На правах рукописи

Попов Александр Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 05.09.01 –

Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электротехнические комплексы и системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Идиятуллин Ринат Гаисович

Официальные оппоненты: **Копылов Сергей Игоревич,**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, лаборатория сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники, заведующий лабораторией

Макаров Валерий Геннадьевич,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра электропривода и электротехники, заведующий кафедрой

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»**

Защита состоится «11» ноября 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская д. 38, (учебный корпус № 3), зал заседаний учёного совета, к. 301

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

Автореферат разослан «08» сентября 2016 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06 Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На нефтехимических комплексах для привода технологического насосно-компрессорного оборудования широкое применение находят высоковольтные асинхронные электродвигатели (ВАЭ) мощностью от 200 до 5700 кВт. В системе электроснабжения крупного нефтехимического производства могут эксплуатироваться до 500 единиц ВАЭ.

Значительная часть отказов ВАЭ приходится на повреждение обмоток статора и составляет 95%. В структуре этих отказов можно выделить: межвитковое замыкание – 93%, пробой межфазовой изоляции – 5%, пробой пазовой изоляции – 2%. В нефтехимической промышленности в течение года подвергается ремонту до 10% парка ВАЭ. Основными факторами, приводящими к отказам, являются следующие: технологические – 35%, эксплуатационные – 50%, конструкционные – 15%.

Проблема надёжности электрических машин в последние годы резко обострилась, что является следствием следующих факторов:

– возрастанием сложности конструкции элементной базы;

– тяжёлыми условиями эксплуатации электродвигателей;

– высоким уровнем интенсивности работы деталей и узлов;

– повышением требований к надёжности и безотказности их работы.

С увеличением нагрузок в эксплуатации, уменьшением ресурса элементов машин, отклонениями в системе планово-предупредительного ремонта происходит увеличение удельных нагрузок на детали и узлы ВАЭ, что приводит в результате к снижению их надёжности.

Анализ показывает, что существующие методы расчёта надёжности на этапе проектирования не учитывают свойства структуры и функциональные связи между элементами электромеханической системы, в результате имеет место прохождение скрытых дефектов в эксплуатацию.

В связи с этим задача разработки методов расчёта надёжности изоляции ВАЭ и развитие методов описания существующей структуры и её межэлементных свойств является актуальной, решение которой позволит на этапе проектирования снизить уровень прохождения скрытых дефектов ВАЭ в эксплуатацию.

Степень разработанности. Большой вклад в разработку основных положений теории надёжности, разработку методов оптимизации конструкции, создание теоретических и практических основ для исследования надёжности сложных технических систем внесли известные российские и мировые учёные: Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Ф. Соловьев, Н.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский, Б.С. Сотсков, Е.С. Вентцель, В.И. Нечипоренко, И.А. Ушаков, R. Barlow,

F. Proschan. В развитии теории и практики исследования надёжности электрических машин большую роль играют работы Н.Ф. Котеленца, Н.П. Кузнецова, О.Д. Гольдберга, Н.П. Ермолина, И.П. Жерихина.

Анализ показывает, что основная часть методов расчёта надёжности электрических машин учитывает влияние основных факторов: перегрев изоляции обмоток, вибрацию и прочее, при этом существующие модели в большинстве случаев не учитывают изменения основных свойств элементов конструкции. Отсутствие подобной информации не даёт возможности адекватно оценить параметры ресурса деталей и узлов. Приведенные модели надёжности для машин составлены с учётом режимов их работы, при этом формулировка законов распределения отказов имеет общий вид без учёта изменения параметров и свойств, определяющих общее состояние узлов электрической машины.

Важные результаты получены при разработке методов расчёта с учётом надёжности основных узлов и результатов стендовых испытаний и эксплуатации (работы Н.Ф. Котеленца, Н.Л. Кузнецова). Вместе с тем использование методов планирования экспериментов не всегда даёт положительные результаты при оценке параметров надёжности. Известно, что электрические машины при нагревании и остывании имеют запаздывание изменения температуры относительно параметров нагрузки, поэтому проведение стендовых испытаний машины по матрице полного факторного эксперимента даст смещение оценки температуры нагревания частей машины. Следовательно, регрессионные модели не будут адекватными.

В настоящее время для облегчения расчёта ресурса деталей и узлов получили признание ускоренные испытания на усталость деталей и узлов машин. Полученная статистика даёт возможность определить коэффициенты, которые позволяют оценить их надёжность. Недостатком этих методов является то, что при изменении параметров элементов ЭМС полученные коэффициенты невозможно использовать для расчёта надёжности из-за большой их погрешности.

В последние годы широкое распространение получили структурные методы моделирования надёжности электромеханических систем, которые дают более точные оценки характеристик надёжности.

Практика применения разработанных структурных схем для расчёта $P(t)$ показала: из-за того, что в моделях не учитываются физические параметры, снижается точность оценок вероятности безотказной работы. В результате получается, что данные расчётов дают завышенные показатели надёжности, т.е. в систему оценок вводится систематическая погрешность. Таким образом, на

этапе проектирования из-за методической погрешности в эксплуатацию проникают скрытые дефекты, которые приводят к отказам машин в эксплуатации. Оценки *P(t),* полученные с учётом этих данных, всегда ниже по уровню, нежели данные, приведённые на этапе проектирования в техническом задании без учёта влияния физических факторов.

Целью работы является повышение качества расчётов эксплуатационной надёжности изоляции обмоток статора высоковольтных асинхронных электродвигателей нефтехимического производства мощностью от 200 до 5700 кВт.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– исследовать существующие аналитические методы оценки характеристик надёжности высоковольтных асинхронных электродвигателей на этапах их проектирования и эксплуатации с целью определения условий прохождения ошибок проектирования в эксплуатацию и уровня последствий отказов и неисправностей;

– разработать методику построения адекватных структурно-функциональных моделей узлов и деталей высоковольтных асинхронных электродвигателей и обосновать области принятых допущений;

– разработать методику формирования вероятностных уравнений, характеризующих надёжность элементов конструкции обмотки статора, с возможностью выбора рационального варианта по условию безотказности;

– разработать методику оценки эксплуатационной надёжности узлов и деталей ВАЭ с учётом влияния нагрузки и температуры на изоляцию обмотки статора;

– разработать методику оценки вероятностно-статистических характеристик режимов нагружения ВАЭ, представляющих собой случайный процесс, подчиняющийся закону Гаусса;

– оценить достоверность предлагаемых методик путём сравнения с результатами экспериментальных исследований показателей надёжности 108 единиц ВАЭ мощностью от 200 до 5700 кВт на производственной базе ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в том, что:

1. Выявлены и обоснованы основные факторы отклонения параметров надёжности при построении структурных схем, отражающих свойства конструкции обмотки статора ВАЭ, снижающие уровень адекватности существующих расчётных моделей.

2. Разработаны основные ограничения и допущения для формирования структурно-функциональных моделей, адекватно описывающих надёжность конструкции обмотки статора.

3. Предложены дифференциальные уравнения в частных производных, характеризующие вероятностные состояния изоляции катушек обмотки статора, учитывающие межэлементные связи конструкции узла, позволяющие определять рациональные варианты структурных схем и параметры элементов.

4. Разработана методика расчёта интенсивности отказов ВАЭ по причине повреждения изоляции обмотки статора при дискретном изменении её температуры в процессе эксплуатации для случая Гауссовского распределения величины нагрузки.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные методы моделирования и расчёта надёжности ВАЭ дают возможность использовать их при построении структурных схем для сложных конструкций электромеханических систем, отдельные элементы которых испытывают как механические, так и электрические нагрузки.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные научные и прикладные результаты могут быть использованы проектными, научно-исследовательскими институтами, промышленными предприятиями, где имеют место исследование и проектирование новых или модернизация существующих типов высоковольтных асинхронных электродвигателей. Методы расчёта могут быть использованы при совершенствовании системы планово-предупредительного ремонта (ППР) в эксплуатации путём расчёта рациональных сроков ремонта и определения его объёма.

Методы исследования. В работе использован метод моделирования для исследования надёжности сложных технических систем, оценки их параметров, построения структурных моделей и расчёта их характеристик.

Широко представлены основные теоремы теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций, на базе которых получены и обоснованы новые, более точные уравнения надёжности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принципы построения структурно-функциональных моделей конструкции изоляции высоковольтных асинхронных электродвигателей нефтехимического производства с учётом межэлементных связей и возможности формирования рациональных вариантов конструкции по критерию надёжности.

2. Математические модели и вероятностные дифференциальные уравнения, характеризующие надёжность обмотки статора ВАЭ при различных нагрузках и условиях эксплуатации.

3. Математические модели влияния нагрузки ВАЭ на свойства элементов обмотки статора, позволяющие произвести последующую оценку параметров интенсивности их отказов с возможностью итерационного выбора рационального варианта уровня надёжности узла.

4. Методика оценки вероятностно-статистических характеристик нагрузки электродвигателя, законов функции плотности распределения тока и мощности нагрузки ВАЭ и их влияния на надёжность.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, результатов достигаются применением основных теорем теории вероятностей и математической статистики и базируются на согласованности результатов моделирования и данных экспериментальных исследований, полученных в условиях производственного эксперимента.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных и научно-технических конференциях: Международная заочная конференция «Технические науки: проблемы и перспективы" (г. Санкт-Петербург, 2010); Международная заочная конференция "Технические науки в России и за рубежом" (г. Москва, 2011), XIV Международная научно-техническая конференции ФГАОУ ВПО Ур.ФУ им. Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, 2012), XIX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника, энергетика" (г. Москва, 2013), XVII аспирантско-магистерский научный семинар, посвящённый Дню энергетика (г. Казань, 2013), XV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (г. Алушта, 2014).

Внедрение. Результаты выполненных работ внедрены и используются на производствах ПАО «Нижнекамскнефтехим», г. Нижнекамск, для оценки надёжности и остаточного ресурса высоковольтных асинхронных электродвигателей и формирования ежегодного плана капитального ремонта и профилактического обслуживания. Методические разработки, опыт планирования экспериментальных работ и их результаты внедрены в учебном процессе кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» в лекционных курсах и лабораторном практикуме.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 8 научных статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 113 наименований, 1 приложения. Содержит 138 страниц основного машинописного текста, проиллюстрированного 15 рисунками и 20 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведены основные характеристики диссертационной работы: актуальность темы, степень разработанности, цель работы, научная новизна результатов, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, объём и структура диссертации.

В первой главе диссертации даётся анализ этапов развития теории надёжности электромеханических систем с учётом их проектирования, производства и эксплуатации. При этом показано, что существующие модели в большинстве случаев не учитывают условия изменения основных функциональных свойств элементов узла в эксплуатации. Отсутствие такой информации не даёт возможности адекватно оценить параметры надёжности и ресурса деталей и узлов.

На основании результатов аналитического исследования были выделены три основных направления развития методов расчёта надёжности изоляции ВАЭ. Одним из них являются элементные методы расчёта; вторым, более совершенным, – структурные методы оценки надёжности систем; третьим направлением можно считать структурно-функциональные методы, где учитываются функциональные параметры элементов системы.

Наиболее перспективным направлением является третье направление, – оно учитывает как свойства структуры изоляции ВАЭ, так и физические факторы.

Аналитические исследования показывают, что в этом случае модели, а также результаты расчётов надёжности могут быть наиболее адекватными по сравнению с существующими методами расчёта. Следовательно, на этапе проектирования изоляции ВАЭ могут быть значительно снижены риски ошибок, что позволит уменьшить вероятность прохождения машин с дефектами проектирования в эксплуатацию. Развитие данного направления исследования приводится в последующих главах.

Во второй главе приведён анализ элементной базы изоляции ВАЭ, на основании которого можно выделить основные детали: секции обмотки, витковую изоляцию, межвитковую изоляцию, изоляцию катушек, изоляцию корпусную, пазовый клин. Определена структурная схема элементной базы паза (рисунок 1). Все элементы системы связаны между собой физическими характеристиками: тепловыми, электрическими, механическими. Это позволяет учитывать их влияние на надёжность работы элементов и системы в целом

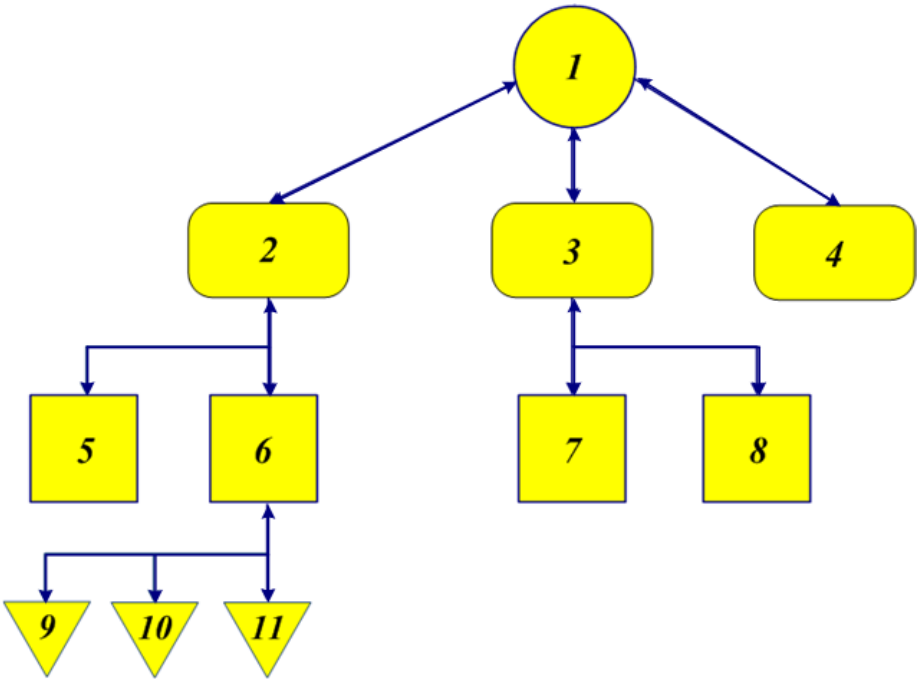

Рисунок 1 – Структурная схема элементной базы паза ВАЭ:
1 – паз статора; *2* – детали; *3* – соединение; *4* – геометрический параметр (допуски); *5* – секция; *6* – изоляция; *7* – натяг; *8* – зазор; *9* – витковая; *10* – катушки; *11* – корпусная.

Разработана методика формирования моделей с учётом элементов узла (паза) ВАЭ. Введён новый параметр в виде геометрического установочного размера узлов, который учитывает различные виды соединений элементов конструкции и их характеристики. Классификация элементной базы узла паза выполнена с учётом положений ГОСТ Р 51901-6-2005 «Менеджмент риска. Программа повышения надёжности». Полученные результаты исследований позволили разработать методику формирования структурно-функциональной модели конструкции паза, которая позволяет изучить объект в наиболее обобщённом виде с учётом свойств элементов паза статора. Это является важным положительным свойством, которое способствует использованию теории структурного анализа надёжности для оценки параметров элементов

паза статора. Таким образом, уделяя внимание функциональным связям между деталями паза, тем самым выдвигая на первый план структуру системы, а не её количественный состав, получаем возможность единообразного исследования систем, различных по своей природе.

На основе поэлементного анализа функциональных и конструктивных характеристик с использованием результатов выполненных исследований построена структурно-функциональная модель паза ВАЭ, приведенная на рисунке 2. Данная модель даёт возможность исследовать электромеханическую систему учётом элементной базы и функциональных межэлементных связей, что является важным свойством методики, которая позволяет использовать структурно-функциональный анализ в теории надёжности.

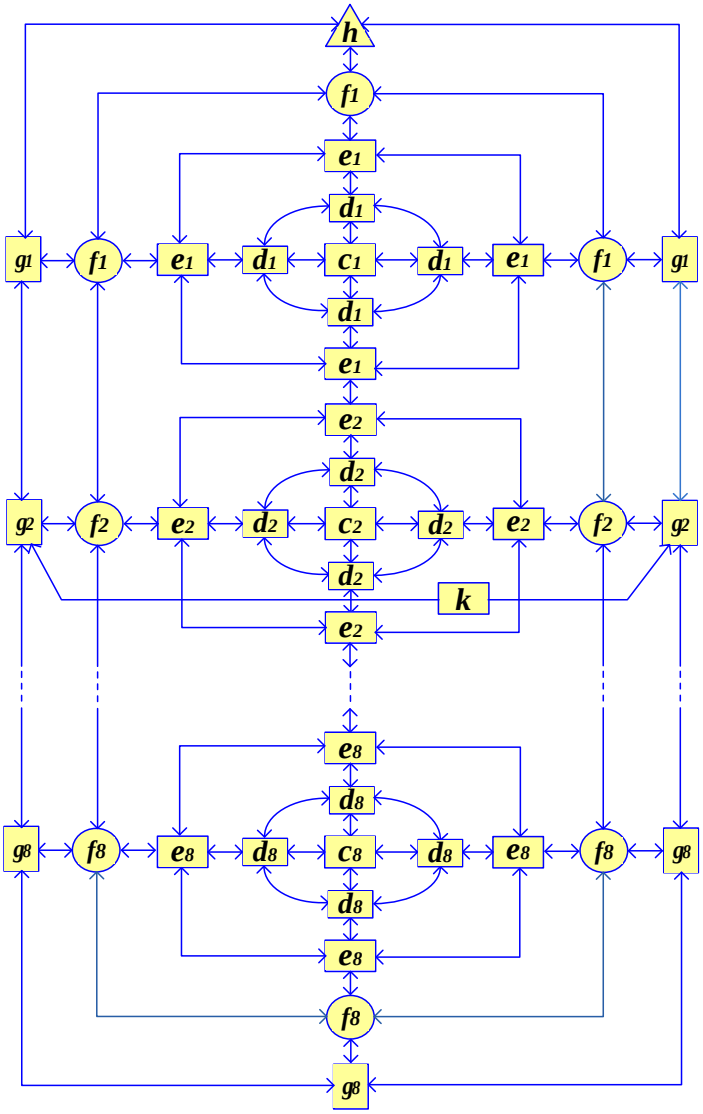

Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема элементной базы паза статора ВАЭ.

c_i – секция обмотки статора; d_i – изоляция секций катушек; e_i – изоляция катушек обмотки; f_i – изоляция корпусная; g_i – железо сердечника якоря; k – пазовый клин; h– геометрический параметр.

Необходимо отметить, что данная методика построения модели не ограничивается числом элементов и функциональных связей между ними, точность оцениваемых параметров надёжности при этом не зависит от числа функциональных характеристик.

Вместе с этим основное внимание уделено выявлению взаимных функциональных связей между элементами системы с учётом структуры паза как системы, а не отдельной группы, что придаёт данной методике универсальность, которая позволяет одинаково исследовать различные по своей природе подсистемы в пределах определённой конструкции. Например, исследовать элементы системы, имеющие только механические, только электрические либо совмещённые связи.

Рассмотрим элементы структуры c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, k (рисунок 2). Из приведенной структурно-функциональной схемы видно, что количество межэлементных связей не одинаково. Например, c_i и g_i имеют одну функциональную связь, а элементы d_i и f_i имеют две функциональные связи. Это говорит о том, что надёжность элементов структуры должна быть ранжирована относительно связности деталей узла паза. Это будет характеристикой элемента по его связности. Чем больше связей, тем выше значимость элемента с точки зрения надёжности. Все изложенные особенности относятся к анализу качества структурной схемы и её адекватности

Важнейшей характеристикой надёжности работы паза ВАЭ является вероятность его безотказной работы. Она характеризуется его элементной базой и отказами элементов в эксплуатации. Отказы во времени имеют случайный характер и могут происходить при осуществлении ряда совокупности эксплуатационных условий. Необходимо отметить, что отказы элементов могут происходить несовместно или совместно. Будем считать, что в расчётах используется статистика об отказах элементов при условии отсутствия последействия, − в этом случае полученные потоки отказов деталей паза будут адекватными.

На основе модели, приведенной на рисунке 2.2, определим вероятностные выражения узла паза статора:

$$
\begin{gathered}
P_{1.1}\,(g_1)\cdot P_{1.2}\,(f_1)\cdot P_{1.3}\,(e_1)\;P_{1.4}\,(d_1)\;P_{1.5}\,(c_1)\;P_{1.6}\,(k)\leq P_{1.}\\
P_{2.1}\,(g_2)\;P_{2.2}\,(f_2)\;P_{2.3}\,(e_2)\;P_{2.4}\,(d_2)\;P_{2.5}\,(c_2)\;P_{2.6}\,(k)\leq P_2\\
\vdots\\
P_{8.1}\,(g_8)\;P_{8.2}\,(f_8)\;P_{8.3}\,(e_8)\;P_{8.4}\,(d_8)\;P_{8.5}\,(c_8)\;P_{8.6}\,(k)\leq P_8
\end{gathered}
\qquad (1)
$$

При этом должно соблюдаться необходимое условие:

$$P_1 \cdot P_2 \ldots \cdot P_8 \leq 1 \,. \tag{2}$$

В начальной стадии эксплуатации после завершения периода приработки левая часть уравнения должна равняться 1. Затем, в период установившегося износа элементов системы она будет асимптотически уменьшаться от 1 до 0.

Полученные неравенства позволяют расчётным путём определять рациональные параметры надёжности элементов.

Отказы деталей паза во времени представляют собой поток отказов. По условиям исследования принят простейший вид потока, удовлетворяющий свойствам стационарности, отсутствия последействия и ординарности.

Получены уравнения вероятности отказа деталей паза Q_i по конструктивному признаку для различных звеньев структуры паза ВАЭ с первого по восьмое с учётом функциональных связей между элементами.

Для первого звена паза выражение вероятности отказа будет иметь вид:

$$Q_1(t) = Q_{g1}+(1-Q_{g1})Q_{f1}+(1-Q_{g1})(1-Q_{f1})Q_{e1}+(1-Q_{g1})(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})Q_{d1}+ \\ +(1-Q_{g1})(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})Q_{c1}+(1-Q_{g1})(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})Q_{k1} \tag{3}$$

Определим уравнения для второго звена паза:

$$Q_2(t) = Q_{g2}+(1-Q_{g2})Q_{f2}+(1-Q_{g2})(1-Q_{f2})Q_{e2}+(1-Q_{g2})(1-Q_{f2})(1-Q_{e2})\, Q_{d2}+ \\ +\, (1-Q_{g2})(1-Q_{f2})(1-Q_{e2})(1-Q_{d2})Q_{c2}+(1-Q_{g2})(1-Q_{f2})(1-Q_{e2})(1-Q_{d2})(1-Q_{c2})Q_{k2} \tag{4}$$

Далее, составив по аналогии следующие уравнения для 3÷8 звеньев, приведём уравнение для самого нижнего слоя, находящегося на дне паза:

$$Q_8(t) = Q_{g8}+(1-Q_{g8})Q_{f8}+(1-Q_{g8})(1-Q_{f8})Q_{e8}+(1-Q_{g8})(1-Q_{f8})(1-Q_{e8})Q_{d8}+ \\ +(1-Q_{g8})(1-Q_{f2})(1-Q_{e8})(1-Q_{d8})Q_{c8}+(1-Q_{g8})(1-Q_{f8})(1-Q_{e8})(1-Q_{d8})(1-Q_{c8})Q_{k8} \tag{5}$$

Разработка оптимального варианта определения надёжности узла является сложной задачей. Поэтому ограничимся тем, что дадим оценку совокупной надёжности элементов паза, которая будет выполняться в направлении оценки и оптимизации параметров надёжности системы на основании полученных аналитических зависимостей вероятности отказов элементов системы. Для этого перейдём от звеньев к системе в целом.

Примем ранее указанные допущения, используя теорему сложения вероятностей. Тогда для паза выражение вероятности отказа будет равно:

$$Q_{\sum}(t) = Q_1+(1-Q_1)Q_2+(1-Q_1)(1-Q_2)Q_3+(1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)Q_4 +$$
$$+ (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)Q_5+(1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)\ Q_6 +$$
$$+ (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)(1-Q_6)Q_7 + \qquad (6)$$
$$+ (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)(1-Q_6)(1-Q_7)\cdot Q_8.$$

Таким образом, полученные уравнения позволяют решить две важные задачи. Первая – исследовать надёжность элементной базы машины на этапе проектирования с целью выявления слабых звеньев, используя априорные данные о надёжности секций катушек, витковой изоляции, корпусной изоляции и др. Вторая – определить рациональные уровни ВБР и наработки на отказ элементов, которые позволили бы реализовать в эксплуатации установленный уровень надёжности машины. Безусловно, заложенные в уравнениях межэлементные связи позволяют повысить адекватность оценок характеристик надёжности элементной базы и в целом надёжность исследуемого узла за счёт увеличения точности расчёта.

Для определения характера режимов нагрузки ВАЭ были проведены экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации на ПАО "Нижнекамскнефтехим". Исследования проводились в течение года. Данные о нагрузке по дням были обработаны вероятностно-статистическими методами.

Анализ статистической информации показывает, что нагрузка ВАЭ представляет собой случайный процесс, подчиняющийся закону Гаусса с математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ, т.е. $f(x) = \exp\{m;\sigma\}$. Для исследования случайной функции на соответствие принятой гипотезе определена случайная выборка из генеральной совокупности, множества $x \in R$. Функция плотности распределения нагрузки будет иметь выражение

$$P(\alpha \le x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)\,dx, \qquad (7)$$

где α и β – границы интервала, $f(x)$ – функция плотности распределения нагрузки ВАЭ.

Полученные результаты дают возможность расчётным путём по приведенной формуле определить математическое ожидание для каждого интервала данной выборки, затем и для всей выборки. Далее, определив дисперсию и среднеквадратическое отклонение, становится возможным

оценить параметры случайной величины (нагрузки) в производственных условиях для ВАЭ.

Все результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1– Моделирование режимов нагрузки ВАЭ

m	x_{m-1}	x_m	n_m	P_m	x_m^*	$x_m^* P_m$	$x_m^* - x^0$	$(x_m^* - x^0)^2$	$(x_m^* - x^0)^2 \cdot P_m$
1	10	20	3	0,011	15	0,165	-40	1600	17,6
2	20	30	10	0,039	25	0,975	-30	900	35,1
3	30	40	26	0,097	35	3,395	-20	400	38,8
4	40	50	61	0,236	45	10,620	-10	100	23,6
5	50	60	59	0,197	55	10,836	0	0	0
6	60	70	65	0,251	65	16,315	100	100	25,1
7	70	80	33	0,127	75	9,525	400	400	50,8
8	80	90	11	0,042	85	3,570	900	900	37,8

Для дальнейшего использования полученных результатов исследования произведена проверка гипотезы о подчинении нормальному закону распределения, для чего проведён расчёт n_r, t_r-1, t_r (таблица 2). Определена вероятность P_r попадания случайной величины в r-ый интервал.

Для оценки сходимости функции плотности распределения с гипотетической использован критерий Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{r=1}^{k_r} \frac{(n_r - n \cdot p_r)^2}{n \cdot \tilde{p}_r} \tag{8}$$

Сравнительный анализ критерия χ^2 и границы критической области говорят о том, что $\chi^2 > \chi^2_{кр}$, т.е. статистический ряд не противоречит гипотезе о нормальном законе распределения нагрузки ВАЭ. В диссертации приведены её графические зависимости. Все рассчитанные характеристики сведены в таблицу 2.

Таблица 2– Проверка гипотезы по критерию Пирсона

r	n_r	t_{r-1}	t_r	$\Phi_0(t_{r-1})$	$\tilde{p}_r$	$n\tilde{p}_r$	$n_r - n\tilde{p}_r$	$(n_r - n\tilde{p}_r)^2$	v_r^2
1	3	∞	-2,33	-0,4898	0,0102	$\frac{2,64}{\sim 3}$	0	0	0
2	10	-2,33	-1,66	-0,4515	0,0383	$\frac{9,92}{\sim 10}$	0	0	0
3	25	-1,66	-1,00	-0,3159	0,1356	$\frac{35,12}{\sim 35}$	-10	100	2,857
4	61	-1,00	-0,33	-0,1293	0,1866	$\frac{48,33}{\sim 49}$	12	144	2,938
5	51	-0,33	0,33	0,1293	0,2586	$\frac{66,98}{\sim 67}$	-16	256	3,821
6	65	0,33	1,00	0,3415	0,2122	$\frac{54,95}{\sim 55}$	10	100	1,820
7	33	1,00	1,67	0,4525	0,1110	$\frac{28,75}{\sim 30}$	3	9	0,313
8	11	1,67	2,33	0,4900	0,0375	$\frac{9,71}{\sim 10}$	1	1	0,103

Приведенные результаты дают важное подтверждение ранее принятой гипотезе – режим нагрузки ВАЭ характеризуется Пуассоновским потоком и подчиняется закону Гаусса. На рисунке 3 приведена графическая зависимость функции плотности распределения нагрузки ВАЭ, построенная по данным исследований режимов работы в производственных условиях.

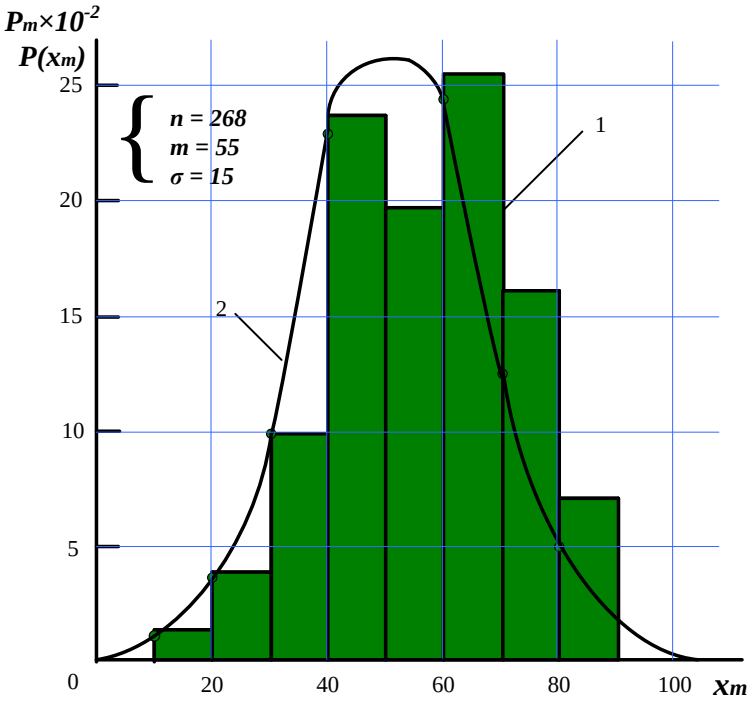

Рисунок 3 – Статистические характеристики эксплуатационных режимов нагрузки ВАЭ.

1 – гистограмма, 2 – кривая плотности распределения вероятности.

В третьей главе проведены исследования влияния эксплуатационных факторов на надёжность ВАЭ. Важной особенностью экспериментальных исследований является то, что они проводятся в условиях непрерывного производственного процесса. Эксперимент проводился пассивный, т.е. параметры производственного процесса не изменялись. Исследования дали возможность определить температурные режимы изоляции. Материалы измерений нагрузок (активной мощности) были обработаны методами теории вероятностей и математической статистики которые в данном случае имеют ряд важных преимуществ по сравнению с интегрально-дифференциальными методами. Важной характеристикой принятых методов обработки результатов исследования является возможность расчёта оценок непосредственно по данным выборки, при этом необходимо учитывать, что при вычислении оценки дисперсии величина $\bar{x}$ берется с тем же количеством значащих цифр, что и величины x_i. Приняты следующие условия: массив данных представляет случайные события; они не коррелированы между собой; функция плотности распределения нагрузки представляет $N = \{x, m_x, \sigma_x\}$.

Результаты испытаний обработаны и приведены в таблице 3.

Разработанная методика, учитывающая Гауссовское распределение нагрузки, позволила определить её влияние на перегрев изоляции и её ресурс (таблица 3).

Таблица 3– Зависимость интенсивности отказов от величины перегрева изоляции обмотки статора

$\Delta\theta$, ^0C	$B\theta$	$e^{-B\theta}$	$\lambda_э$	*T, лет*
0	0	1,00	0,10	10,0
10	0,86	0,42	0,24	4,20
20	1,73	0,18	0,56	1,79
30	2,60	0,074	1,35	0,74
40	3,46	0,031	3,23	0,31

В результате были получены важные характеристики нагревания ВАЭ и вероятностные параметры интенсивности отказов λ и срока службы Т.

На рисунках 4, 5 показаны графические зависимости функции *P(t)* от наработки.

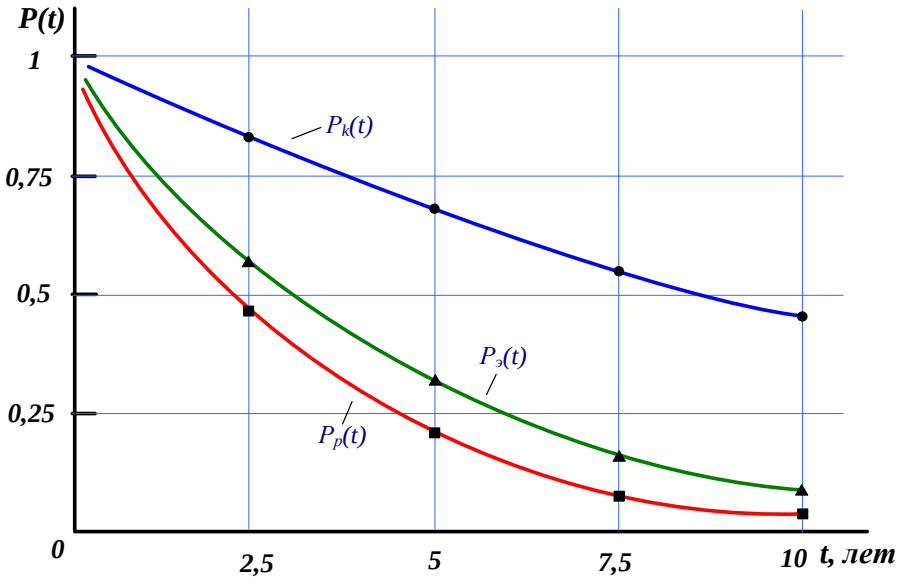

Рисунок 4 − Вероятность безотказной работы узла в функции времени. $P_k(t)$ – конструктивные факторы; $P_э(t)$ – эксплуатационные факторы; $P_p(t)$ – результирующая надёжность.

Графические зависимости показывают соотношение ВБР для конструктивных и эксплуатационных факторов в функции от наработки. Эти данные в дальнейшем могут быть использованы для оценки качества проектирования узла ВАЭ.

Полученные результаты исследования нагрузок дают возможность установить влияние характеристик нагрузок на температуру обмотки ВАЭ в широком диапазоне эксплуатационных режимов работы.

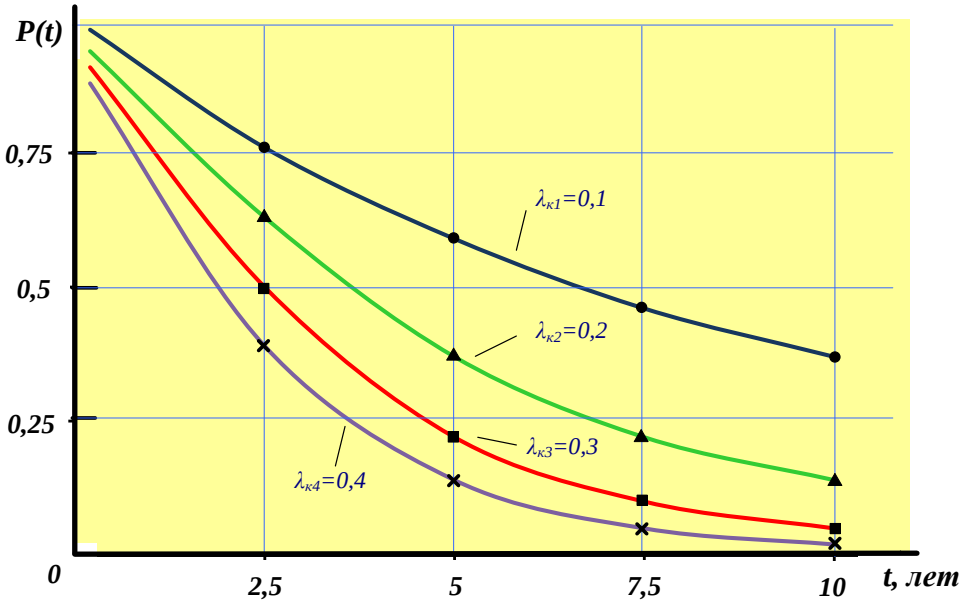

Рисунок 5 – Характеристики надёжности изоляции паза статора ВАЭ для различных интенсивностей отказов.

Поведение нагрузки в эксплуатации в интервале большого времени работы ВАЭ подчиняются гауссовскому закону – $N=\{x;\ m_x;\ \sigma_x\}$. Поэтому можно считать, что это условие должно соблюдаться на любом интервале нагрузок.

В четвёртой главе изложены результаты анализа испытаний 108 электродвигателей. В таблице 4 приведены статистические характеристики надёжности деталей паза при различных видах отказов.

Таблица 4 – Результаты испытаний обмоток статора ВАЭ

№ п/п	Параметры деталей	Размер-ность	Витковая изоляция (пробой)	Пробой катушки статора	Пробой изоляции корпуса	Обрыв секции (витка)	Надеж-ность узла $\sum T_i$
1	Отказ	кол-во	987	1886	516	31	3420
2	N	ед.	27	65	14	1	108
3	λ	1/год	0,027	0,035	0,027	0,032	0,121

Наименьшую интенсивность отказов имеют витковая и корпусная изоляция. На рисунке 4 приведены графические зависимости ВБР ВАЭ, полученные на основании эксплуатационных испытаний, где показаны характеристики для каждой детали паза в функции от наработки:

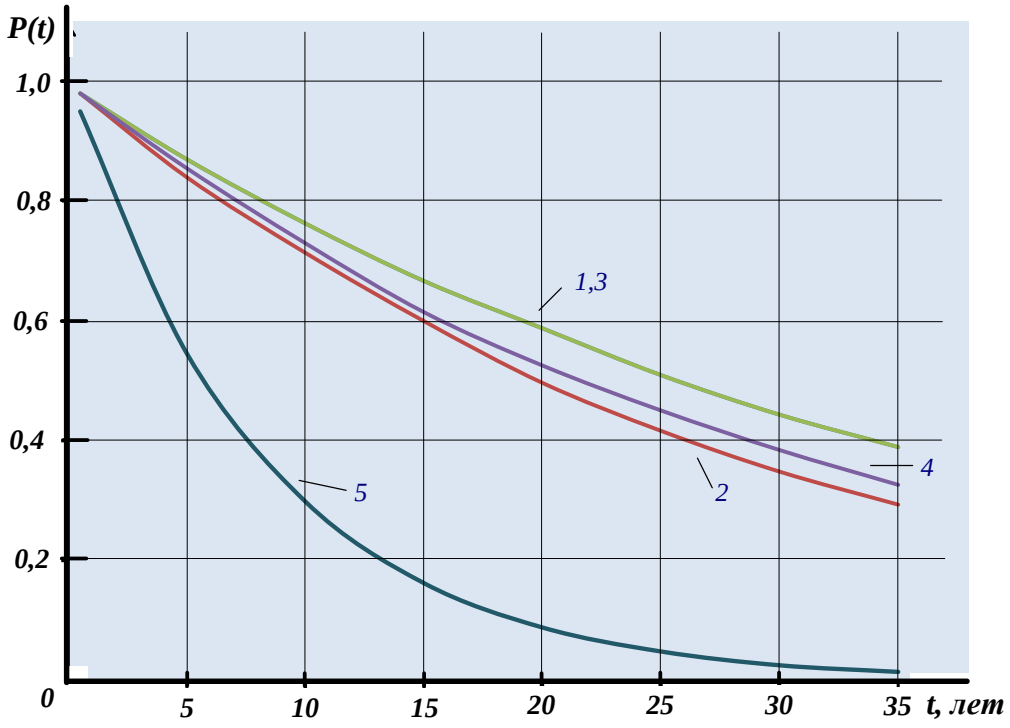

Рисунок 6 – ВБР деталей обмотки статора ВАЭ

Кривые 1, 3 характеризуют надёжность витковой и корпусной изоляции, кривая 2 – надёжность изоляции катушки, кривая 4 – надёжность меди секции, кривая 5 − ВБР узла в целом.

Из графических зависимостей видно, что кривые 1÷4 имеют практически одинаковую надёжность. Это можно объяснить надлежащим качеством проектирования, изготовления, эксплуатации.

На надёжность изоляции существенное влияние оказывает дисперсия нагрузок ВАЭ, которая зависит от загрузки технологического оборудования.

Для наглядности показаны графические зависимости надёжности в целом для паза, а также для составляющих его элементов (рисунок 7). Наименее надёжным элементом является изоляция секций катушек, в эксплуатации наблюдаются частые отказы указанного элемента. К моменту капитального ремонта 35 % случаев отказов элементов обмотки статора ВАЭ приходится на повреждения секций катушек.

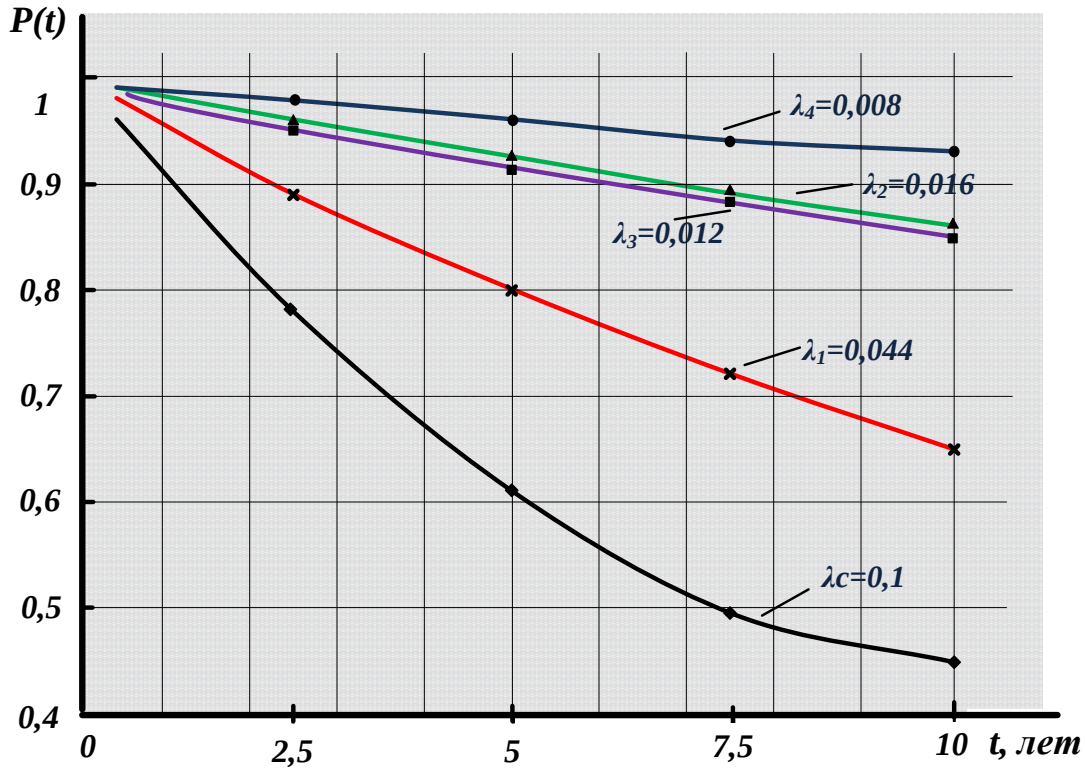

Рис. 7 – Характеристики надёжности элементов паза статора ВАЭ

Графические зависимости $P(t) = f(t)$ дают статистическую оценку надёжности узла. При этом, как было отмечено ранее, не учитывается влияние функциональных факторов температуры. Из графических данных видно, что наименьшую надёжность в эксплуатации имеет изоляция секции, т.е. она является наиболее слабым элементом паза статора. Следовательно, в процессе

проектирования необходимо усилить её путём качественного изменения материалов, условий нагружения секций, введения в конструкцию новых материалов, улучшения условий охлаждения.

В заключение, на основании полученных зависимостей можно сделать вывод − каждый высоковольтный асинхронный электродвигатель нефтехимического производства после 10 лет эксплуатации требует капитального ремонта.

В приложении показаны характер повреждения изоляции обмотки статора 108 позиций высоковольтных асинхронных электродвигателей с указанием заводского номера и года выпуска, а также объём выполненных ремонтных работ по восстановлению работоспособности ВАЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании результатов проведённых аналитических и экспериментальных исследований, анализа и классификации элементной базы ВАЭ по конструктивному признаку установлены законы функций плотности распределения нагрузок и надёжности. Предложенные методы и алгоритмы расчётов для детального структурного анализа конструкций узлов с учётом элементной базы системы позволяют определить рациональные уровни надёжности на этапе их проектирования.

2. Рекомендованный параметр – h, характеризующий установочный размер узлов машины для различных видов соединений элементов конструкции, учитывает влияние производственных, технологических отклонений на надёжность ВАЭ. В итоге это даёт возможность повысить точность моделирования и расчётов.

3. На основании данных экспериментальных исследований доказано, что режим нагрузки ВАЭ в производственных условиях характеризуется Пуассоновским потоком и удовлетворяет условиям эргодичности, подчиняется закону Гаусса. Установлено влияние перегрузок в эксплуатации на нагрев изоляции паза статора и её ресурс. При температуре обмотки 92,4 ºС – λ=0,048 1/год, при температуре 96,8 ºС – λ=0,07 1/год, при 101,2 ºС – λ=0,103 1/год.

4. Максимальное отклонение параметров надёжности элементов паза статора, полученных расчётным путём по разработанным методикам с использованием структурно-функциональных моделей, относительно экспериментальных данных не превышает – 5%.

5. Для обмотки статора ВАЭ нефтехимического производства установлено следующее: наибольшую интенсивность отказов имеют случаи пробоя изоляции катушки паза – λ=0,035 1/год, наименьшую интенсивность

имеют повреждения витковой изоляции и случаи пробоя изоляции на корпус (паз) – λ=0,027 1/год.

6. Разработанные модели надёжности, методы расчёта, их опытная эксплуатационная проверка в производственных условиях дают основание считать их адекватными, а полученные оценки параметров надёжности изоляции ВАЭ – несмещёнными и состоятельными. В результате на этапе проектирования открылись возможности рационального выбора вариантов параметров надёжности элементной базы узлов, которые рекомендованы в производство и эксплуатацию ВАЭ, а также в учебный процесс.

7. Исследования надёжности ВАЭ с использованием разработанных в работе алгоритмов и моделей структурно-функциональных схем с учётом свойств межэлементных связей позволяют в дальнейшем совершенствовать данное направление для случаев, когда отдельные элементы конструкции электромеханических систем испытывают одновременно механические и электрические нагрузки, что является перспективным направлением дальнейших исследований, дающих возможность повысить точность оценок их параметров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Попов, А.В. Экспериментальное исследование эксплуатационной надёжности коллекторов генератора тепловоза / Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов, Н.Р. Зайнуллина, Р.Е. Максимов // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. – 2011. – № 9–10. – С. 173−176.

2. Попов, А.В. Алгоритм расчёта оптимальных токов моментного вентильного двигателя в установившемся режиме работы / Е.В. Тумаева, А.В. Попов // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. № 19. – С. 86–91.

3. Попов, А.В. Оценка эксплуатационной надежности тяговых генераторов / Р.Г. Идиятуллин, А.Н. Хуснутдинов, А.М. Вдовин, А.В. Попов, Л.Н. Киснеева // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. – 2012. – № 11−12. – С. 108−114.

4. Попов, А.В. Исследование влияния эксплуатационных факторов на температурное поле обмотки якоря генератора ГП-311Б / А.Н. Хуснутдинов,

Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В Попов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. − № 1. – С. 437−438.

5. Попов, А.В. Выбор возбудительного устройства синхронных двигателей для работы в условиях нефтехимического производства / Е.В. Тумаева, А.В. Попов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. − № 15. – С. 200–201.

6. Попов, А.В. Исследование и совершенствование методов расчёта надёжности элементов электротехнических комплексов и систем / А.В. Попов // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. – 2015. № 3−4. − С. 114−123.

7. Попов, А.В. Экспериментальное исследование режимов нагрузки асинхронных электродвигателей в производственных условиях / А.В. Попов, Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев // Энергетика Татарстана. – 2016. № 2. − С. 76−79.

8. Попов, А.В. Методика расчёта надёжности обмоток высоковольтных асинхронных электродвигателей / А.В. Попов, Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. – 2016. № 5−6. − С. 103−108.

Публикации в других научных изданиях:

9. Попов, А.В. Повышение эффективности системы электроснабжения энергонасыщенного производства / Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов. − Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. − 226 с.

10. Попов, А.В. Методика оценки надёжности изоляции секций катушек синхронных машин / Р.Г. Идиятуллин, Т.Е. Смердова, А.М. Вдовин, А.В. Попов // Технические науки: проблемы и перспективы: Междунар. заочная конф.– С-Пб.: Реноме, 2011. – С. 163–165.

11. Попов, А.В. Разработка методики оценки ранга элемента в системе возбуждения электрической машины / Р.Г. Идиятуллин, Т.Е. Смердова, А.М. Вдовин, А.В. Попов А.В. // Технические науки в России и за рубежом: Междунар. заочная конф.– М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. – С. 51–54.

12. Попов, А.В. Исследование энергетических характеристик электроприводов энергонасыщенного производства / Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов А.В, А.Н. Хуснутдинов // Электроприводы переменного

тока: XV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – С. 187–188.

13. Попов, А.В. Повышение эксплуатационной надёжности генераторов ГП-311Б тепловозов / А.Н. Хуснутдинов, А.М. Вдовин, А.В. Попов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. –Т. 2. – С. 204.

14. Попов, А.В. Оценка потерь мощности участков цепи 0,4 кВ с учётом характеристики реактивной мощности / А.Н. Хуснутдинов, А.В. Попов, А.М. Вдовин // Семнадцатый аспирантско-магистерский науч. семинар, посвящ. Дню энергетика. Казань, КГЭУ, 2013. – С. 155−156.

15. Попов, А.В. Экспериментальные исследования эксплуатационной надёжности обмотки асинхронного электродвигателя / Р.Г. Идиятуллин, Л.Н. Киснеева, А.Э. Аухадеев, А.М. Вдовин, А.В. Попов // Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты: Труды XV междунар. науч.-техн. конф. МКЭЭЭ-2014 (ICEEE-2014). – М.: Изд-во Института электротехники ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», 2014. – С. 86–88.

Попов Александр Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2016 г. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать оперативная
Гарнитура «Times». Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ №