускатель	< 75	$r_0 = 820 / I_{НОМ}$
	≥ 75	$r_0 = 770 / I_{НОМ}$
Автоматический выключатель и контактор	< 65	$r_0 = 350 / I_{НОМ}$
	≥ 65	$r_0 = 310 / I_{НОМ}$
Предохранитель	< 100	$r_0 = 200 / I_{НОМ}$
	≥ 100	$r_0 = 120 / I_{НОМ}$
Рубильник и пакетный выключатель	Любое значение	$r_0 = 70 / I_{НОМ}$

Полученные статистические данные ежегодного тепловизионного обследования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов позволили обосновать допустимые кратности превышения сопротивления контактов аппаратов по условию достижения предельно допустимой температуры нагрева контактов.

Работоспособность контактов предложено 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 $r_{кр}$, при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

Для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления.

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

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz, \quad (2)$$

где r_0 – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата; v – скорость изменения сопротивления контактов.

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.

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{крит}}} f(r) dr. \quad (3)$$

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

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

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{крит}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r - r_{\text{сред}})^2}{2\sigma_r^2}\right] dr, \quad (4)$$

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

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

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (5)$$

где σ_v – среднеквадратическое отклонение углового коэффициента v .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций $f(z)$ необходимо продифференцировать выражение (3) по количеству циклов. Вместо r и σ_r подставляются значения $r(z)$ и $\sigma_r(z)$ из соотношения (4). Значение dr/dz представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (2)

$$dr = vdz \quad \text{или} \quad dr = \frac{r - r_{0.сред}}{z} dz. \quad (6)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}} \left\{ 3\sigma_{r0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{r0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{сред}}{\sigma_v} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + (r_{крит} - r_{0.сред}) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v_{ср}}{\sigma_v} - \frac{r_{крит} - r_{0.сред}}{\sigma_v z} \right)^2 \right] \right\}. \quad (7)$$

На рисунке 1 представлена модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов. Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn (функция), Product (умножение) и Sum (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

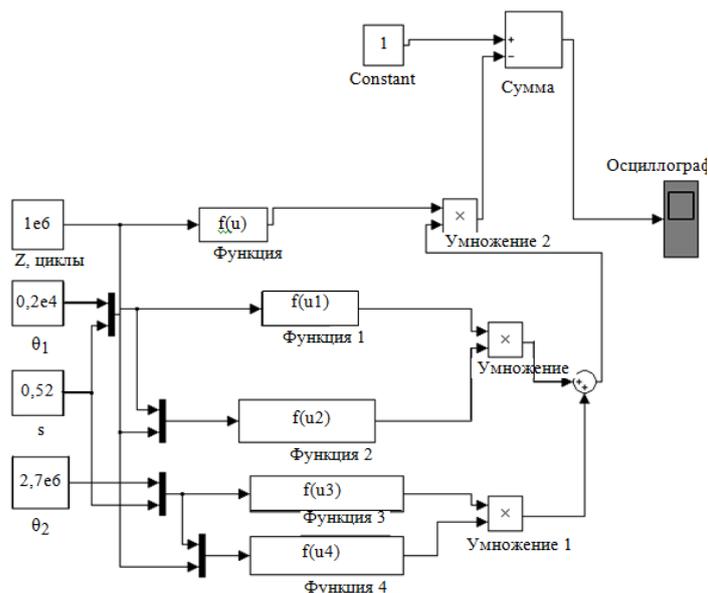


Рисунок 1 – Модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов

На рисунке 2 представлена модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов. Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn (функция), Product (умножение) и Sum (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

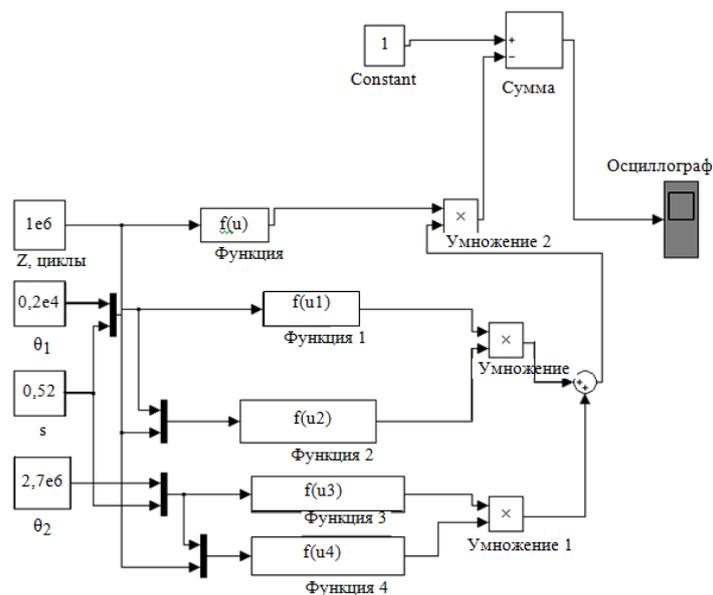


Рисунок 2 – Модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов

В четвертой главе разработаны алгоритм и методика оценки надежности функционирования систем цехового электроснабжения.

Для исследования динамики изменения вероятности времени безотказной работы $P(t)$ распределительных устройств низкого напряжения (рисунок 3) в зависимости от числа присоединений нагрузки введено понятие «коэффициентов отношения»

$$k_1(t) = \frac{P_2(t)}{P_1(t)}, k_2(t) = \frac{P_3(t)}{P_1(t)}, k_3(t) = \frac{P_4(t)}{P_1(t)}, k_4(t) = \frac{P_5(t)}{P_1(t)}, \quad (8)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$ – вероятность времени безотказной работы схемы при 1-ом, 2-х, 3-х, 4-х, 5-ти присоединениях нагрузки; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – коэффициенты отношения вероятностей указанных присоединений, где $P_1(t) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KЛ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{K11} \cdot P_K$; P_{QF} , P_{QS} , P_F , $P_{KЛ}$, P_K – вероятности времени безотказной работы соответственно автоматического выключателя, рубильника, предохранителя, кабельной линии, контактора.

Показаны графики изменения во времени k_1-k_5 (рисунок 4).

Представленные зависимости (рисунок 4) позволяют определять $P(t)$ распределительных устройств низкого напряжения с учетом количества присоединений и фактора времени эксплуатации оборудования.

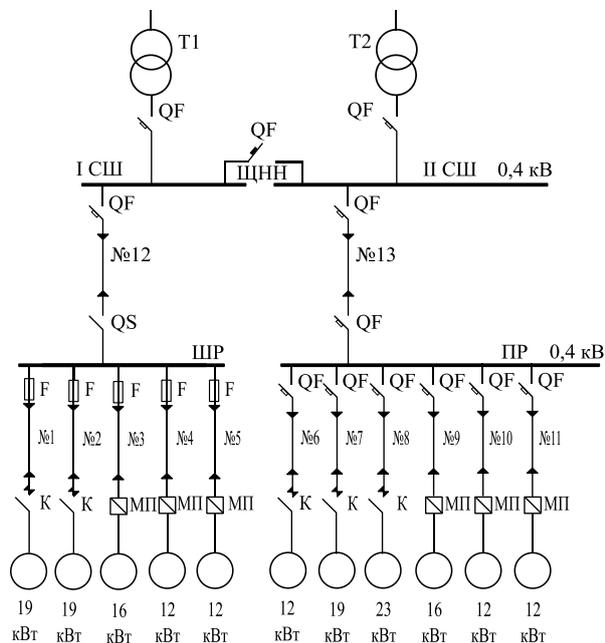


Рисунок 3 – Схема участка цеховой сети

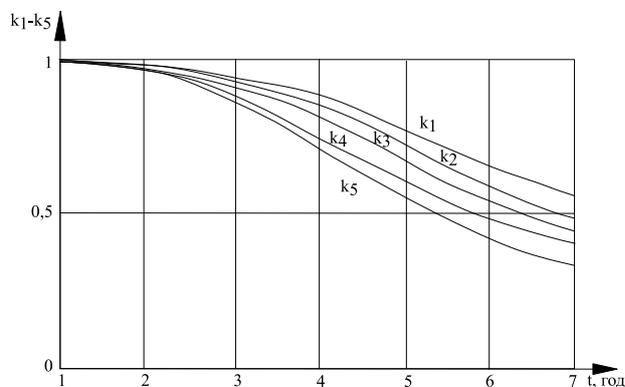


Рисунок 4 – Графики зависимостей изменения коэффициентов отношений от времени эксплуатации схемы

Как показали исследования, погрешность разработанной методики определения вероятности времени безотказной работы цеховых сетей относительно присоединений распределительных устройств низкого напряжения с использованием коэффициентов отношения не превышает 11 %, что подтверждается практическими расчетами параметров схем. Предлагаемая методика рекомендована для оценки и прогнозирования показателей надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения в среднесрочной перспективе; определения максимальных и минимальных возможных показателей надежности узлов; уточнения компоновочных решений оборудования схем, надежность которых удовлетворяет заданному уровню показателей; поиска путей повышения уровня надежности за счет применения усовершенствованного оборудования; технико-экономических расчетов, а также уточнения сроков планирования и замены оборудования и эффективного проведения планово-предупредительных ремонтов и текущего обследования оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке и обобщении моделей надежности функционирования внутрицехового электроснабжения, что позволяет повысить эффективность эксплуатации таких систем. Полученные материалы диссертации позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Выявлены особенности оценки надежности и определены характеристики структуры и функционирования, которые рекомендуется учитывать при анализе надежности систем, а также показаны основные направления повышения надежности СЭС.

2. На основании статистических эксплуатационных данных рассчитаны доверительные интервалы параметра потока отказов и определены значения интенсивности отказов, вероятности времени безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий в зависимости от срока эксплуатации и доказана гипотеза о возможности применения нормального закона распределения вероятностных характеристик электроустановок схем цехового электроснабжения.

3. По результатам тепловизионных обследований в качестве критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов предложена величина коэффициента превышения сопротивления контактных соединений аппаратов.

4. По условиям технической эксплуатации и экспериментальным исследованиям обоснованы допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов по достижению предельно допустимой температуры нагрева контактов: для автоматических выключателей в 2,7 раза; для контакторов в 2,8 раза; для магнитных пускателей в 3 раза; для рубильников в 2,1 раза; для пакетных выключателей в 1,9 раза. Предлагаемые коэффициенты позволяют оценивать эксплуатационное состояние низковольтных коммутационных аппаратов и предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также ис-

пользовать предлагаемый критерий в качестве дополнительного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

5. Разработан алгоритм и метод комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения вероятности времени безотказной работы и сопротивлений контактных соединений аппаратов цеховых сетей в зависимости от режимов эксплуатации с учетом их технического состояния.

6. Разработан алгоритм и методика оценки параметров надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов отношения относительно первого присоединения нагрузки, погрешность вычислений при этом не превышает 11 %.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в периодических научных изданиях рекомендованные ВАК РФ

1. Садыков, Р. Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 5-6. – С. 13-21.

2. Садыков, Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения / Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 5-6. – С. 70-71.

3. Садыков, Р. Р. Оценка результатов исследования технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 4(31). – С. 57-60.

4. Садыков Р. Р. Влияние режимных и схемных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей / А. И. Федотов, Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 7-8. – С. 92-97.

5. Садыков, Р. Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 1-2. – С. 94-100.

Публикация в издании, входящее в базу Scopus

6. Sadykov, R. R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters / E. I. Gracheva, O. V. Naumov, R. R. Sadykov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 24. – PP. 45324-45330.

Другие публикации

7. Садыков, Р. Р. Анализ надежности функционирования оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 2(33). – С. 46-50.

8. Садыков, Р. Р. Некоторые особенности исследования основных показателей надежности низковольтных аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Вестник КГЭУ. – 2016. – № 1(29). – С. 105-115.

9. Садыков, Р. Р. Влияние режимов эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения на их функциональные характеристики / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 4(35). – С. 50-55.

10. Садыков, Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 1(36). – С. 48-52.

11. Садыков, Р. Р. Обработка статистической информации с целью выявления законов изменения параметров надежности оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2016. – № 2(44). – С. 34-43.

12. Садыков, Р. Р. Моделирование характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов на основе случайных выборок на примере контакторов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2016. – № 4(46). – С. 36-41.

13. Садыков, Р. Р. Влияние тока, проходящего через контакты низковольтных аппаратов, на их нагрев / Е. И. Грачева, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Техника и технология: новые перспективы развития: Материа-

лы XIX Международной научно-практической конференции (20.11.2015). – М.: Изд. «Спутник+», 2015. – С. 16-21.

14. Садыков, Р. Р. Формирование моделей оценки эксплуатационной надежности участков цеховых сетей / Е. И. Грачева, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Научная дискуссия: вопросы технических наук. Сборник статей по материалам XLI международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд. «Интернаука», 2015. – № 12(30). – С. 63-69.

15. Садыков, Р. Р. Экспериментальные исследования сопротивлений контактных соединений низковольтных электрических аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Научные исследования: от теории к практике: Материалы VI Международной научно-практической конференции (Чебоксары, 31 дек. 2015 г.). – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 5(6). – С. 214-217.

16. Садыков, Р. Р. Исследование параметров эффективности эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения с учетом основных влияющих факторов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Фундаментальные и прикладные научные исследования в XXI веке: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (Новосибирск, 14 марта 2016 г.) – Новосибирск: ЦСРНИ, 2016. 38-56.

17. Садыков, Р. Р. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Технические науки – от теории к практике: Сб. ст. по материалам LIII международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2015. – С. 105-114.

18. Садыков, Р. Р. Прогнозирование эффективности функционирования электрических систем внутризаводского электроснабжения / Т. А. Серпионова, Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (23–25 марта 2016 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 127-128.

19. Садыков, Р. Р. Моделирование основных функциональных характеристик и структуры систем внутрицехового электроснабжения / Т. А. Серпионова, Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Материалы докладов XI Меж-

дународной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (23–25 марта 2016 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 131-132.

20. Садыков, Р. Р. Анализ основных технических характеристик низковольтной аппаратуры / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сб. науч.-технич. статей. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. – С. 173-177.

21. Садыков, Р. Р. Исследование достоверности величины потерь электроэнергии в низковольтных сетях промышленных предприятий / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сб. науч.-технич. статей. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. – С. 178-182.

22. Садыков, Р. Р. Исследования работоспособности автоматических выключателей по статистическим данным / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», Т. 2. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. – 2016. – С. 104-107.

23. Садыков, Р. Р. Формирование моделей оценки эксплуатационной надежности систем внутризаводского электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Энергоэнергетика. – 2017. – № 1(47). – С. 27-37.

24. Садыков, Р. Р. Методы оценки надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (26–28 апреля 2017 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 173-175.

25. Садыков, Р. Р. Основные аспекты исследования надежности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (26–28 апреля 2017 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 176-177.

26. Садыков, Р. Р. Оптимизация проектирования систем электроснабжения с учетом возможных ситуаций и вероятностных параметров надежности / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2017. – № 2(48). – С. 22-26.

27. Садыков, Р. Р. Сравнительный анализ методов оценки надежности низковольтных цеховых сетей / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков, Р.Р. Кызрачев, С.А. Саетгараева, А.А. Юсупова // Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (01–03 ноября 2017 г.) – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 50-57.

28. Садыков, Р. Р. Основные аспекты исследования надежности функционирования оборудования систем внутривзаводского электроснабжения // Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков, Р.Р. Кызрачев, С.А. Саетгараева, А.А. Юсупова // Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (01–03 ноября 2017 г.) – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 58-65.

29. Садыков, Р. Р. Моделирование изменения параметров надежности функционирования оборудования систем цехового электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков, А. В. Шагидуллин // Вести высших учебных заведений Черноземья. Автоматизация и информатика. – 2017. – № 3(49). – С. 59-67.

30. Свидетельство № 2017662973 Российская Федерация. Оценка вероятностей состояния системы электроснабжения : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Р. Р. Садыков, А. Р. Сафин ; заявитель и правообладатель Казан. гос. энерг. ун-т. – № 2017619720 ; заявл. 28.09.2017 ; зарегистр. 22.11.2017. – 1 с.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: выполнение теоретических и экспериментальных исследований, обработка результатов [2, 3, 4, 5, 8, 10, 22]; выполнение расчетов, обработка результатов [6, 7, 9, 26, 27, 28]; моделирование закономерностей, разработка алгоритма [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 29, 30].