

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

Попов Александр Владимирович

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Специальность – 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Идиятуллин
Ринат Гайсович

Казань – 2016 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ | 11 |
| 1.1 Структурные методы моделирования и расчёта надёжности | 19 |
| 1.2 Структурно-функциональные методы моделирования и расчёта надёжности | 21 |
| 1.3 Методы моделирования и расчёта надёжности, учитывающие влияние эксплуатационных факторов | 24 |
| 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ЭМС С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ .. | 31 |
| 2.1 Основные требования и принятые допущения к надёжности ВАЭ на этапе проектирования. | 31 |
| 2.1.1 Характеристика элементной базы паза статора ВАЭ. | 31 |
| 2.1.2 Обеспечение заданной надёжности электродвигателей при проектировании | 35 |
| 2.2 Методика формирования структурных моделей узла паза статора ВАЭ | 37 |
| 2.3 Моделирование ВБР элементной базы паза обмотки статора ВАЭ с использованием вероятностно-статистических методов | 45 |
| 2.4 Моделирование режимов нагрузки ВАЭ методами теории вероятностей и математической статистики | 58 |
| 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ВАЭ | 65 |
| 3.1 Моделирование влияния перегрева изоляции паза статора на её ВБР | 65 |
| 3.2 Разработка методики и организация экспериментальных исследований ВАЭ в производственных условиях. | 76 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.3 | Температурные режимы работы ВАЭ. | 80 |
| 3.4 | Исследования режимов активной и реактивной нагрузок в производственных условиях | 85 |
| 4 | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАТОРА ВАЭ. | 96 |
| 4.1 | Исследование надёжности ВАЭ в производственных условиях | 96 |
| 4.2 | Исследование влияния нагрузки и температуры на надёжность обмотки ВАЭ. | 102 |
| 4.3 | Оценка надёжности ВАЭ с использованием структурно-функциональных моделей | 109 |
| | Заключение. | 118 |
| | Список литературы. | 120 |
| | Приложение А. Сведения о ремонтах ВАЭ, связанных с восстановлением повреждённой обмотки статора | 131 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. 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%.

На рисунке 1.1 показан характерный вид отказа обмотки статора ВАЭ.



Рисунок 1.1 – Разрушение витковой и корпусной изоляции статора ВАЭ

Разрушение произошло в результате пробоя изоляции катушек. Данный вид отказа является тяжёлым и требует капитального ремонта двигателя с заменой катушек.

На рисунке 1.2 показан характерный вид отказа, когда пробой изоляции привёл к перекрытию обмотки мощной электрической дугой, в результате произошло полное разрушение изоляции катушек.

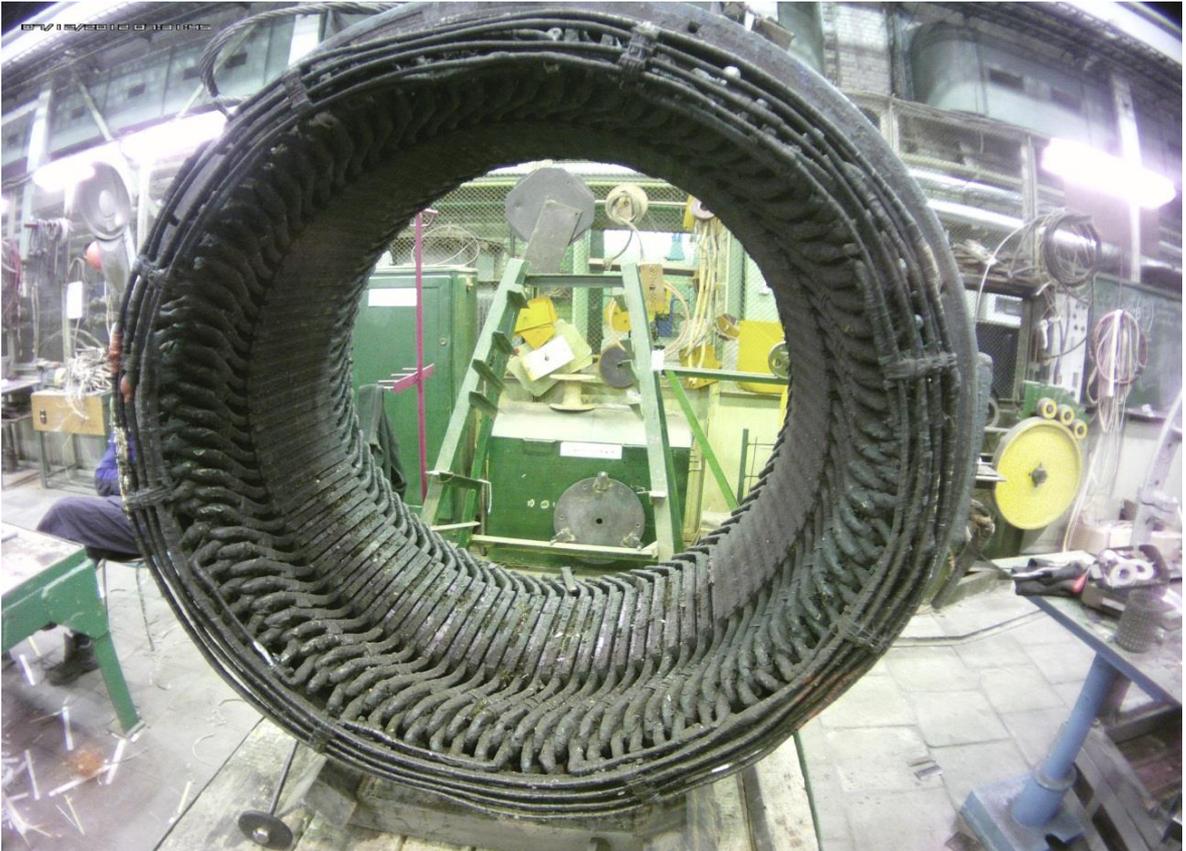


Рисунок 1.2 – Перекрытие обмотки мощной электрической дугой

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 эксплуатационных нагрузок, уменьшением ресурса элементов машин, отклонениями в системе планово-предупредительного ремонта

происходит увеличение удельных нагрузок на детали и узлы ВАЭ, что в результате приводит 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, И.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.Л. Кузнецова, О.Д. Гольдберга, Н.П. Ермолина, И.П. Жерихина.

Цель работы – 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 «Нижекамскнефтехим».

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 «Нижекамскнефтехим», 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 «Казанский государственный энергетический университет» в лекционных курсах и лабораторном практикуме.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 6 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.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из важных этапов формирования надёжности высоковольтного асинхронного электродвигателя (ВАЭ) нефтехимического производства является определение значений его показателей с использованием расчётных методов, основанных на справочных данных деталей и узлов машины по сведениям об отказах и неисправностях в эксплуатации, данных о характеристиках и свойствах материалов и другой информации, используемой к моменту расчёта.

Основными этапами расчёта надёжности при проектировании ВАЭ являются:

– обоснование технических условий и требований к проектируемому ВАЭ, его деталям и узлам;

– анализ надёжности различных конструктивных решений с обоснованием оптимального варианта;

– расчёт ожидаемого уровня надёжности ВАЭ, его деталей и узлов, параметров функций плотности распределения отказов комплектующих деталей;

– проверка эффективности рекомендуемых предложений по совершенствованию конструкции с целью повышения эксплуатационной надёжности;

– оценка соответствия надёжности разработанного ВАЭ уровню характеристик, предусмотренных в техническом задании (ТЗ) на проектирование.

Анализ надёжности электрических машин, представленный в [1÷3], показал, что основная часть методов расчёта 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.

Проблеме повышения надёжности электрических машин посвящена работа Н.Ф. Котеленца, Н.Л. Кузнецова [2], где получены важные результаты при разработке методов расчёта с учётом надёжности основных узлов и результатов стендовых испытаний и эксплуатации. 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.

Одним из эффективных способов повышения надёжности электрической машины (ЭМ) является перепроектирование обмоточных данных статора. При этом фактически отсутствует возможность увеличения мощности на валу, однако, с учётом её запаса, можно добиться снижения температуры катушек статора и улучшения энергетических параметров [3, 4]. Снизить соответствующую вибрацию можно частично или полностью, ликвидируя несимметрию магнитной системы. Сказанное является трудоёмким и требует больших материальных затрат, поэтому считать это направление перспективным нельзя.

Впервые основные фундаментальные положения теории надёжности изложены в [5]. Теория надёжности в своей основе широко использует основные теоремы теории вероятностей и математической статистики. 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 учёные Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Ф. Соловьев, В.А. Острейковский, И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский, Б.С. Сотсков, Е.С. Вентцель, В.И. Нечипоренко, И.А. Ушаков. В развитии теории и практики исследования надёжности электрических машин

большую роль играют работы Н.Ф. Котеленца, Н.Л. Кузнецова, О.Д. Гольдберга, Н.П. Ермолина, И.П. Жерихина.

Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляевым, А.Д. Соловьёвым [7] были изложены основы надёжности сложных систем при известных законах распределения постепенных и внезапных отказов. Однако не было дано условий, при которых формируется модель функции плотности распределения совместных отказов. Авторы в [17], развивая это направление, показали, что в элементах электромеханических систем (ЭМС) могут иметь место отказы, которые приводили бы к их разрушению. В этом случае функция плотности распределения может быть выражена формулой полной вероятности.

Впервые была введена методика расчёта вероятности безотказной работы, где надёжность определяется с использованием экспоненциальных функций распределения в [16]. Вместе с тем анализ показывает, что данная функция предполагает большой запас надёжности для элементов системы, что не всегда может быть применимо в отдельных практических случаях. Авторы в [7, 8] показали, что надёжность системы в значительной мере зависит от соотношения установленных нагрузок в эксплуатации. Показано, что длительное превышение эксплуатационных нагрузок относительно предельно-допустимых значений может существенно влиять на надёжность работы системы. Авторы в [13, 18, 19] показали, что при независимых отказах системы вероятность безотказной работы (ВБР) может быть произведением ВБР элементов системы.

В работе [20] установлены границы высоконадёжных систем с использованием функции плотности распределения отказов системы. Используется участок функции, где отказы имеют очень низкий уровень вероятности. Определены границы надёжности для авиационной и космической техники, ВБР которой равна 0,9999. Дано доказательство того, что для высоконадёжных систем возможно в расчётах использовать экспоненциальный закон. Это относится к постепенным и внезапным отказам. Даны рекомендации: использование экспоненциального закона не рекомендуется, когда наработка на

отказ превышает предельно-допустимое значение; данный закон хорошо описывает ВБР в области больших значений надёжности.

Методика, приведенная в [21], предполагает использование закона Вейбулла, который хорошо отражает постепенные и внезапные отказы карьерных самосвалов с электрическим приводом. Разработаны программы расчёта надёжности для определения характеристик надёжности электрического оборудования. В [22] показано, что надёжность системы может быть определена путём построения диаграммы накоплений вероятности отказов.

В работах [23, 24] использованы методы алгебры теории логики. Разработан метод, который использует расчёт надёжности системы путём ортогонализации параметров надёжности. Недостатком методов является ограниченность их применения в решении практических задач. В практических случаях используется схемно-логический метод расчёта надёжности структурно-сложных систем [25]. Указанные методы имеют серьёзный недостаток – они не универсальны и не могут быть использованы для расчёта надёжности ЭМС, т.к. не учитывают свойства конструкции и функциональные связи.

Для случаев, когда наработка на отказ представляет собой монотонные функции в условиях ограниченной статистики, методика расчёта надёжности предложена R. Barlow, F. Proschan [26]. Анализ методов показывает, что при аппроксимации функции могут быть допущены ошибки, которые могут превышать 5 % и более. Наиболее точным методом оценки надёжности является используемая в расчётах статистика отказов и неисправностей, однако такой подход имеет существенный недостаток, т.к. требует значительного количества времени для проведения испытаний [27].

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 [28÷30]. Недостатком этих методов является то, что при изменении параметров элементов ЭМС полученные коэффициенты невозможно использовать для расчёта надёжности из-за большой их погрешности.

В работах [31, 32] рекомендуется за счёт увеличения срока испытаний ЭМС сократить количество испытываемых объектов (4÷6 экземпляров), однако резкое возрастание срока испытаний не всегда устраивает экспериментатора из-за дороговизны проводимых наблюдений. Авторы в [33÷34] рекомендуют на основании данных исследований устанавливать закон функции плотности распределения путём аппроксимации экспериментальных данных.

Широкое распространение получили экспериментально-теоретические методы исследования на долговечность [35]. Они имеют следующие недостатки: опытные детали выбираются из условия их значимости, таким образом, оценки надёжности, полученные в результате испытаний, получаются смещёнными; не учитываются свойства структуры ЭМС.

Известно, что методы исследований, проводимых с учётом физических свойств деталей узла, являются более точными по сравнению с вероятностно-статистическими методами. Методика, предложенная в [36], оценивает условия разрушения деталей под влиянием физических факторов, т.е. наработанного числа циклов изменения амплитуд напряжений.

Значительный вклад в развитие и совершенствование методов оценки влияния температурных факторов на надёжность изоляции электродвигателей был сделан Б.С. Сотсковым. Разработанная теория успешно была использована при расчётах деталей и узлов приборов автоматики и вычислительной техники.

Данные методы были успешно развиты в системах автоматического управления и регулирования электрооборудования тепловозов [37]. Была установлена корреляционная связь надёжности наименее надёжных элементов при номинальном режиме нагрузки. При этом элементы электрооборудования из-за различных конструктивных особенностей имеют дисперсию температуры, что отрицательно сказывается на точности результатов расчёта. В работе [38] были исследованы условия, когда ошибка в проектировании тепловозного генератора может привести к отказам обмотки генератора. В результате модернизации конструкции якоря генератора были улучшены теплотехнические характеристики и повышена его эксплуатационная надёжность.

В решении проблемы повышения коммутационной способности электрических машин большой вклад был сделан Э.К. Стрельбицким [39]. Он впервые использовал теорию многофакторного эксперимента для получения моделей коммутационной надёжности. Вместе с тем не учтены параметры температуры, которые могут оказывать существенное влияние на ресурс электрической машины.

В процессе эксплуатации на обмотки электрических машин воздействуют электродинамические и механические усилия, достигающие больших значений при пусках. Пусковые токи короткозамкнутых электродвигателей в $5\div 7$ раз превышают номинальные, в результате на обмотки действуют значительные электродинамические силы, значения которых пропорциональны квадрату токов. Пиковые броски тока в переходном процессе пуска приводят к значительным усилиям на проводники, расположенные в лобовых частях обмотки электродвигателя, и как следствие, к постепенному стиранию изоляции и к выходу двигателя из строя по причине межвиткового замыкания обмотки. Проблема защиты электрооборудования от ударных пусковых нагрузок решается использованием устройств плавного пуска (УПП) и преобразователей частоты (ПЧ) [40].

Авторами в [41, 42] было исследовано влияние пробивного напряжения на изоляцию обмоток электродвигателей. Разрушение изоляции происходит в условиях, когда напряжение, приложенное к виткам, достигает уровня, допустимого для данного класса изоляции. Было показано, что пробивное напряжение может быть ниже, если состояние изоляции не соответствует уровню, заданному техническими условиями.

В работе [43] уделено большое внимание оценке надёжности узлов трения приборов. Было показано, что состояние контактных поверхностей приборов оказывает существенное влияние на надёжность приборов. При этом не учитывается температура локальных контактных поверхностей. В [44] впервые было дано научное обоснование усталостным явлениям в деталях машин на основе теории вероятностей и математической статистики. Эти явления получили

аналитическое выражение вероятности разрушения детали. Также рекомендовано на стадии проектирования машин использовать данные статистической оценки различных конструкций деталей.

Исследования, изложенные в [45], показали, что на этапе проектирования необходимо использовать уравнение регрессии, устанавливающее связь целевой функции с входными факторами. Данные входных факторов формируются при помощи матрицы. В другом случае в [46, 47] для математического моделирования обмоток электродвигателей используются методы марковских процессов. Можно отметить сложность процедур моделирования, кроме того, не всегда возможно добиться необходимой точности.

Авторы [48, 49] сделали попытку получить модели надёжности изоляции электродвигателей на основе композиции функций плотности распределения нагрузки и прочности. Многочисленные исследования, изложенные в [50, 51], позволили получить аналитические зависимости, характеризующие влияние многочисленных факторов на скорость износа электрощёток. Даны рекомендации для подбора различных марок электрощёток при помощи точечных оценок. Закономерностям износа электрощёток посвящена работа [52]. Авторы впервые использовали трехпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко. Это распределение является универсальным. Вместе с этим, в отдельных случаях, когда функция плотности распределения имеет высокие значения вероятностей при больших величинах параметров износа, использовать его нельзя.

Распределение Вейбулла используется также в [53]. ВБР изоляционных материалов может быть с достаточной точностью аппроксимирована указанным распределением. В работах [54, 55] было исследовано разрушение изоляционных материалов на основе полимеров. Энергетический подход к процессу разрушения дал возможность получить модели разрушения изоляции. В работе [56] дано описание временной модели отказов изоляции, изготовленной из полимеров. Получены уравнения надёжности в зависимости от физических факторов. Недостатком является то, что в процессе эксплуатации изоляции бывает практически невозможно установить влияние физических факторов, что особенно

касается ЭМС. Распределение Вейбулла-Гнеденко, являющееся асимметричным, позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать такие распределения, как, например, нормальное и логарифмически нормальное.

На возможность применения распределения Вейбулла для описания характеристик отказов подшипников, щитов, изоляционных материалов, конструктивных блоков было указано в частности в [53]. Уравнение "кривой жизни" полимерной изоляции предложили А.А. Воробьев, С.Н. Журков [54, 55]. Они показали, что разрушение материала определяется величиной подведённой энергии и не зависит от её природы. Согласно флуктуационной теории получено уравнение разрушения материала в зависимости от времени релаксационной связи и энергии связи.

В развитие временной модели разрушения полимерной изоляции В.С. Дмитриевский [56] предлагает использовать уравнение надёжности электрической изоляции на основе флуктуационной теории разрушения и распределения локальных погрешностей поля в реальном диэлектрике. Уравнение надёжности связывает вероятность безотказной работы электрической изоляции с её размерами, степенью неоднородности поля, характеристиками электроизоляционного материала и действующими нагрузками.

Изложенная группа методов посвящена элементным методам исследования и оценки надёжности деталей и узлов ЭМС. Они имеют ряд положительных качеств – это простота процедур расчёта, возможность выделения отдельных элементов системы или групп, хорошая воспроизводимость характеристик надёжности. Вместе с тем имеются и недостатки: модели надёжности, полученные поэлементными методами для одних деталей, не могут быть использованы для других, невозможно установить корреляционную связь между ними. Это явилось важным аргументом того, что со временем эти методы применяться стали реже.

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

1.1 Структурные методы моделирования и расчёта надёжности

Структурный анализ используется для раскрытия внутренних связей элементов системы и исследуемого объекта в целом, установления закономерности этих связей и возможностей управления ими для достижения определенных целей. В данном случае объектом исследования является надёжность ЭМС, а целью – минимизация ремонтных затрат, а также других потерь, связанных с восстановлением работоспособности. Структура же надёжности машины должна быть представлена таким образом, чтобы с её помощью можно было бы определить вероятность реализации заданных минимальных ремонтных оперативных затрат в течение заданной наработки машины. Для управления показателями надёжности механической системы минимальные оперативные ремонтные затраты применяют по критерию её предельного состояния, а для управления показателями безотказности – по соответствующему критерию отказа. При структурном анализе применяются структурные схемы надёжности машин и их сборочных единиц [57].

Представляя структурную схему системы в виде графа, либо в какой-либо другой форме, ещё ничего нельзя сказать относительно качественных показателей самой системы, поэтому необходимо располагать методикой, позволяющей выделить и определить некоторые структурные параметры и дать им количественную оценку.

Анализ качества структурной схемы и её результаты еще не обеспечивают необходимой надёжности системы. Это могут быть только предпосылки, позволяющие впоследствии обеспечить надёжность. Задача анализа – выявить узкие места в схеме, обратить на них внимание разработчиков, выявить скрытые структурные пороки. В качестве параметров, определяющих качество структурной схемы при представлении ее графом, рекомендуются следующие: связность графа, ранг элемента, множество сочленений.

Важной задачей при проектировании системы является оптимальное распределение показателей надёжности между элементами системы. Вопрос о

том, как распределить общий показатель надёжности по элементам системы, остается открытым.

В отличие от аппаратурных методов становится возможным в полной мере учитывать в расчёте элементную базу системы. Кроме того, ограниченность информации о разрабатываемой системе не позволяет на начальном этапе проектирования получать точные конечные результаты надёжности её функционирования. Однако имеется возможность определить достоверные количественные характеристики показателей надёжности системы при различных вариантах ее построения. Этого удаётся достигнуть путём введения в общую методику оценки ожидаемой надёжности компонентов, которые совместно с оценочными и расчётными формулами позволяют выработать рекомендации по обеспечению надёжности, рациональному формированию её структуры и распределения показателей надёжности на элементы системы [58]. Избежать перехода к математической модели системы позволяет метод построения структуры системы с использованием функциональных характеристик элементов. Речь идёт о методе исследования, который сводится к имитированию случайных изменений состояния структуры исследуемых систем. При этом каждый элемент исследуемой системы заменяется соответствующим физическим аналогом, имитирующим изменение показателя эффективности системы при отказах и восстановленных элементах. Наиболее просто осуществить электрическое моделирование, при котором активные элементы системы заменяют источниками электрического напряжения [33].

В последнее время интенсивно стали разрабатываться методы, учитывающие структурные отношения между системой и её элементами, которые не являются случайными. Разработаны методы анализа сложных систем с монотонными структурами [47]. Они позволяют, используя лишь оценки средних значений наработки на отказ и факт монотонности функции интенсивности отказов, получить ряд простых и в то же время вполне конструктивных оценок различных показателей надёжности не только отдельно изнашивающихся элементов, но и систем, состоящих из таких элементов.

Выделены структурные схемы последствий отказов деталей и узлов, на основании которых можно оценить уровень повреждаемости системы.

Глубокий анализ структурных схем дан в обзорной работе авторов в [59, 60], где приводится классификация систем и методы их расчёта, которые могут быть выражены последовательными, параллельными и параллельно-последовательными схемами. Любая техническая система может быть смоделирована одним из этих вариантов. Это говорит о больших возможностях методов структурного моделирования.

1.2 Структурно-функциональные методы моделирования и расчёта надёжности

Вместе с тем, анализ исследуемых структурных схем показывает, что они строятся по логическому принципу работы системы или по направлению движения тока в цепях. В электрических и радиоэлектронных схемах они учитывают всю элементную базу, чем обеспечивается достоверность моделирования. Элементная же база ЭМС является функционально многоплановой, т.к. кроме электрических и магнитных цепей имеется конструкция системы, детали которой не входят в структурную схему двухполюсной системы и составляют значительную часть ЭМС. Для повышения адекватности формируемых структурных схем необходимо строить их на основе конструкции. Это позволит получить полиморфную структурную схему, наиболее точно отражающую свойства и особенности электрической машины [61].

В данной работе проведён анализ структурно-функциональной модели тягового электродвигателя постоянного тока, разработана общая схема классификации элементной базы машины по конструктивному признаку. Указанная классификация даёт возможность сделать более глубокий структурный анализ по сравнению с существующими методами и учесть все без исключения элементы системы. Для тягового электродвигателя получены узловые структуры, на основании которых становится возможным формирование уравнений вероятностей отказов деталей и узлов машины. Всё это даёт возможность

определить надёжность расчётным путем на этапе проектирования. При несоответствии параметров проектируемой машины данным технического задания на этапе проектирования устраняются ненадёжные элементы. Таким образом, исключается прохождение брака в эксплуатацию.

Впервые в качестве элементной базы были приняты следующие её составляющие: детали, соединения и допуски. На основании этого была проведена классификация элементной базы, где в качестве деталей представляются изоляционные материалы электрических цепей коллектора, якоря, статора, межполюсных соединений. Другая подгруппа деталей составляет конструктивные элементы этих же узлов. В качестве соединений предусматривается способ формирования узлов с натягом, зазором и простого контактного соединения. Третья группа состоит из паяных, сварных, клёпаных соединений. На основе такой элементной базы производится классификация, что даёт возможность сделать более глубокий структурный анализ по сравнению с существующими методами и учесть все без исключения элементы системы.

На основании проведённой классификации условно выделены узлы системы: щёткодержатель, коллектор, якорь, статор. Между этими узлами введены различные соединения. Полученные структурные схемы позволяют формировать вероятностные уравнения отказов деталей и узлов электрической машины постоянного тока для коллектора, щёткодержателя, якоря, статора. Для всех узлов получены обобщённые уравнения вероятностей отказов, которые дают возможность при наличии данных об отказе деталей и узлов машины расчётным путём определить вероятность безотказной работы электрической машины. При этом необходимо, чтобы поток отказов элементов системы удовлетворял условиям стационарности, ординарности и отсутствию последствия; при невыполнении одного из этих условий оценки $P(t)$ будут неадекватны.

Недостатком разработанной теории и методов исследования является отсутствие универсальности. Расчёты можно производить только для узкого класса машин, что ограничивает возможности разработанной теории и методов расчёта. Поэтому требуется провести новый анализ свойств элементной базы,

развивая указанные методы для расширенного круга электромеханических систем.

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 [62].

По данным исследований, приведенным в [57], можно установить следующее: важнейшими характеристиками являются ранг элемента и коэффициент влияния. Разработав методы построения структурных схем, автор ввёл такое важное понятие, как показатель качества структурной схемы, а также определение полноты связей в структурной схеме.

Структурная схема позволяет изучать объект исследования в наиболее общем и чистом виде. Это важное обстоятельство подталкивает к переносу методов структурного анализа и в теорию надёжности. К тому же, усложнение систем требует рассмотрения таких специфических вопросов, как вопрос о числе возможных транзитных путей между двумя элементами системы, о минимальном числе звеньев в этих путях, о связности сети и др.

Уделяя основное внимание выявлению взаимных связей между элементами системы и тем самым выдвигая на первое место структуру системы, а не состав её отдельных компонент, получаем возможность идентично исследовать различные по своей природе системы. Попытки получения обобщений такого рода привлекательны, а порой и необходимы. Они позволяют использовать достижения различных отраслей науки для решения широкого круга задач в теории надёжности.

1.3 Методы моделирования и расчёта надёжности, учитывающие влияние эксплуатационных факторов

Исследования, проведенные А.И. Галушко, И.С. Максимовой и др. [63], показали следующее, – из всего многообразия действующих на ресурс изоляции факторов во многих случаях доминирует температура и, как следствие, – её (изоляции) тепловое старение. Под нагревостойкостью понимается способность материала без существенного изменения характеристик выдерживать воздействие предельно допустимой для данного класса изоляции температуры в течение длительного периода времени, соответствующего сроку службы машины. Нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур.

Первые работы по определению срока службы изоляции можно в основном отнести к изоляции класса *A*. В результате исследований было сформулировано так называемое "правило восьми градусов", согласно которому превышение температуры $\Delta\theta$ на каждые восемь градусов сверх предельно-допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое. Аналитически это правило записывается в виде уравнения

$$\tau = T_0 e^{-0,0866\theta}, \quad (1.1)$$

где τ – срок службы изоляции при температуре θ , годы; θ – температура нагрева изоляции, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – условный срок службы изоляции при $\theta = 0$ ($T_0 = 6,225 \times 10^4$ лет при $\tau = 7$ лет и $\theta = 105$ $^{\circ}\text{C}$); e – основание натурального логарифма.

Чем выше класс изоляции, тем медленнее происходит её старение при определённой температуре, поэтому для изоляции класса *B* величина $\Delta\theta$ составляет 10 $^{\circ}\text{C}$, для изоляции класса *H* – около 12 $^{\circ}\text{C}$ [2, 62]. Однако данное уравнение получено эмпирическим путём и им следует пользоваться только при ориентировочных расчётах. Более строгий подход к физике процессов старения

изоляции заключается в применении к ним общих законов кинетики химических реакций.

Вант Гоффом и Аррениусом было получено уравнение, которое представляет постоянную скорость протекания реакции в изоляции как величину, определяющую относительное число эффективных столкновений частиц, завершающихся химическим взаимодействием:

$$k = Ae^{-E_a/RQ} \quad (1.2)$$

На практике для расчётов важно знать время τ , в течение которого изоляция достигает своего предельного состояния вследствие старения:

$$\ln \tau = E_a/RQ - G; \quad G = \ln A - \ln \ln (C_0/C), \quad (1.3)$$

где C_0 – начальная концентрация молекул; C – концентрация молекул в рассматриваемый момент; A – коэффициент; E_a – энергия активации, Дж/моль; $R = 8,317$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(град·моль); Q – абсолютная температура.

Если известен срок службы изоляции τ_1 при температуре θ_1 , то можно определить срок службы τ_2 при температуре θ_2 по уравнению

$$\tau_2 = \tau_1 \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right]. \quad (1.4)$$

Величины E_a , G и E/R для изоляции различных классов определены М.И. Мантровым экспериментально и приводятся в табличном виде в [64].

Анализ работы электрических машин показывает, что их режимы не постоянные. В силу воздействия различных факторов в эксплуатации неизбежно происходит изменение нагрузки на машину. Увеличение нагрузки вызывает превышение температуры обмоток относительно установленных уровней, что отрицательно сказывается на состоянии изоляции обмоток машины. В результате

происходит пробой изоляции и снижается наработка на отказ. Основным критерием работоспособности изоляции является пробивное напряжение $U_{пр}$. Различают три основных вида пробоя твёрдых однородных диэлектриков: тепловой, электрический и ионизационный.

Тепловой пробой диэлектрика происходит, когда нарушается стационарное тепловое состояние, – из-за изменения нагрузки. В этом случае нарушается стационарное тепловое состояние, когда тепловыделение превышает теплоотдачу, происходит недопустимо высокий разогрев диэлектрика и наступает тепловое разрушение материала. Указанные процессы имеют случайный характер во времени. Для определения природы влияния режимов нагрузок электрических машин необходимо определить вероятно-статистические параметры режимов нагружения электрических машин. Они позволят оценить режимы нагрузки ЭМС и прогнозировать надёжность изоляции и машины в целом.

Расчёт машин на надёжность занимает одно из центральных мест в теории и практике проектирования. Расчёты надёжности производят на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов. Многочисленные цели расчётов привели к большому их разнообразию. В.А. Острейковский [65] считает, что выбор метода расчёта надёжности системы зависит от ряда условий. Основными из них являются: этап разработки системы, характер отказов элементов в системе, способ соединения элементов в системе, вид закона распределения времени безотказной работы, режим работы элементов системы, восстанавливаемость объекта, способ анализа объекта, класс системы и др.

На этапе проектирования расчёт надёжности производится с целью прогнозирования ожидаемой надёжности проектируемого объекта. Такое прогнозирование необходимо для обоснования предполагаемого проекта объекта, а также для решения организационно-технических вопросов: выбора оптимального варианта структуры, способа резервирования, глубины и методов контроля, периодичности и объёма профилактики, количества запасных частей, обоснования требований к надёжности элементов системы. На этапе проектирования выполняются следующие расчёты надёжности: расчёт норм

надёжности элементов системы, ориентировочный расчёт надёжности деталей и узлов электродвигателя, окончательный расчёт (полный) надёжности системы.

В зависимости от способа анализа объекта разделяют два больших класса методов расчёта надёжности: структурные и функциональные. При расчёте структурной надёжности осуществляется определение значений показателей надёжности объекта, обусловленное надёжностью его элементов и разветвлённостью связей между элементами. Расчёт функциональной надёжности – это определение показателей надёжности выполнения объектом заданных функций. Поскольку такие показатели надёжности зависят от ряда действующих факторов, то, как правило, расчёт функциональной надёжности более сложен, чем структурной.

Таким образом, для последовательного соединения элементов системы, при котором отказ системы наступает в случае отказа любого из элементов, ВБР, $P(t)$ можно выразить через интенсивность отказов элементов [66]:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_1(t) dt} \times e^{-\int_0^t \lambda_2(t) dt} \times \dots \times e^{-\int_0^t \lambda_N(t) dt}, \quad (1.5)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i -го элемента системы, $i = 1, \dots, N$.

При простейшем потоке отказов надёжность будет равна

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i(t)} \quad (1.6)$$

Таким образом, для ориентировочного расчёта надёжности системы любой степени сложности достаточно знать состав элементов, их число и среднестатистическое значение интенсивности отказов элементов каждого типа. Состав элементов и их количество определяются на основании структурной схемы системы. Среднестатистические данные λ – характеристик получают по данным специальных испытаний на надёжность, либо на основании анализа процесса эксплуатации систем, подобных проектируемой.

Для учёта режимов работы элементов при расчёте надёжности используется понятие коэффициента нагрузки (K_n). Это отношение рабочего значения нагрузки к её номинальному значению. При $K_n = 1$ интенсивность отказов $\lambda = \lambda_0$. Функция $\lambda = \lambda(K_n)$ является монотонной возрастающей.

Для различных видов нагрузки при условии их независимости можно получить выражение для интенсивности отказов.

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \sum_{j=1}^S h_j K_{n_j} \right], \quad (1.7)$$

где S – число учитываемых видов нагрузки, h – поправочный коэффициент нагрузки.

При проектировании ЭМС могут отсутствовать данные об интенсивности отказов некоторых элементов. В этом случае может быть использован коэффициентный метод расчёта надёжности. Допущения, принципиальные при этом методе расчёта надёжности, следующие: поток отказов простейший, интенсивности отказов всех элементов системы изменяются в зависимости от условий эксплуатации.

Первое условие означает, что справедлив экспоненциальный закон надёжности, второе – что при различных условиях эксплуатации имеет место соотношение

$$K_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_0} = const, \quad (1.8)$$

где λ_0 – интенсивность отказов элемента системы, количественные характеристики надёжности которого достоверно известны, K_j – коэффициент надёжности j -го элемента.

Элемент, который имеет интенсивность отказов λ_0 , называется основным элементом расчёта надёжности системы. В качестве основных элементов расчёта надёжности систем используются такие элементы, как электродвигатели и др. Коэффициенты надёжности элементов приводятся в справочниках по надёжности.

Большое число объектов подвержено постепенному дестабилизирующему воздействию факторов внешней среды. К таким объектам относятся элементы и системы длительного использования. Для них характерными являются постепенные отказы. Поэтому в теории надёжности появились модели надёжности "параметр – поле допуска", связанные с определением характеристик надёжности объектов по изменению выходных параметров элементов и систем в процессе их эксплуатации. Это направление получило название "физика отказов".

Родоначальником такого подхода к определению характеристик надёжности был член-корреспондент АН СССР профессор МАИ Б.С. Сотсков [12]. Им впервые были разработаны аналитические соотношения и методика расчёта характеристик надёжности по постепенным отказам. Отличительной особенностью данного метода является отсутствие необходимости иметь значения исходных λ -характеристик элементов при расчёте надёжности систем. Это преимущество наиболее существенно для высоконадёжных объектов, получение интенсивностей отказов элементов которых во времени представляет большую сложность.

Кроме подхода к определению характеристик надёжности с точки зрения изучения случайного процесса изменения функциональных параметров объектов в направлении "физики отказов" большое развитие получили модели надёжности "нагрузка – несущая способность".

Работоспособность объекта при этом оценивается с позиции неперевышения несущей способности объекта действующими на него эксплуатационными нагрузками. Методология этого подхода имеет своим источником работы Н.С. Стрелецкого и Г. Майера, которые статистическими методами пытались обосновать значения коэффициента запаса прочности в теории прочности конструкций. В моделях "нагрузка – несущая способность" информация для оценки надёжности объекта содержится в значениях параметров нагрузки и несущей способности, а не в интенсивностях отказов входящих в систему элементов, т.е. соблюдается принцип "физического" исследования свойства надёжности объектов.

На основании проведённого обзора можно условно выделить три основных направления развития методов расчёта надёжности ЭМС на этапе проектирования. 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. Все методы могут быть использованы для решения различных задач, в каждом конкретном случае они могут быть выполнены с различными уровнями погрешности.

Наиболее перспективным направлением является третье направление, – оно учитывает как свойства структуры изоляции ВАЭ, так и физические факторы. Аналитический обзор показывает, что в этом случае модели, а также результаты расчётов надёжности могут быть наиболее адекватными по сравнению с существующими методами расчёта. Следовательно, на этапе проектирования электрической машины могут быть значительно снижены риски ошибок, что позволит уменьшить вероятность прохождения машин с дефектами проектирования в эксплуатацию. Это в дальнейшем позволит скорректировать параметры системы ППР и снизить эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание ВАЭ. В связи с этим можно считать необходимой задачей развитие этого направления, решение которой приводится в последующих разделах данной работы.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ЭМС С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ

2.1 Основные требования и принятые допущения к надёжности ВАЭ на этапе проектирования

2.1.1 Характеристика элементной базы паза статора ВАЭ

Существующие конструкции обмоток статора ВАЭ можно условно разделить на петлевые и волновые, а также на однослойные и двухслойные. По конструктивному исполнению секции катушек изготавливаются прямоугольного сечения (при $U > 3000 \text{ В}$, $P > 100 \text{ кВт}$). Площадь сечения секции катушек имеет $S < 20 \text{ мм}^2$. Катушки могут быть подразделёнными, либо цельными. Принимается, что сечение паза представляет собой прямоугольник, открытый с внешней стороны для установки пазового клина. Паз статора ВАЭ заполняется проводниками обмотки из прямоугольного провода с изоляцией. Конструкция паза состоит из проводников, прокладки на дне паза, корпусной изоляции, прокладки между слоями обмотки, обволакивающего покрытия для скрепления проводников, прокладки под клин и др.

Надёжность работы обмоток паза зависит от плотности укладки проводников в пазу, которая характеризуется технологическим коэффициентом заполнения паза [67]:

$$k_3 = d_{\text{э,из}}^2 n_{\text{э}} u_n / S_n' , \quad (2.1)$$

где $d_{\text{э,из}}$ – диаметр изоляционного элементарного проводника; $n_{\text{э}}$ – число элементарных проводников в пазу; u_n – число эффективных проводников в пазу; S_n' – площадь поперечного сечения паза, свободная от изоляции. В практике проектирования принимают $k_3 = 0,68 \div 0,75$.

Коэффициент заполнения паза k_z , учитывая плотность заполнения паза, не позволяет судить об эффективности использования всего объёма, более полную оценку даёт показатель, учитывающий коэффициент заполнения пазов медью

$$k_{z.m} = q_z n_z u_n / S_n, \quad (2.2)$$

где S_n – полная площадь поперечного сечения паза, q_z – площадь поперечного сечения элементарного проводника.

Использованием современных изоляционных материалов, марок обмоточных проводов и технологического оборудования можно достичь больших значений $k_{z.m}$. Это может оказывать существенное влияние на надёжность работы катушки в пазу.

Анализ элементной базы паза ВАЭ позволяет выделить следующие детали: секции катушек, витковую изоляцию, межвитковую изоляцию, изоляцию катушек, изоляцию корпусную, пазовый клин, прокладку под клин. Как ранее было сказано, на надёжность работы паза оказывает также влияние $k_{z.m}$. Известно, что при различных его значениях температурные режимы изоляции могут изменяться, что будет оказывать влияние на процесс старения изоляции. Надёжность различных участков изоляции вдоль паза, а также в его сечении может различаться [68, 69].

Учитывая это важное обстоятельство, дополнительно введём параметр, характеризующий установочные размеры секций катушек в пазу статора ВАЭ, добавим к ранее перечисленным элементам еще один – установочный параметр, который связан с $k_{z.m}$. Данный параметр является важной характеристикой надёжности работы катушек обмотки статора ВАЭ. В связи с этим остановимся более подробно на его свойствах. Зазор между секциями катушек, заполненный изоляционными материалами, имеет различные физико-механические свойства, что влияет и на плотность укладки катушек в пазе сердечника статора. При этом плотность не одинакова по длине паза, а также по координатам сечения паза. Причинами этого явления могут быть:

- на стадии проектирования $k_{з.м.}$ может быть занижен из-за низких физико-механических характеристик изоляционных материалов;
- при изготовлении могут иметь место технологические отклонения, что приводит на стадии производства к занижению $k_{з.м.}$;
- в процессе эксплуатации, как правило, происходит усадка изоляции, что приводит к увеличению зазоров между элементами паза.

Анализ показывает, что могут иметь место и другие факторы, влияющие на снижение уровней установочных геометрических размеров, которые могут влиять на надёжность изоляции.

На рисунке 2.1 приведена структурная схема элементной базы паза статора. Она состоит из следующих деталей, – это секции обмотки, пазовые клинья, изоляция витковая, катушек, корпуса паза. Введены новые параметры в виде геометрических установочных размеров – различные виды соединений с натягом и зазором, которые характеризуют коэффициент заполнения паза. Все элементы системы связаны между собой физическими характеристиками: тепловыми, электрическими, механическими. Это позволяет учитывать их влияние на надёжность работы элементов и системы в целом [61].

Изоляционные материалы подвержены воздействию тепловых факторов, под действием которых происходит их износ. В эксплуатации ВАЭ геометрические размеры изоляции уменьшаются, в результате плотность заполнения паза снижается. Медные секции (стержни) катушек в режимах работы и останова за счёт изменения температуры могут также деформироваться. Таким образом, происходит изменение заполнения паза, как в поперечном сечении, так и по его длине. Это приводит к механическим напряжениям в элементах его конструкции.

Все это отрицательно сказывается на работе изоляции, вызывает её ускоренное старение и, как следствие, снижает надёжность ВАЭ в эксплуатации. Геометрические параметры характеризуют размеры всех элементов с учётом допусков на их изготовление, отклонение которых от установленных пределов снижает надёжность узла.

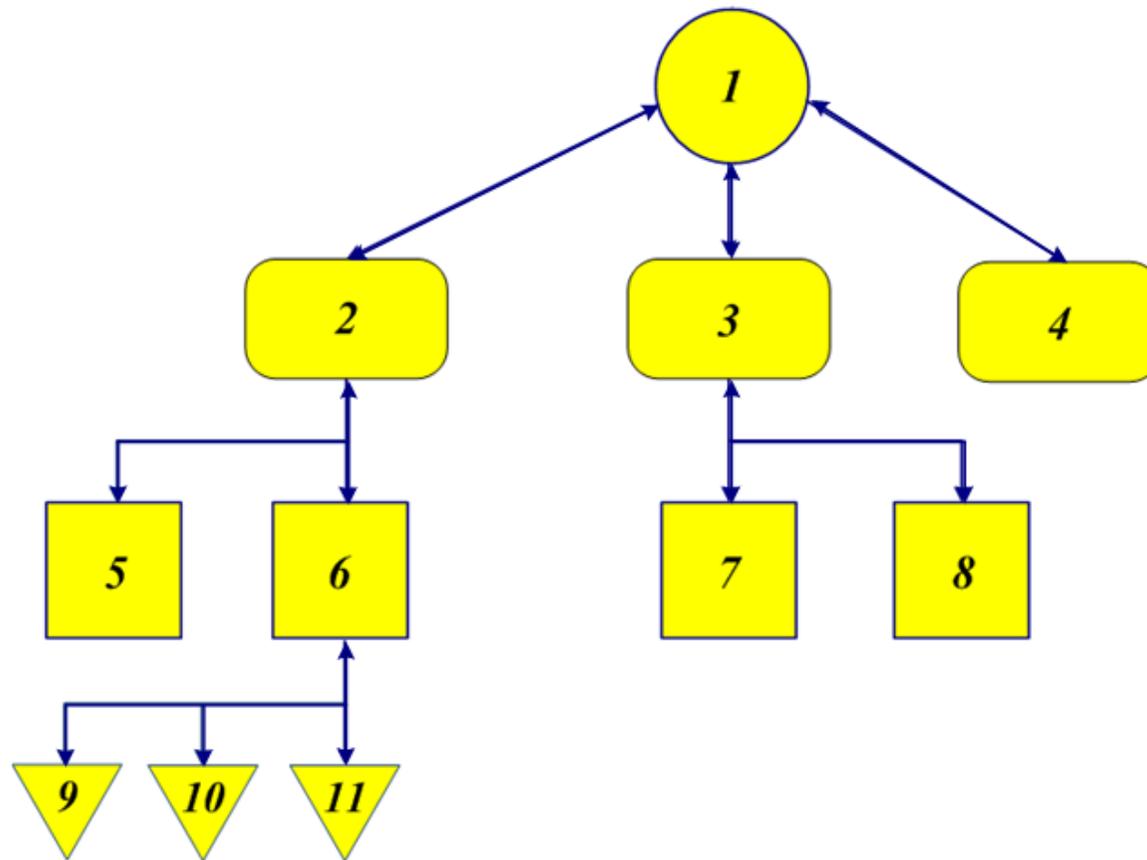


Рисунок 2.1 – Структурная схема элементной базы паза ВАЭ:

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.

На этапе проектирования машины, с учётом установленной надёжности, характеристики паза конструктивно и функционально формируются таким образом, чтобы надёжность витковой и корпусной изоляции соответствовала уровням, установленным расчётным путём согласно требованиям технического задания (ТЗ).

2.1.2 Обеспечение заданной надёжности электродвигателей при проектировании

На первоначальном этапе конструирования в ТЗ закладывается уровень надёжности узлов, деталей ВАЭ, где предполагаются следующие этапы работ:

- расчёт деталей и узлов машины (с учётом режимов работы);
- обоснование и выбор материалов деталей и узлов машины;
- оптимизация конструкции с учётом параметров проектирования, изготовления и эксплуатации.

На всех этапах разработки выбирают материалы, геометрические параметры, схемы в соответствии с заданным ресурсом и основными показателями надёжности, определёнными техническим заданием. На этапе проектирования закладывается надёжность элементной базы узла путём использования методов расчёта надёжности. Ошибки, допущенные при проектировании, не могут быть устранены в отдельных случаях на этапах изготовления и эксплуатации. Из сказанного следует, что прохождение в эксплуатацию скрытых дефектов («брака проектирования») приводит к тяжёлым видам отказов. Такие отказы, как пробой изоляции между витками катушек или на корпус (сердечник статора) приводят к значительным материальным затратам на ремонт электродвигателя, а также к вынужденному простоем технологического оборудования (процесса) предприятия.

Будем считать отказ по причине несовершенства используемых методов конструирования и адекватной оценки надёжности деталей и узлов ВАЭ конструктивным отказом. Важным этапом эскизного проектирования является

формирование структуры ТЗ и расчёт его параметров. Как правило, для этого используются методы, разработанные специалистами ведущих НИИ.

Для обоснования параметров надёжности необходимо выполнить следующие требования:

- изучение соответствия исходных данных ТЗ условиям эксплуатации (ТУ), отражающим специфику работы деталей, узлов ВАЭ;
- повышение адекватности действующих эксплуатационных нагрузок расчётным.

Для выполнения указанных выше требований необходимы:

- использование метода определения эквивалентных нагрузок, что особенно важно для переменных нагрузок;
- исследование вероятностно-статистических характеристик параметров нагрузок и прочностных характеристик материалов ВАЭ;
- оценка параметров надёжности машин с применением методов подобия и моделирования элементов машины;
- анализ надёжности предшествующей конструкции ВАЭ, его деталей и узлов;
- ускорение исследования серийных и опытных образцов деталей и узлов машины на надёжность.

Основные принципы формирования надёжности на этапе проектирования заложены в ГОСТ Р 51901-6-2005 (МЭК 61014:2003) [90], где на стадии проектирования продукции предусматривается необходимость проведения анализа компонентов, их взаимодействия, слабые места при работе в ожидаемых эксплуатационных режимах и условиях окружающей среды с их возможными предельными значениями. Результаты анализа проекта должны сравниваться с целями и требованиями к надёжности продукции, на основе которых разрабатываются рекомендации, необходимые для улучшения системы. Для определения потенциальных отказов, улучшения и повышения надёжности проводится инструментальный анализ расчётных напряжений и слабых мест компонентов с соответствующими режимами параметров при отказах.

Все аналитические методы применимы при расчёте надёжности на стадии проектирования машины, включая испытания, специально предназначенные для обнаружения потенциальных режимов и отказов, особенно в тех случаях, когда анализ является слишком сложным или может дать сомнительные результаты, – тогда путём повторного оценивания параметров нагрузки и вероятности отказов ЭМС путём улучшения проекта устраняются ошибки проектирования, после чего повторно оценивается надёжность проектируемого ВАЭ.

Из изложенного видно, что в данных условиях особые требования предъявляются к качеству расчётов параметров надёжности деталей и узлов ВАЭ. В противном случае, если будут иметь место методические ошибки при выполнении расчётов надёжности на этапе проектирования, количество двигателей со скрытыми дефектами, проникающих в эксплуатацию, будет возрастать пропорционально погрешности расчётов. Решению этой задачи посвящены последующие разделы работы.

2.2 Методика формирования структурных моделей узла паза статора ВАЭ

Паз машины имеет сложную конструкцию, каждая деталь которой выполняет функции проводника электричества и тепла, конструктивные или одновременно совмещённые функции. На основании принятой классификации его элементной базы выделим: секции катушек паза, изоляцию секций, изоляцию катушек обмотки, изоляцию корпусную, железо сердечника якоря, пазовый клин, геометрический параметр, который характеризуется коэффициентом заполнения паза.

В практических расчётах нагревание изоляции обмоток определяется средним значением её температуры вдоль катушки. Результаты анализа аэродинамических характеристик охлаждающего воздуха показывают, что они могут иметь различные значения температуры вдоль пути движения воздуха [70, 71]. Следовательно, температура обмоток в лобовых частях и в воздушном зазоре будет не одинакова.

В сечении паза сердечника статора ВАЭ также имеет место разброс температуры секций. Он обусловлен местоположением секций паза. Температура секции, расположенной в центре паза, будет отличаться от температуры секции, расположенной у стенки паза, – это связано с условиями теплоотдачи и вентиляции катушек.

Будем считать, что структурная модель узла может быть представлена в виде структурной схемы. Структурная схема – условное графическое изображение деталей конструкции узла, при этом предполагается функциональная связь между деталями в отличие от методов, существующих в теории автоматического регулирования, теории связи и в других отраслях, связанных со структурными исследованиями, где основным и общим является стремление очистить узел исследования от всего вторичного, рассмотреть лишь наиболее характерные его признаки – межэлементные связи, их число и конфигурацию [57].

Структурная схема позволяет изучать объект в наиболее обобщённом виде с учётом функциональных свойств элементов паза статора. Это является важным положительным свойством, которое способствует использованию теории структурного анализа и надёжности для оценки параметров элементов паза статора. Таким образом, уделяя внимание функциональным связям между деталями паза, выдвигая тем самым на первый план структуру системы, а не её количественный состав, получаем возможность единообразного исследования систем, различных по своей природе.

В.И. Нечипоренко в исследованиях надёжности радиоэлектронной аппаратуры использовал теорию графов, где элементы деталей узла представляются U и V множествами, в которых каждому из U соответствуют два элемента из V : элементы из U называются рёбрами графа, элементы из V – вершинами графа. Вершины, поставленные в соответствие ребру, называются концами ребра. Таким образом, элементы множества V изображаются точками на плоскости, а элементы из множества U – отрезками линий. При изображении на

чертеже граф представляет собой геометрическую фигуру, составленную из точек и соединяющих их отрезков.

Предложенный метод формирования структурной схемы привлекателен. Он позволяет выделить как важный фактор элементную базу системы и в таком виде легко адаптируется к существующим исследованиям в области теории надёжности. Этим самым открываются большие возможности в их использовании, как в теории, а так и в практических расчётах. Вместе с тем необходимо иметь в виду следующее. Электротехнические системы и конструкции электромеханических систем имеют большие различия, как в функциональном назначении, так и в конструктивных признаках. Следовательно, простая подмена свойств функциональных признаков элементов системы может внести систематические погрешности в модели, что может сказаться на оценках параметров надёжности системы. Таким образом, необходимо разработать такие методы расчёта надёжности паза статора ВАЭ, где бы учитывались свойства его конструкции и функциональные связи между его элементами. Выполнение этого требования позволит получить оценки параметров надёжности данного узла, имеющие более высокую точность по сравнению с существующими методами.

Построение структурно-функциональных моделей выполнено впервые и его обобщение является необходимым условием совершенствования методов теории надёжности. Это даёт возможность использовать в теории надёжности большие достижения различных отраслей науки: теории вероятностей, математической статистики, теории корреляции и регрессии и др. для успешного решения задач, возникающих в данной области.

Необходимо иметь в виду, что на ранней стадии проектирования конструкции машин необходимы такие методы оценки и расчёта надёжности, которые давали бы возможность получить высокую степень адекватности при минимуме исходных данных, т.е. были бы достоверными. Это даст возможность малыми затратами времени и средств исследовать необходимое число вариантов конструкции, тем самым ограничивая область последующих детальных исследований. Введением в элементную базу расчёта зависимости характеристик

надёжности от режимов нагрузки структурных параметров можно повысить адекватность результатов.

Кроме этого, есть важное различие между структурами электрических цепей и конструкцией узла. В первом случае структура формируется на функциональных особенностях элементов системы на основе логики электрических цепей и направления движения тока. Имеются в виду последовательные и параллельные структурные схемы, а также структуры, формируемые на основе теории графов. В случае электромеханических систем элементная база кроме электрических функциональных свойств имеет также и механические свойства, которые обеспечивают работоспособность и надёжность конструкции в эксплуатации. Количество элементов с такими свойствами может значительно превышать количество элементов с электрическими функциональными свойствами. В частности, элементная база паза статора ВАЭ является наглядным примером сказанному, где количество элементов с механическими функциональными свойствами значительно превышает количество элементов с электрическими свойствами. В данном случае межэлементные связи имеют механические свойства, а в случае, приведённом в [57], – электрические. Это имеет принципиальное значение, т. к. сами методики построения схемы, а также их структура будут различаться. Следовательно, потребуется исследование особенностей конструкции и свойств её элементов.

Построим структурную схему паза статора с проводниками обмотки ВАЭ из прямоугольного провода с изоляцией, состоящего из следующих деталей: проводников обмотки – c_i , обволакивающего покрытия (изоляции) секций – d_i , скрепляющей катушки изоляционной ленты – e_i , корпусной изоляции (пазовый короб), представляющей собой прокладку на дне паза – f_i , прокладки между слоями обмоток, прокладки под клин, пазового клина k [67].

На основе поэлементного анализа функциональных и конструктивных характеристик с использованием исследований, выполненных в работах [72÷74], была построена структурно-функциональная модель, приведенная на рисунке 2.2.

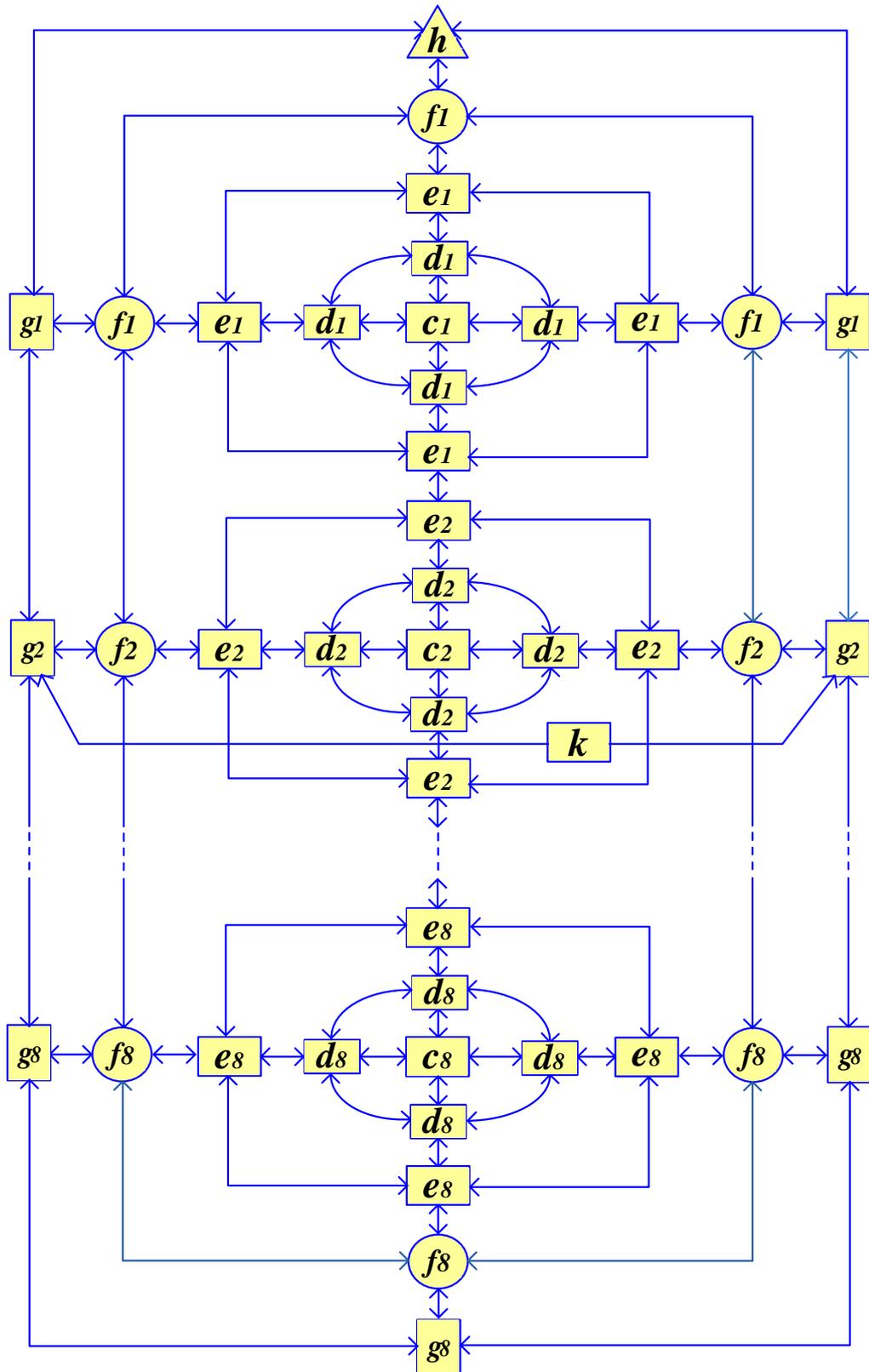


Рисунок 2.2 – Структурно-функциональная схема элементной базы паза статора ВАЭ. c_i – секция обмотки статора; d_i – изоляция секций катушек; e_i – изоляция катушек обмотки; f_i – изоляция корпусная; g_i – железо сердечника якоря; k_i – пазовый клин; h – геометрический параметр.

В данной структуре в результате проведённых исследований были выделены наиболее важные характерные признаки конструкции паза.

Модель даёт возможность исследовать объект в конкретном виде с учётом элементной базы и функциональных связей элементов, что является важным свойством методики, которая позволяет использовать структурный анализ в теории надёжности.

Необходимо отметить, что данная методика построения структурно-функциональных схем не ограничивается числом элементов и функциональных связей между ними. Точность оцениваемых параметров надёжности при этом не зависит от числа их функциональных характеристик. Это является важным условием получения адекватных оценок параметров надёжности.

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

Основными факторами, влияющими на надёжность катушек обмотки статора, являются тепловые и механические. Анализ данных эксплуатации показывает, что влияние вибрации на надёжность может быть ниже, чем влияние перегрева, если $k_{з.м.}$ будет находиться в пределах установленных значений.

Учитывая, что исследования надёжности проводятся для стационарных высоковольтных асинхронных электродвигателей нефтехимического производства, в производственных цехах с различными конструкциями гасителей вибрации, можно считать влияние механических факторов минимальным, т.е. не столь существенным. Это подтверждается данными эксплуатации ВАЭ на заводах ПАО «Нижнекамскнефтехим» и др.

Таким образом, в дальнейших исследованиях будем принимать условие, что старение изоляции катушек обмотки машины будет функционально зависеть от её нагрева. Тогда надёжность будет зависеть главным образом от скорости теплового старения изоляции.

Ранее было указано, что электромеханическая система, которой является ВАЭ, имеет детали и узлы, обладающие свойствами электрических проводников и являющиеся механическими конструкциями, которые могут совмещаться. Предложенная структурная модель учитывает в основе эти качества, т.е. она универсальна для любых технических систем. Разница будет лишь в том, в каких соотношениях они комплектуются в проектируемой системе. Межэлементные связи (физические) также адекватно могут отражаться в модели благодаря свойствам разработанной методики, предусматривающей влияние электрических, тепловых, механических факторов. В совокупности всё это позволяет формировать структурные модели, которые в теории надёжности могут быть весьма полезны с точки зрения их адекватности, упрощённости расчёта, получения точных оценок параметров надёжности системы, универсальности, использования компьютерной техники.

Разработанная методика формирования структурной схемы не даёт полной уверенности в её адекватности, если не будут учтены требования к её качеству. В построениях могут быть использованы элементы, функционально выполняющие роль проводников. В структуре могут быть использованы элементы, работающие в качестве конструктивных деталей. В третьем варианте возможно совмещение электрических и механических факторов. Поэтому при построении структурной модели необходимо иметь основное функциональное назначение деталей узла паза и характер их влияния на надёжность узла. Для этого на этапе формирования структуры должны быть правильно определены свойства элементной базы и их влияние на надёжность узла. С этой целью могут быть использованы априорные данные исследований отдельных деталей машин, тогда будет снижен уровень систематической погрешности. Чем выше уровень качества исследования элементной базы, тем ниже погрешность

рекомендуемой структурной модели. Это то, что касается общих требований к адекватности модели.

Как ранее отмечалось, необходимо иметь условия на этапе проектирования электродвигателя, позволяющие формировать оптимальные структурно-функциональные параметры паза статора. Сказанное является важным с точки зрения минимизации прохождения дефектов в производство и далее в эксплуатацию, где ошибки, допущенные на этапе проектирования, приводят к значительным затратам и длительным срокам на устранение этих дефектов. Поэтому условно можно считать: чем выше качество модели, – тем ниже уровень прохождения в эксплуатацию дефектов проектирования, и, следовательно, – выше надёжность конструкции узла.

Из сказанного следует – сам по себе анализ качества структурной модели и его результаты не могут быть достаточными условиями обеспечения надёжности системы, это лишь предварительные условия. Поэтому можно считать вторым этапом исследования определение «узких мест» в структуре, чтобы обратить внимание конструктора на выявление допущенных ошибок на ранней стадии эскизного проектирования и расчётов создаваемого электродвигателя. Этот вопрос является сложным, т. к. априорная информация, как правило, многообразна и порой противоречива. Если учесть, что на сегодняшний день такие методы отсутствуют, то в большинстве случаев расчёт может проводиться итерационным методом, – путём перебора вариантов элементов в конструкции и выбором наилучшего из них по критерию надёжности [73].

Рассмотрим элементы структуры c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , k . Из приведенной структурно-функциональной схемы (рисунок 2.2) 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 [74].

Таким образом, на этапе проектирования электромеханической системы в период разработки ТЗ, эскизного проекта, выполнения рабочих чертежей заданная надёжность узлов и деталей машины должна быть обеспечена путём использования в расчётах структурно-функциональных моделей. Количество отказов в эксплуатации может быть уменьшено, если использовать рекомендуемую методику расчёта, обеспечивающую необходимую адекватность. Вторая важная особенность методики заключается в том, что при получении расчётных оценочных параметров может иметь место следующее условие – отдельные элементы системы не обеспечивают необходимой надёжности, – в этом случае методом итерации производится замена этих элементов другими, обладающими более высокими качественными характеристиками, которые обеспечивают заданную надёжность и надёжность узла в целом. Предложенная методика позволяет выполнять такие корректируемые расчётные работы, причём делается это не в слепую, а направленно, что является важным преимуществом по сравнению с существующими методами (см. главу 1).

2.3 Моделирование ВБР элементной базы паза обмотки статора ВАЭ с использованием вероятностно-статистических методов

Важнейшей характеристикой надёжности 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.

Если отказ одного элемента паза вызывает отказ другого, – тогда это будет считаться последствием отказа. Будем считать, что в расчётах используется статистика об отказах элементов при условии отсутствия последствия, в этом случае полученные потоки отказов деталей паза будут адекватными. С точки зрения качества оцениваемых параметров надёжности необходимо ввести дополнительное условие для случая, когда его математическое ожидание совпадает со значением оцениваемого теоретического параметра $M(\lambda) = \Lambda$. В этом случае статистическая оценка λ может считаться несмещённой. В противном случае при несоблюдении этого условия оценка интенсивности отказов детали будет считаться смещённой, что противоречит требованиям качества моделирования.

Следующим важным требованием, предъявляемым к данной методике, является свойство эффективности. Эффективной оценкой интенсивности отказов называется несмещённая статистическая оценка λ , если среди всех подобных оценок той же характеристики она имеет наименьшую дисперсию

$$D(\lambda) = \inf D(\Lambda) \quad (2.3)$$

При обработке статистики об отказах электрических машин в силу различных причин могут быть допущены ошибки, которые формируются из систематических и случайных составляющих. Поэтому при оценке параметров необходимо, чтобы удовлетворялось требование состоятельности оценок λ . Состоятельной оценкой называется статистическая оценка, если

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\lambda - \Lambda| < \varepsilon) = 1, \quad (2.4)$$

где ε – наперёд заданное значение ошибки (погрешности), и имеет место сходимость по вероятности.

Все приведенные требования дают возможность оценить качество исходной статистической информации. Это является важным условием в дальнейшем анализе надёжности узла паза, которое с точки зрения сопоставимости статистических оценок элементов с учётом уровня их погрешности будет рассмотрено в конце данного параграфа.

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

$$\begin{aligned}
 &P_{1.1}(g_1) \cdot P_{1.2}(f_1) \cdot P_{1.3}(e_1) P_{1.4}(d_1) P_{1.5}(c_1) P_{1.6}(k) \leq P_1 \\
 &P_{2.1}(g_2) P_{2.2}(f_2) P_{2.3}(e_2) P_{2.4}(d_2) P_{2.5}(c_2) P_{2.6}(k) \leq P_2 \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &P_{8.1}(g_8) P_{8.2}(f_8) P_{8.3}(e_8) P_{8.4}(d_8) P_{8.5}(c_8) P_{8.6}(k) \leq P_8
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

При этом должно соблюдаться необходимое условие:

$$P_1 \cdot P_2 \dots \cdot P_8 \leq 1. \tag{2.6}$$

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.

Ранее было отмечено, что отказы деталей паза во времени представляют собой поток отказов. Это последовательность отказов, которые наступают в случайные моменты времени. По условиям исследования принимается простейший вид потока. Для этого он должен удовлетворять следующим свойствам: стационарности, отсутствия последствия и ординарности.

Свойство стационарности потока отказов деталей состоит в том, что вероятность появления m отказов за промежуток времени длительностью t

зависит только от числа отказов m и времени t и не зависит от начала отсчёта времени. Это означает, что вероятности появления m отказов деталей паза одинаковы на любом интервале времени одинаковой длительности. При этом интервалы берутся не пересекающиеся.

Важным свойством является также отсутствие последствия отказов деталей паза статора. Это значит, что вероятность появления m событий в любом промежутке времени не зависит от того, появились ли события в моменты времени, предшествующие началу рассматриваемого промежутка. Иными словами, отказ детали не должен быть следствием предыдущего отказа.

Таким образом, можно считать, что условная вероятность m отказов деталей на различных интервалах времени эксплуатации узла, определяемая в предположении о том, что было ранее по времени относительно рассматриваемого промежутка, равна безусловной вероятности появления m событий на этом интервале времени эксплуатации ВАЭ.

Необходимо также отметить требование к свойствам ординарности потока отказов деталей машин. Она заключается в следующем: вероятность появления двух и более отказов за бесконечно малый промежуток времени эксплуатации машины пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного события. Кроме того, поток отказов должен удовлетворять свойству суммы стационарных потоков: если некоторый поток является суммой большого числа независимых стационарных потоков и влияние каждого слагаемого на сумму мало, то суммарный ординарный поток отказов деталей паза близок к простейшему.

Под понятием большого числа независимых стационарных потоков понимаются понятия отказов деталей паза λ_i или ω_i , интегральные значения которых составляют Λ или Ω и удовлетворяют условиям простейшего потока, стационарности, отсутствия последствия, ординарности, свойствам суммы стационарных потоков. Для завершения требований принимаемых предпосылок необходимо принять еще одно важное допущение о функции плотности распределения.

Из априорных данных, проведённых исследований надёжности и отказов деталей и узлов ВАЭ будем считать, что простейшие потоки Λ и Ω имеют функции плотности распределения, подчиняющиеся закону Гаусса, характеристики которого имеют следующий вид:

математическое ожидание

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.7)$$

Дисперсия равна

$$D(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.8)$$

Принятые условия позволяют повысить качество математического моделирования надёжности элементов ВАЭ. В результате становится возможным снизить влияние систематической составляющей погрешности. Ранее было отмечено, что моделирование по конструктивному признаку учитывает функциональные межэлементные связи узла машины.

Построим уравнения вероятности отказов деталей паза по конструктивному признаку с учётом функциональных связей между элементами системы (рисунок 2.2).

Для первого звена паза выражение вероятности отказа будет иметь вид:

$$Q_1(t) = Q_{g1} + (1 - Q_{g1})Q_{f1} + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})Q_{e1} + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})Q_{d1} + \\ + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})Q_{c1} + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})Q_{k1} \quad (2.9)$$

Определим уравнения для второго звена паза:

$$Q_2(t) = Q_{g2} + (1 - Q_{g2}) \cdot Q_{f2} + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2}) \cdot Q_{e2} + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})Q_{d2} + \\ + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})Q_{c2} + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})(1 - Q_{c2})Q_{k2} \quad (2.10)$$

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

$$Q_8(t) = Q_{g8} + (1 - Q_{g8})Q_{f8} + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})Q_{e8} + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})(1 - Q_{e8})Q_{d8} + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})Q_{c8} + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})(1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})(1 - Q_{c8})Q_{k8} \quad (2.11)$$

Полученные уравнения описывают состояние вероятности отказа с учётом характеристик каждого из элементов системы. Важным положительным свойством методики является возможность расчёта надёжности элементов по различным координатам сечения паза.

Предложенная методика даёт возможность определить ВБР узлов паза статора, в необходимом случае – произвести корректировку их параметров, привести в соответствие с данными технического задания. Полученные данные могут являться основанием для подбора деталей узла в соответствии с параметрами ВБР элементов системы.

Можно выделять элементы в группы, которые имеют несколько функциональных связей и требуют повышенной надёжности, либо путём исследования различных комбинаций в структуре определять наиболее надёжные или наименее надёжные элементы и звенья системы.

Безусловно, на данном этапе разработка оптимального варианта определения надёжности узла является сложной задачей. Поэтому ограничимся тем, что дадим общую оценку надёжности элементов паза. Работа будет выполняться в направлении оценки и оптимизации параметров надёжности системы на основании полученных аналитических вероятностей отказов элементов системы. Для этого перейдём от звеньев к системе в целом. Примем ранее указанные допущения, используя теорему сложения вероятностей. Пусть по выборке объёма t найдена оценка θ_1 . При повторении опыта происходит извлечение другой выборки того же объекта из генеральной совокупности и получается другая оценка θ_2 неизвестного теоретического параметра θ . Повторяя опыт далее k раз, получаем k различных оценок. Поэтому оценку θ

можно рассматривать как случайную величину, которая может принимать значение $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$.

Это позволяет нам сформировать уравнение вероятности отказа паза статора. Тогда

$$\begin{aligned}
 Q_{\Sigma}(t) = & Q_1 + (1-Q_1)Q_2 + (1-Q_1)(1-Q_2)Q_3 + (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)Q_4 + \\
 & + (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)Q_5 + (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)Q_6 + \\
 & + (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)(1-Q_6)Q_7 + \\
 & + (1-Q_1)(1-Q_2)(1-Q_3)(1-Q_4)(1-Q_5)(1-Q_6)(1-Q_7)Q_8.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Полученное выражение характеризует отказ узлов звеньев системы. Оно является обобщёнными и включает в себя всю элементную базу системы.

Если при проектировании машин возникает необходимость анализа надёжности деталей паза для слоёв секций катушек паза, тогда, пользуясь предложенной методикой, можно получить уравнение отказа вертикальных звеньев. Они будут иметь следующий вид:

– для первого слоя укладки секции

$$\begin{aligned}
 Q_1(t) = & Q_{g1} + (1-Q_{g1}) \cdot Q_h + (1-Q_{g1})(1-Q_h) \cdot Q_{f1} + (1-Q_{g1})(1-Q_h)(1-Q_{f1})Q_{e1} + \\
 & + (1-Q_{g1})(1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1}) \cdot Q_{d1} + (1-Q_{g1})(1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})Q_{c1};
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

– для второго слоя укладки секций катушек статора ВАЭ

$$Q_2(t) = Q_{e2} + (1-Q_{e2})Q_{d2} + (1-Q_{e2})(1-Q_{d2})Q_{c2} + (1-Q_{e2})(1-Q_{d2})(1-Q_{c2})Q_{k2}. \tag{2.14}$$

По аналогии формируются уравнения вероятности отказа с 3-го по 7-й витки катушки паза. Для нижнего слоя секций будет иметь место выражение:

$$Q_8(t) = Q_{e8} + (1-Q_{e8})Q_{d8} + (1-Q_{e8})(1-Q_{d8})Q_{c8} + (1-Q_{e8})(1-Q_{d8})(1-Q_{c8})Q_{f8}. \tag{2.15}$$

Анализ надёжности элементной базы показывает, что условия, в которых работают детали паза обмотки, являются не одинаковыми по обеим координатам секции паза. Следовательно, их надёжность также будет

отличаться. Так, например, витки катушек расположенные в зоне клина k , и витки, находящиеся на дне паза, будут иметь различные значения температуры; в первом случае она будет ниже. Следовательно, изоляция, находящаяся на дне паза, будет иметь ресурс, меньший по сравнению с изоляцией секций, расположенных вблизи клина, где условия теплоотвода лучше за счёт воздуха, вентилируемого в воздушном зазоре машины.

Сказанное требует необходимости формирования вероятностной модели с целью оценки параметров надёжности по вертикали (см. рисунок 2.2).

Вероятность отказа элементов будет равна:

$$\begin{aligned}
 Q(t) = & 1 - (1-Q_h)Q_{f1} + (1-Q_h)(1-Q_{f1})Q_{e1} + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})Q_{d1} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})Q_{c1} + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})Q_{e1} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})(1-Q_{d1})(1-Q_{e1})Q_{e2} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})(1-Q_{d1}) \cdot (1-Q_{e1})(1-Q_{e2})Q_{d2} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})(1-Q_{d1})(1-Q_{e1})(1-Q_{e2})(1-Q_{d2})Q_{c2} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})(1-Q_{d1})(1-Q_{e1})(1-Q_{e2})(1-Q_{d2})(1-Q_{c2})Q_{d2} + \\
 & + (1-Q_h)(1-Q_{f1})(1-Q_{e1})(1-Q_{d1})(1-Q_{c1})(1-Q_{d1})(1-Q_{e1})(1-Q_{e2})(1-Q_{d2})(1-Q_{c2})(1-Q_{d2})Q_{e2} + \\
 & + \dots + (1-Q_{e8})(1-Q_{d8})(1-Q_{c8})(1-Q_{d8})(1-Q_{e8}) \cdot Q_{g8}.
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Полученное уравнение является аналитической зависимостью вероятности отказа деталей паза статора.

Построение и составление структурной схемы не являются конечной целью. Полученные результаты являются важными с точки зрения выделения элементной базы паза для дальнейших исследований и анализа надёжности узлов и деталей машины. Широко используемые групповые методы оценки надёжности параметров надёжности машин, как это было сказано ранее, являются не адекватными и не дают возможности исследовать межэлементные связи узла конструкции. В этом смысле полученные математические уравнения позволяют выявить наименее надёжные элементы, определить уровень

необходимой (требуемой) надёжности узла для выполнения заданных величин технического задания.

Таким образом, полученные уравнения позволяют решить две важные задачи:

– исследовать надёжность элементной базы машины на этапе проектирования с целью выявления слабых звеньев, используя априорные данные о надёжности секций катушек, витковой, корпусной изоляции и др.;

– определить рациональные уровни вероятности безотказной работы и наработки на отказ, 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.

Полученные уравнения дают возможность итерационным методом исследовать элементную структуру паза и определить уровень рациональной надёжности, которая может иметь при этом однородные и неоднородные элементы. Последние могут иметь различные соотношения в зависимости от конструкции узла. Для оценки надёжности паза с четырьмя группами элементов вероятность отказа Q_c будет иметь вид:

$$Q_c = Q_1 + (1 - Q_1)Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)Q_3 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)Q_4. \quad (2.17)$$

Структурный анализ деталей паза показывает, что в нём имеют место как однородные детали, так и не однородные. Преобразуем исходное уравнение для однородных деталей. Тогда будет иметь место выражение

$$Q_c = 4Q - 6Q^2 + 4Q^3 - Q^4. \quad (2.18)$$

Примем, что $Q = 0,1$, тогда $Q_c = 0,3439$. При этом надёжность системы $P_c = 0,6561$.

В практических расчётах могут иметь место два варианта. Первый – когда все элементы системы не однородные. Во втором случае имеют место группы как однородных элементов, так и не однородных. Как было показано ранее, в первом случае определение параметров надёжности значительно облегчается путём простых преобразований расчётных формул.

В общем случае необходимо использовать в расчёте надёжности на этапе проектирования обобщённые уравнения вероятностей отказа. Хотя это не исключает использования на этапе проектирования отдельных фрагментов (групп) элементов паза машины, что часто бывает необходимым на этапах согласования характеристик надёжности и проектирования при заданных параметрах ТЗ.

Вероятность отказа любого элемента паза будет иметь выражение

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{dP}{dt} \quad (2.19)$$

Интенсивность отказов в системе определяется зависимостью:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} \quad (2.20)$$

Производя последовательно подстановку уравнений вероятности отказов для различных звеньев паза, получим зависимости интенсивности отказов, на основании которых можно определить рациональные уровни надёжности паза статора в соответствии с ТЗ.

В пазу каждый из элементов имеет определенный уровень интенсивности отказов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$. В принятой постановке решения задачи примем дополнительное условие, что интенсивность отказов любого элемента обладает определенной дисперсией, изменение которой во времени представляет собой случайный процесс. Ранее было принято условие, что он подчиняется закону Гаусса. Тогда должно выполняться следующее условие: отношение

математического ожидания к среднеквадратическому отклонению должно быть больше или равным двум.

Полученные аналитические результаты дают возможность оценить надёжность паза статора машины на этапе проектирования. Для этого необходимо иметь данные об интенсивности потока отказов элементов.

В том случае, если надёжность узла на этапе проектирования не соответствует установленной норме технического задания на проектирование данного узла из-за низкой надёжности отдельных деталей, тогда характеристика λ_i занижается и расчёт надёжности узла производится заново. Процедура повторяется до тех пор, пока уровень надёжности не достигнет установленного значения, после этого корректируются конструктивные, физические, нагрузочные и другие параметры элементов системы или они замещаются более надёжными. И делается это до тех пор, пока не будут получены установленные уровни надёжности и интенсивности отказов элементов системы. Кроме того, необходимо иметь в виду следующее, – при наличии дисперсии в расчётах принимается условие $\lambda_i = \text{const}$. Это допущение позволяет значительно упростить методы расчёта.

Существует множество методов расчёта надёжности. Большое распространение получили так называемые групповые или элементные методы расчёта надёжности. В нашем случае в методике учитываются конструктивные свойства узла, фиксированное положение элементов и межэлементные связи, что позволяет дополнительно исследовать звенья системы, т.е. оценить параметры системы при различных конструктивных вариантах. В результате становится возможным выявлять наименее надёжные звенья, выравнивать надёжность элементов системы. Данная методика является очень полезной на ранней стадии проектирования электромеханических систем, когда необходимо установленную в ТЗ надёжность распределить по элементам машины, определить их рациональную надёжность в пазовом узле машины, изменять число однородных элементов системы. Результаты аналитических исследований данной главы будут расширены в последующих разделах.

Для дальнейшего анализа элементов структуры паза уточним понятие свойств группы элементов. Однородная группа элементов – когда в неё входят детали с одинаковыми свойствами и $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$, неоднородная группа – когда в неё входят элементы с различными свойствами, т.е. $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$. Смешанная группа – когда в неё входят элементы первого и второго вариантов.

Паз статора ВАЭ можно отнести к последнему варианту. Необходимо отметить, что в отдельных случаях это требует уточнения. При анализе надёжности необходимо группировать элементы по указанному критерию, составить группы элементов, имеющие общие характеристики. На основании принятой классификации можно выделить следующие группы. Первая – секции катушек обмоток паза, вторая – витковая изоляция, третья – изоляция катушек, четвёртая – корпусная изоляция.

Анализ различных вариантов конструкций показывает, что они могут различаться различным исполнением. Это может быть вызвано мощностью машины, с увеличением которой возникают ограничения по величине плотности тока в секции, и условиями вентиляции. В каждом конкретном случае изменяется конструкция узла.

При изменении типа обмотки также требуется конструктивное решение, позволяющее повысить эффективность охлаждения данного узла. В отдельных случаях к изменениям конструкции могут приводить условия, в которых работает ВАЭ. В этом случае путём рационального подбора числа секций в пазе и плотности тока в них необходимо сохранить тепловой баланс, при этом соблюдая нагрузки с учётом требования рабочих режимов.

Исследуем случай, который может иметь место в практике проектирования. Это – когда детали паза не однородные, т.е. $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$, имеют различные конструктивные функциональные свойства.

Уравнение вероятности отказа паза статора имеет 4 группы, каждая из которых может быть однородной, т.е. имеем смешанный случай. Внутри группы имеются однородные элементы, между группами – не однородные.

Тогда уравнение вероятности отказа на основании ранее принятой классификации будет иметь вид

$$Q_n = Q_1 + (1 - Q_1) \cdot Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2) \cdot Q_3 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3) \cdot Q_4, \quad (2.21)$$

где Q_1 – элементы секции катушек паза; Q_2 – элементы витковой изоляции; Q_3 – элементы изоляции катушки; Q_4 – элементы изоляции (корпусной) паза.

Проведём необходимые преобразования, тогда

$$Q_n = Q_1 + Q_2 - Q_1 Q_2 + Q_3 - Q_2 Q_3 - Q_1 Q_3 - Q_1 Q_2 Q_3 + Q_3 Q_4 - Q_2 Q_3 Q_4 - Q_1 Q_3 Q_4 + \\ + Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 - Q_3^2 Q_4 + Q_2 Q_3^2 Q_4 + Q_1 Q_3^2 Q_4 - Q_1 Q_2 Q_3^2 Q_4. \quad (2.22)$$

Полученное уравнение вероятности отказа позволяет производить расчёт вероятности отказа паза на раннем этапе проектирования. Если будет задана в соответствии с параметрами ТЗ характеристика надёжности, то становится возможным оценить ее с учётом характеристик надёжности элементов системы. При этом рассматривается более общий случай, когда детали паза являются не однородными. Данная методика имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими, т.к. она позволяет производить расчёт надёжности конструкции машин с большей глубиной анализа надёжности узлов и деталей, что даёт возможность, используя различные конструктивные варианты, решения, добиваться высокого качества и точности оценок её параметров.

В процессе работы ВАЭ обрыв одной из секций или разрушение пайки (контакта) приводит к перегрузке других. Это нарушает нормальную работу всей обмотки машины со всеми вытекающими из этого последствиями. Если из-за теплового пробоя изоляции (витковой, катушки) произойдёт замыкание токоведущих проводников обмотки статора, это приведёт к отказу системы. Полученные аналитические зависимости, оценивающие качество структурной схемы, позволяют в логической последовательности, перебирая варианты элементов и их параметры, идя от простого к сложному, выйти на

оптимальную структуру, которая будет обеспечивать установленную в ТЗ эксплуатационную надёжность.

Из изложенного можно сделать важный вывод, что структурный анализ системы является необходимым и важным этапом общего исследования надёжности ВАЭ. На начальном этапе проектирования машины он позволяет выявить конструктивные пороки системы, выделить наиболее значимые элементы. Это позволит предложить рекомендации, направленные на совершенствование конструкции узла и повышение его ВБР.

Изложенные методы можно расширить, если в алгоритм расчёта в качестве коэффициентов ввести интенсивности отказов элементов.

В настоящее время, как было сказано в предыдущей главе, они учитываются путём введения корректирующих коэффициентов к оценкам λ -характеристик. Данные исследования проведены с учётом важного обстоятельства, когда λ_i для каждого элемента паза имеет постоянное значение, т.е. эксплуатационная нагрузка постоянная, равна номинальному уровню, и влияние внешних факторов также постоянно. Ниже будут исследованы более сложные случаи, когда нагрузка представляет собой нестационарный процесс.

2.4 Моделирование режимов нагрузки ВАЭ методами теории вероятностей и математической статистики

Существующие методы расчёта надёжности на стадии проектирования имеют общую тенденцию, которая заключается в следующем. Стремление упростить методику расчёта узла или детали машины заставляет проектировщика использовать элементные методы расчёта. Они сокращают затраты времени на расчёт и позволяют итерационным методом выбирать наиболее рациональные конструкции с точки зрения надёжности. Однако наличие в системе функциональных связей может в отдельных случаях привести к ошибкам в расчётах.

Поэтому, чтобы иметь более качественные оценки параметров надёжности, необходимо в расчётные модели ввести поправки, корректирующие влияние режимов нагрузки на характеристики надёжности элементов машины. Для ВАЭ нефтехимического производства это могут быть температура, влажность изоляции обмоток статора и др. Безусловно, в необходимых случаях они учитываются в виде поправочных коэффициентов к величине интенсивности отказов узла. Как правило, их получают путём проведения экспериментальных исследований и они приводятся в справочных пособиях по надёжности.

Для определения режимов нагрузки проведены экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации ВАЭ на ПАО "Нижекамскнефтехим". Методика, организация и программа исследований приведены ниже. Исследования проводились в течение года. Данные о нагрузке по дням были обработаны вероятностно-статистическими методами.

Анализ статистической информации показывает, что нагрузка электродвигателя представляет собой случайный процесс, подчиняющийся закону Гаусса с математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ , т.е. $f(x) = \exp\{m; \sigma\}$. Исследуем случайную функцию на соответствие принятой гипотезе.

Определяем случайную выборку из генеральной совокупности, множества $x \in R$, где дискретное значение нагрузки как случайная величина X принимает конечное или счётное множество значений $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$, и относится к дискретному типу. При этом $\sum P(X \leq x_i) = 1$. Будем считать, что случайная величина имеет вид непрерывной функции, если ей соответствует неотрицательная функция $f(x)$ в области $x \in R$. Тогда функция плотности распределения нагрузки будет иметь выражение:

$$P(\alpha \leq x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx, \quad (2.23)$$

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

При этом для случайной величины x в интервалах от α до β интеграл будет равен 1. Исходя из принятых условий, построим вариационный ряд случайной величины.

Для принятой гипотезы будем считать, что $F(x) = P\{X \leq x\}$. При этом плотность вероятности равна

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (2.24)$$

Таким образом, интегральные и дифференциальные функции нагрузки должны обладать следующими основными свойствами: $F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$; $F(x_1) \geq F(x_2)$, если $x_1 > x_2$; функция распределения непрерывна слева, т.е.

$$F(x) = F(x-0); \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1; f(x) \geq 0. \quad (2.25)$$

Как уже ранее было сказано, оценивается выборка из генеральной совокупности. Зависимость приведена в виде гистограммы на рисунке 2.3. Также будем считать, что оцениваемые параметры должны быть состоятельными. Поэтому объём экспериментальных данных и выборки должны соответствовать необходимым требованиям. Полученные оценки должны быть несмещёнными.

Выборку X преобразуем в вариационный статистический ряд, где количество интервалов определим из зависимости $k = 1 + 3,2 \lg n$. Длина интервала будет равна

$$\Delta_m = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}, \quad (2.26)$$

где k – количество интервалов.

Определяем их вероятность (x_i) в каждом интервале

$$P_m = \frac{n_m}{n}, \quad (2.27)$$

где n – интервальные значения выборки.

Установим среднеинтервальное значение. Полученные результаты дают возможность расчётным путём, по ранее приведённой 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. Результаты сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – 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 |

В результате произведённых расчётов на основании данных таблицы видно, что полученные характеристики математического ожидания и среднеквадратического отклонения нагрузки соответственно равны 55 и 45 в относительных единицах.

Для дальнейшего использования полученных результатов исследования необходимо произвести проверку гипотезы о подчинении нормальному закону

распределения. Статистические функции распределения случайных величин, которые представляют собой законы распределения, по своей природе могут отличаться друг от друга, если факторное пространство, воздействующее на детали и узлы машины, будет также различным. Или если будет изменяться элементная база машины при проектировании. В этом случае функция плотности распределения и её характеристики будут отличаться друг от друга.

Ранее было принято важное допущение о том, что нагрузка ВАЭ, представляющая собой случайную функцию, имеет функцию плотности распределения, соответствующую закону Гаусса с параметрами m и σ , т.е. $P(I) = \{m, \sigma\}$. Для проверки принятой гипотезы χ^2 проведем расчёт n_r, t_{r-1}, t_r . После определения границ интервала в выборке расчётным путём определяем гипотетическую вероятность P_r попадания случайной величины в r -ый интервал, при этом используя нормированные функции Лапласа. Для оценки сходимости функции плотности распределения с гипотетической используем критерий Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{r=1}^{k_r} \frac{(n_r - n \cdot p_r)^2}{n \cdot \tilde{p}_r}. \quad (2.28)$$

Проведя расчёт по r интервалам, сложим их результаты, используя таблицы q – процентных пределов для величины χ^2 в зависимости от ν степеней свободы и от вероятности $\frac{q}{100}$ для распределения Пирсона. Предварительно необходимо определить число степеней свободы, – оно будет равно $\nu = k_r - r - 1$, где число разрядов k_r для наших данных равно 5. Число наложенных связей $r = 2$. Это m_r и σ_r . Сравнительный анализ критерия $\chi^2 = 11$ и границы критической области говорят о том, что $\chi^2 > \chi^2_{кр}$, т.е. статистический $M_{кр}^2 = 11,07$ ряд не противоречит гипотезе о распределении Гаусса вероятностей генеральной совокупности. Все рассчитанные характеристики сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – 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 |

Если статистическая выборка не противоречит гипотезе о нормальном законе распределения, то желательно выровнять полученную гистограмму (таблица 2.1) с помощью функции плотности вероятности нормального закона

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{S} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \right]. \quad (2.29)$$

Величина, заключенная в квадратные скобки, табулирована [7]. Проведённые расчёты сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Выравнивание распределения с помощью нормального закона

| x_m^* | t_m^* | $P(x_m^*)$ | $\frac{P_m}{\Delta_m}$ |
|---------|---------|------------|------------------------|
| 20 | -2,33 | 1,84 | 1,1 |
| 30 | -1,66 | 6,9 | 3,9 |
| 40 | -1,00 | 16,1 | 9,7 |
| 50 | -0,33 | 24,3 | 23,6 |
| 60 | -0,33 | 24,3 | 19,7 |
| 70 | 1,00 | 16,1 | 25,1 |
| 80 | 1,66 | 6,9 | 12,7 |
| 90 | 2,33 | 2,84 | 4,2 |

Приведенные результаты дают важное подтверждение ранее принятой гипотезе – режим нагрузки ВАЭ характеризуется Пуассоновским потоком и подчиняется закону Гаусса. На рисунке 2.3 приведена графическая зависимость функции плотности распределения нагрузки ВАЭ, построенная по данным исследований режимов работы в производственных условиях.

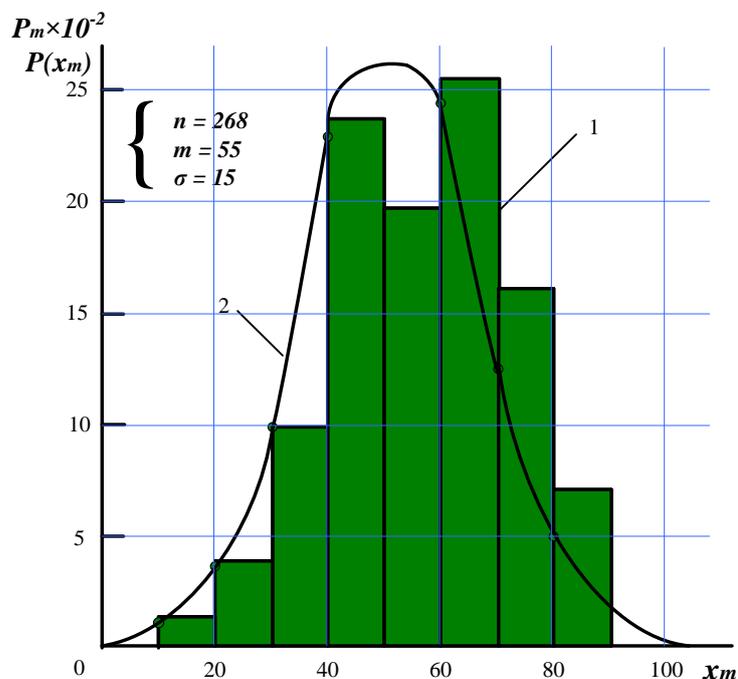


Рисунок 2.3 – Статистические характеристики эксплуатационных режимов нагрузки ВАЭ. 1– гистограмма, 2 – кривая плотности распределения вероятности.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ВАЭ

3.1 Моделирование влияния перегрева изоляции паза статора на её ВБР

Особенностью конструкции ВАЭ является непосредственное конструктивное соединение железа сердечника статора с изоляционными материалами его обмоток. Эти детали имеют различные тепловые характеристики, коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и др. Если электротехническая сталь сохраняет механические характеристики до температуры 550 °С и выше, то изоляционные материалы могут обеспечивать нормальную работу в зависимости от класса изоляции при температуре до 180 °С. В соответствии с ГОСТ 8865-93 [91] в электромашиностроении применяется изоляция классов *Y, A, E, B, F, H, 200, 220* и *250*.

Известно, что диэлектрические свойства изоляции в процессе эксплуатации могут ухудшаться. Происходит её усадка в результате усыхания, снижается механическая прочность, уменьшается пробивное напряжение. Данный процесс называется старением. В изоляции происходят химические процессы, которые во многом зависят от температуры её нагревания. Чем выше температура обмоток ВАЭ, тем выше скорость старения изоляции, – тем ниже срок службы машины. Основными причинами повышения температуры могут быть увеличение нагрузки и снижение расхода воздуха в системе охлаждения.

На этапе проектирования расчётно-экспериментальным путём нормируется допустимая величина нагрева частей электрической машины. При этом допустимый нагрев частей машины устанавливается таким образом, чтобы соприкасающаяся с ними или расположенная в непосредственной близости от них изоляция могла выполнять свои функции в течение расчётного срока эксплуатации ВАЭ. С учётом этого предельный уровень нагрева частей ВАЭ зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Для учёта влияния эксплуатационных факторов на нагрев изоляции стандарты на электротехнические изделия нормируют не фактическую температуру, а величину превышения температуры над температурой охлаждающего воздуха, она принимается равной 40°C . Это условие является обязательным для машин общего назначения. На основании сказанного можно считать, что для изоляционного материала класса нагревостойкости B предельно допустимое превышение температуры обмотки будет равно 80°C . Данное условие должно соблюдаться в течение всего срока эксплуатации ВАЭ; выполнение этого условия позволит реализовать установленный на этапе проектирования машины ресурс.

Ранее было отмечено, что на работу узла статора влияют конструктивно-технологические решения. Они определяются λ_k . С увеличением прохождения количества дефектов узла в эксплуатацию интенсивность отказов увеличивается, т.е. становится больше значения, установленного ТЗ на проектирование. Если нагрузочные режимы ВАЭ в эксплуатации превышают пределы, установленные техническими условиями, тогда это вызовет возрастание λ_k . Интенсивность отказов λ зависит от качества проектирования, технологии изготовления и влияния внешних эксплуатационных факторов λ_3 , т.е. $\lambda = \lambda_k + \lambda_3$. Если принять условие, что поток отказов подчиняется стационарному Пуассоновскому, тогда будем иметь выражение надёжности пазового узла статора ВАЭ

$$P(t) = e^{-(\lambda_k + \lambda_3)t}, \quad (3.1)$$

где λ_k – поток отказов от конструктивно-технологических факторов; λ_3 – поток отказов от влияния эксплуатационных факторов.

Наиболее тяжёлым видом отказа ВАЭ является пробой изоляции обмотки статора, основной причиной которого является перегрев изоляции и, как следствие, – её ускоренное старение. Основными видами отказов изоляции являются межвитковое замыкание, пробой изоляции катушки, замыкание

катушки на корпус. При перегрузке ВАЭ в силу воздействия отклонений в технологическом процессе происходит возрастание тока нагрузки, что приводит к перегреву изоляции. На отказы изоляции приходится до 80% всех случаев разрушения ВАЭ.

Исследование и анализ режимов нагрузок показывают, что режим потребления тока представляет собой стационарный процесс (Пуассоновский) [62]. Тогда будем считать, что

$$T = Ae^{-B\theta} \quad (3.2)$$

где A – относительный срок службы изоляции; B – коэффициент; θ – величина превышения температуры.

Задача сводится к определению ресурса изоляции T с учётом её перегрева в эксплуатации [70]. Будем при этом считать, что причины, вызывающие это нежелательное явление, – технологические, из-за неравномерной загрузки производственного процесса. Определим ресурс изоляции при различных значениях её перегрева 0 °С, 20 °С, 40 °С, 60 °С. Тогда для температуры 0 °С будем иметь выражение:

$$T_0 = Ae^{-0,0866 \cdot 0} = 10 \text{ лет.} \quad (3.3)$$

Для величины перегрева 10 °С будем иметь выражение

$$T_0 = Ae^{-0,0866 \cdot 10} = 4,2 \text{ года.} \quad (3.4)$$

Расчёты, проведённые для других температурных режимов обмотки, сведены в таблице 3.1, из данных которой видно, что с увеличением температуры изоляции интенсивность λ , резко возрастает.

Приводимые результаты λ , по интервалам температуры от перегрева ВАЭ показывают, что интенсивность отказов электродвигателей в процессе эксплуатации в несколько раз превышает установленное значение. Из этого

следует, что все усилия, направленные на этапе проектирования электродвигателя на повышение его надёжности, могут оказаться тщетными. Безусловно, перегрузка ВАЭ в производственных условиях может происходить в различных ситуациях.

Таблица 3.1 – Зависимость интенсивности отказов от величины перегрева изоляции обмотки статора

| $\Delta\theta, ^\circ\text{C}$ | $B\theta$ | $e^{-B\theta}$ | $\lambda,$ | $T, \text{лет}$ |
|--------------------------------|-----------|----------------|------------|-----------------|
| 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 случае значительной кратковременной перегрузки срабатывает защитное устройство и отключает ВАЭ от сети. Этот вариант в наших исследованиях не рассматривается из-за относительно малого времени существования режима короткого замыкания относительно срока службы изоляции, равного 10 годам, т.е. является бесконечно малой величиной, $t_{к.з.} \ll T$. Кроме того, действие защиты исключает перегрев изоляции, поэтому этот вариант из рассмотрения исключается.

В исследованиях предполагаются режимы нагрузок, когда из-за производственно-технологических условий перегрев изоляции обмотки статора ВАЭ происходит довольно длительное время, например, в течение часа, суток, месяца и более [78], в этом случае перегрев может достигать недопустимой величины. В результате теплового пробоя происходит разрушение изоляции обмотки. Следует отметить, что цеховые производственные ВАЭ работают в непрерывном режиме, но, как было отмечено ранее, по условиям

технологического процесса они могут работать в режимах перегрузки, которые носят случайный характер. Именно эти режимы перегрузок приводят к тяжёлым последствиям: расстройству сложного технологического процесса, останову производства, демонтажу, монтажным работам и, наконец, к необходимости капитального ремонта электродвигателя.

Расчёты надёжности узла статора ВАЭ по интервалам температуры приведены в таблице 3.2. На основании ранее принятых допущений вероятность безотказной работы узла определяется с учётом экспоненциальной зависимости.

Таблица 3.2 - Надёжность узла статора ВАЭ по интервалам температуры

| <i>t, лет</i> | <i>P₀, %</i> | <i>P₁₀, %</i> | <i>P₂₀, %</i> | <i>P₃₀, %</i> | <i>P₄₀, %</i> |
|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2,5 | 0,380 | 0,459 | $2 \cdot 10^{-2}$ | $10,5 \cdot 10^{-2}$ | $2,6 \cdot 10^{-5}$ |
| 5,0 | 0,042 | 0,021 | $4 \cdot 10^{-3}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | ≈ 0 |
| 7,5 | 0,028 | 0,009 | $1,10 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | ≈ 0 |
| 10 | 0,018 | 0,004 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ | ≈ 0 |

В результате исследования наработки на отказ для изоляции было установлено следующее: если предельно допустимая температура изоляции не превышена, наработка на отказ равна 10 годам, фактически это период работы ВАЭ до первого капитального ремонта [79, 105]. При величине перегрева изоляции, равной 10 °С, наработка на отказ составит 4,2 г.; при величине перегрева изоляции, равной 20 °С, наработка на отказ будет равной 1,79 г.; при перегреве изоляции, равном 30 °С, наработка на отказ составляет 0,74 г.; при перегреве изоляции катушек статора до 40 °С отказ наступает при наработке 0,31 г.

Приведенные результаты исследования показывают, как снижается ресурс изоляции с увеличением температуры, превышение допустимого

значения которой происходит в эксплуатации, несмотря на то, что по ТУ перегрузка электродвигателей в эксплуатации не допускается. Однако экспериментальные исследования режимов нагружения показывают, что они имеют место и приводят к тяжёлым видам разрушения ВАЭ (рисунки 1.1, 1.2).

Предложенная методика исследования ВБР ВАЭ является развитием существующих методов оценки надёжности технических систем (глава 1), где предполагается влияние физических факторов на работу электромеханических систем. Однако они предполагают получение моделей надёжности при условии возможности проведения экспериментальных исследований объекта исследования (Исаев И.П., Кузнецов Н.Л., Котеленец Н.Ф. и др.). Полученные таким образом уравнения надёжности не могут быть использованы на других системах, т.е. они не являются универсальными и в других случаях дают большие погрешности.

В нашем случае предложен новый подход, где физические модели функционально связаны с параметрами надёжности: ВБР, λ , T . Это позволяет значительно расширить диапазон объектов и повысить адекватность моделей и результатов расчёта.

При известной величине T обмотки можно определить интенсивность отказов, – она равна величине, обратной наработке. Приведенные данные (таблица 3.1) показывают, что интенсивность отказов системы в зависимости от температуры перегрева изменяется от 0,1 до 3,23 1/год. Ранее было показано, что интенсивность отказов зависит от конструкторско-технологических факторов из условия $\lambda_k = const$. Это значит, что в эксплуатации могут иметь место дефекты, сформированные на этапах проектирования и изготовления, что определяет вероятность безотказной работы в зависимости от качества проектирования и изготовления. Вместе с тем было отмечено, что не во всех случаях выполняются технические условия на эксплуатацию ВАЭ. В результате изменения технологических условий происходит отклонение нагрузок от номинальных, по причине превышения тока нагрузки происходит перегрев изоляции относительно установленных предельно допустимых норм, что

вызывает ускоренное её старение и, как следствие, – отказы. В конечном итоге, влияние функциональных факторов на интенсивность отказов, которая зависит от режимов работы ВАЭ, может быть выражена функцией ВБР. Примем, что она также может быть выражена λ_3 . Используем теорему о независимости двух происходящих событий, которые выражаются λ_k и λ_3 . Это даёт нам основание считать, что вероятность безотказной работы изоляции будет равна сумме интенсивностей отказов, т.е. $\lambda_k + \lambda_3$. При этом принятый закон будем считать экспоненциальным с λ_k и $\lambda_3 \geq 0$. Тогда будем иметь выражение для вероятности безотказной работы узла паза статора ВАЭ:

$$P(t) = e^{-(\lambda_k + \lambda_3)t}, \quad (3.5)$$

где λ_k – интенсивность потока отказов изоляции обмотки статора, вызванных качеством проектирования и технологии изготовления; λ_3 – интенсивность потока отказов изоляции, вызванных эксплуатационными перегрузками.

От их соотношения будет зависеть надёжность системы. Для λ_3 принимается условие $\lambda_3 = \text{const}$. Безусловно, в условиях эксплуатации этого достичь просто невозможно из-за производственно-технологических факторов. В этом случае, принимая во внимание ранее принятое условие, что нагрузка ВАЭ подчиняется Пуассоновскому закону с Гауссовским распределением в функции плотности распределения нагрузки, будем считать $I = \{I_x; m_k; \sigma_k\}$. Тогда в расчётах надёжности можно использовать λ_3 , соответствующее математическому ожиданию нагрузки.

Для сравнительного анализа надёжности элементов узла паза статора были определены их вероятности безотказной работы в функции от наработки. При этом $\lambda_k = 0,08$, где суммируются интенсивность отказов витковой изоляции катушки и корпусной изоляции паза обмотки статора ВАЭ. Интенсивность отказов $\lambda_3 = 0,24$ для принятого ранее значения величины перегрева обмотки, равной 10°C . Результаты расчётов $P_k(t)$, $P_3(t)$, $P_p(t)$ в функции от пробега сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – ВБР узла в функции времени

| № п/п | t , годы | $P_k(t)$ | $P_3(t)$ | $P_p(t)$ |
|----------|------------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2 | 2,5 | 0,82 | 0,56 | 0,46 |
| 3 | 5,0 | 0,67 | 0,3 | 0,20 |
| 4 | 7,5 | 0,55 | 0,16 | 0,09 |
| 5 | 10 | 0,45 | 0,09 | 0,04 |

На рисунке 3.1 приведены графические зависимости влияния различных факторов в функции от наработки. Наибольшую ВБР определяют факторы, зависящие от качества конструирования. Более низкую надёжность формируют факторы, имеющие место в эксплуатации, – в этом случае невыполнение технических условий на эксплуатацию приводит к перегрузкам ВАЭ, перегреву изоляции, её тепловому пробою и, как следствие, – к отказу.

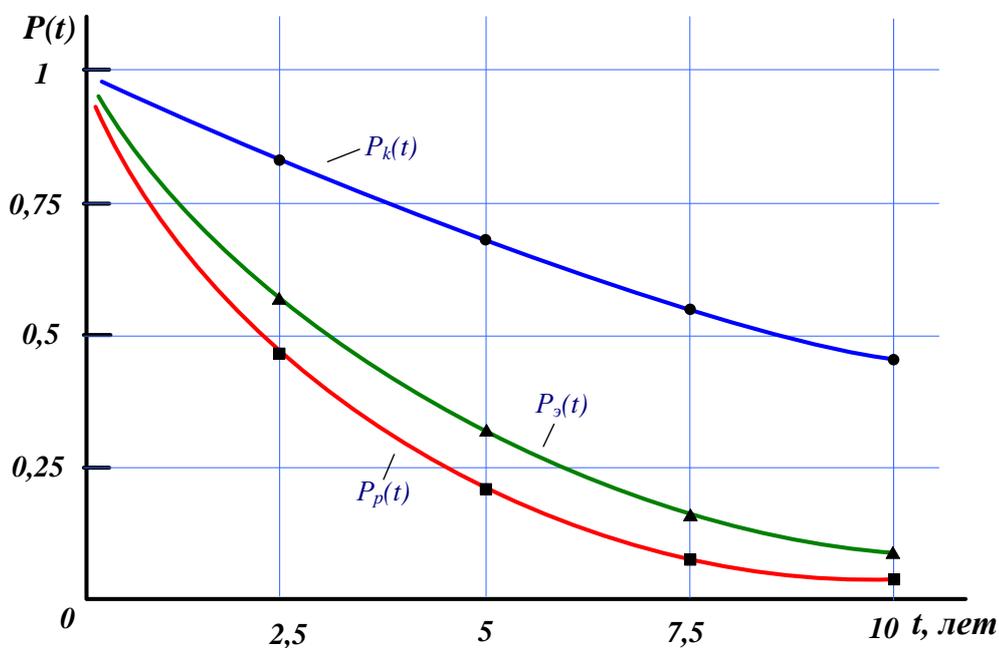


Рисунок 3.1 – Вероятность безотказной работы узла в функции времени.

$P_k(t)$ – конструктивные факторы; $P_3(t)$ – эксплуатационные факторы;

$P_p(t)$ – результирующая надёжность.

Построенные графические зависимости характеризуют вероятность безотказной работы в функции времени. Из приведенных зависимостей видно, что влияние условий эксплуатации на надёжность узла сильнее по сравнению с отказами, вызванных качеством проектирования и изготовления. На основании изложенного можно отметить следующие важные особенности проведённых исследований. Первая – если имеет место $\lambda_k < \lambda_3$, тогда влияние конструкторско-технологических дефектов на надёжность паза будет ниже. Это тот случай, когда обеспечивается высокое качество проектирования и изготовления, но при этом в эксплуатации не выполняются технические условия. По результатам полученных данных (таблица 3.3) можно отметить, – за 10 лет эксплуатации надёжность изоляции ВАЭ с учётом влияния факторов на этапах проектирования и изготовления $P_k(t) = 0,45$, с учётом воздействия эксплуатационных факторов $P_3(t) = 0,09$. Таким образом, можно сказать, что надёжность изоляции машин ниже при воздействии эксплуатационных факторов и выше при воздействии конструкторских и производственных факторов.

Вторая особенность – когда из-за недостаточного качества проектирования и технологии изготовления, т.е. при $\lambda_k > \lambda_3$, имеем условия прохождения дефектных ВАЭ в эксплуатацию. При этом примем, что в эксплуатации строго соблюдаются ТУ. И последнее, третье условие, когда $\lambda_\delta = \lambda_k = \lambda_3$, т.е. практически отсутствуют случаи прохождения ВАЭ в эксплуатацию с дефектами, при этом выполняются ТУ на эксплуатацию. Этот вариант является наиболее благоприятным, характеристики надёжности ВАЭ соответствуют расчётным λ_δ , которые были заданы в ТЗ на проектирование.

Исследования показывают, что на практике наиболее вероятным случаем является первый, хотя не исключаются второй и третий варианты. Это можно объяснить тем, что на этапах разработки ТЗ, эскизного проекта, рабочих чертежей, изготовления и доработки конструкции ВАЭ участвуют специалисты, имеющие высокий уровень образования и опыта. Поэтому

допускается меньше ошибок в работе, нежели в процессе эксплуатационного обслуживания, где уровень квалификации специалистов существенно ниже.

Несмотря на то, что интенсивность отказов считается постоянной в период установившегося износа деталей и узлов ВАЭ, в силу воздействия эксплуатационных факторов происходит старение изоляции. Поэтому для λ_i необходимо принимать усредненное значение, которое представляет собой среднеарифметическую сумму начального и конечного значений. В таблице 3.4 сведены результаты расчёта вероятности безотказной работы для различных вариантов отказов ВАЭ $\lambda_{k1} = 0,1$; $\lambda_{k2} = 0,3$; $\lambda_{k3} = 0,2$; $\lambda_{k4} = 0,4$ ($\lambda_{k1} < \lambda_{k4}$; $\lambda_{k2} > \lambda_{k3}$), на рисунке 3.2 приведены их графические зависимости.

Таблица 3.4 – Вероятности безотказной работы для различных вариантов отказов ВАЭ

| Период, лет | P_1 $\lambda_k=0,1$ | P_2 $\lambda_j=0,2$ | P_3 $\lambda_j=0,3$ | P_4 $\lambda_k=0,4$ |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2,5 | 0,76 | 0,63 | 0,50 | 0,37 |
| 5 | 0,59 | 0,37 | 0,22 | 0,136 |
| 7,5 | 0,48 | 0,22 | 0,10 | 0,05 |
| 10 | 0,37 | 0,14 | 0,05 | 0,02 |

Из приведенных графических зависимостей видно, как интенсивность отказов может влиять на ВБР ВАЭ, – с увеличением λ_i снижается ВБР элементов двигателей. Тогда, на этапе проектирования для конкретного значения $P_i(t)$ (рисунок 3.1) можно определить характеристику $\lambda_i(t)$ (рисунок 3.2). Величина интенсивности отказов изоляции в эксплуатации может зависеть как от внешних факторов, таких как температура, влажность, вибрация и др., так и от внутренних, – нагрузка, количество пусков и остановов и др.

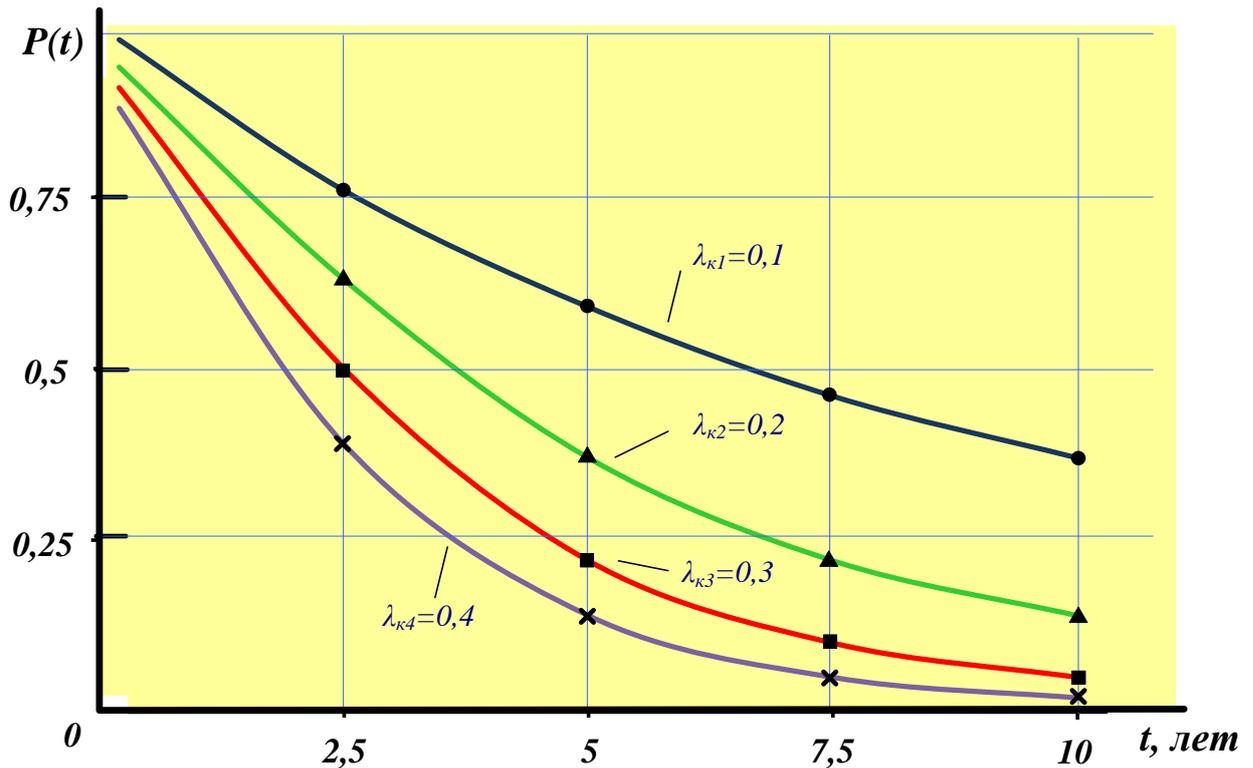


Рисунок 3.2 – Характеристики надёжности изоляции паза статора ВАЭ для различных интенсивностей отказов.

Безусловно, указанные факторы увеличивают интенсивность отказов, если режимы работы двигателя могут изменяться в широких диапазонах. Тогда λ_i также будет изменяться.

Расчёты параметров надёжности показывают, что в проектировании и эксплуатации ВАЭ необходимо добиваться того, чтобы интенсивность отказов асимптотически стремилась к нулю. В этом случае при Пуассоновском потоке отказов можно считать, что вероятность безотказной работы будет близка к 0,98. Безусловно, чтобы достичь такого результата, необходимо разработать адекватную программу совершенствования узлов и деталей ВАЭ.

Этого, безусловно, недостаточно, т.е. необходимо увеличить срок установившегося износа или наработку на отказ элементов машины. При этом их соотношение должно быть кратным по отношению параметров ТЗ. В этом случае ВАЭ при эксплуатации на установившемся участке интенсивности

отказов будет иметь значительный резерв наработки на отказ, что обеспечит его безотказную работу.

Задачей следующего этапа исследований является исследование влияния нагрузок ВАЭ как одного из важнейших эксплуатационных факторов, влияющих на ВБР изоляции. Основные допущения и предпосылки были указаны в предыдущих разделах диссертации; они позволят выявить вероятностную природу нагрузки, её влияние на температуру обмотки статора с последующим определением природы отказов ВАЭ в эксплуатации. Этому будут посвящены нижеследующие разделы исследований.

3.2 Разработка методики и организация экспериментальных исследований ВАЭ в производственных условиях

Целью экспериментальных исследований является определение уровня колебаний мощности и тока нагрузки ВАЭ в производственных условиях, которые дали бы основание определить режимы перегрева изоляции обмоток статора. Реализовать экспериментальные исследования возможно в том случае, если решить следующие вопросы, т.е. разработать методику экспериментальных исследований, содержание и порядок проведения эксперимента, обосновать перечень оборудования и приборов, необходимых для его выполнения, выбор и обоснование метода обработки результатов исследования.

Важной особенностью экспериментальных исследований является то, что они проводятся в условиях непрерывного производственного процесса, поэтому к исполнителям работ, а также к приборам, показания которых периодически регистрируются, предъявляются определённые требования. Основными контролируемыми параметрами являются активная и реактивная мощность потребляемой электроэнергии [78].

На рисунке 3.3 приведена однолинейная электрическая схема питания высоковольтного асинхронного электродвигателя нефтехимического производства, тип двигателя – CR 800 Y26:

мощность: 5700 кВА

номинальное напряжение: 6000 В

номинальный ток: 642,6 А

номинальная частота вращения: 994 об/мин

класс изоляции: F.

Питание электродвигателя осуществляется от главной понизительной подстанции ГПП-7, ячейки № 16, и далее от общих шин посредством кабельных линий непосредственно к электродвигателю. Для учёта потребляемой мощности используются счётчик активной энергии ЦЭ 6805В № 2906596 и счётчик реактивной энергии ЦЭ 6811 № 2820558. В процессе исследования производилась непрерывная запись указанных параметров, при этом в зависимости от поставленных задач интервалы времени устанавливались различные. Эксперимент проводился пассивный, т.е. параметры производственного процесса не изменялись.

Результаты исследований систематизированы в таблицы, табличные данные последовательно обработаны методами теории вероятностей и математической статистики, которые в данном случае имеют ряд важных преимуществ по сравнению с интегрально-дифференциальными методами. Среди всевозможных оценок параметров особую ценность представляют состоятельные и несмещённые.

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 .

Оценка является состоятельной, если с увеличением объёма выборки она стремится (по вероятности) к оцениваемому параметру. Оценка может быть несмещённой, если её математическое ожидание при любом объёме выборки равно оцениваемому параметру. Состоятельные и несмещённые оценки параметров имеют следующий вид:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.7)$$

Приведенные формулы использованы при расчёте оценок результатов измерений параметров нагрузки ВАЭ. В другом случае при больших объёмах измерений данные преобразуются по интервалам в форму статистического ряда, где определяется диапазон изменения измеренных величин, определяются количество измеренных величин в каждом интервале и вероятность попадания в интервал. Затем полученный вариационный ряд представляется в виде гистограммы распределения измеренных величин. По построенному вариационному ряду вычисляются оценки математического ожидания \bar{x} и дисперсии σ .

После вычисления оценок параметров тока и мощности возникает необходимость оценки их точности. Если полученная оценка равна $\hat{\theta}$, тогда необходимо определить такие числа δ_1 и δ_2 , когда интервалы $\hat{\theta} - \delta_1$, $\hat{\theta} + \delta_2$ накроют неизвестное истинное значение θ с достаточно большой вероятностью P . Выше приведенные доверительные вероятности позволяют устанавливать уровень точности оцениваемых параметров, которые характеризуются уровнем значимости критерия проверки, которая выражается следующей зависимостью

$$q = 100(1-p) \% . \quad (3.8)$$

При заданной доверительной вероятности P доверительный интервал может быть выбран различными способами. Приведенный метод даёт возможность производить вычисления оценок параметров нагрузок с учётом их точности и надёжности.

3.3 Температурные режимы работы ВАЭ

Режим работы ВАЭ в производственном процессе по классификации ГОСТ Р 52776-2007 можно считать продолжительным режимом – S1 [67]. Это режим, при котором время работы машины при практически неизменной нагрузке и температуре охлаждающей среды достаточно для нагрева всех её частей до практически установившейся температуры. Он характеризуется неизменными потерями в процессе всего времени работы машины.

В первом приближении для оценки нагрева электрическую машину можно представить в виде однородного тела с источниками тепла, равномерно распределёнными внутри узлов. Если режим нагрузки постоянный, то потери энергии в машине также будут постоянными. Тогда процесс нагревания узлов будет выражаться уравнением теплового баланса [80].

$$\Sigma P dt = Cd(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta dt \quad (3.9)$$

где ΣP – сумма потерь в объёме машины, Вт; C – теплоемкость машины, $C = cm$, c – удельная теплоемкость материала машины, Дж/кг·°С; m – масса машины, кг, α – коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м²·с), определяющий мощность, рассеиваемую с 1 м² площади поверхности при повышении температуры над охлаждающей средой, равной 1°С; S – поверхность охлаждения, м²; $\Delta\vartheta$ – превышение температуры поверхности машины над температурой охлаждающей среды, °С.

Уравнение показывает, что определённая доля тепловых потерь, выделяющихся в машине с момента ее включения под нагрузку, расходуется на

нагрев самой машины, а остальные потери рассеиваются в охлаждающий воздух системы вентиляции с поверхности. С увеличением времени работы машины температура её нагрева увеличивается, соотношение тепла, отдаваемого телу машины и охлаждённому воздуху, изменяется обратно пропорционально. В конечном итоге всё выделяемое тепло поступает в охлаждающий воздух машины. На рисунках 3.4, 3.5 приведены графические зависимости нагрева и охлаждения ВАЭ в функции от времени.

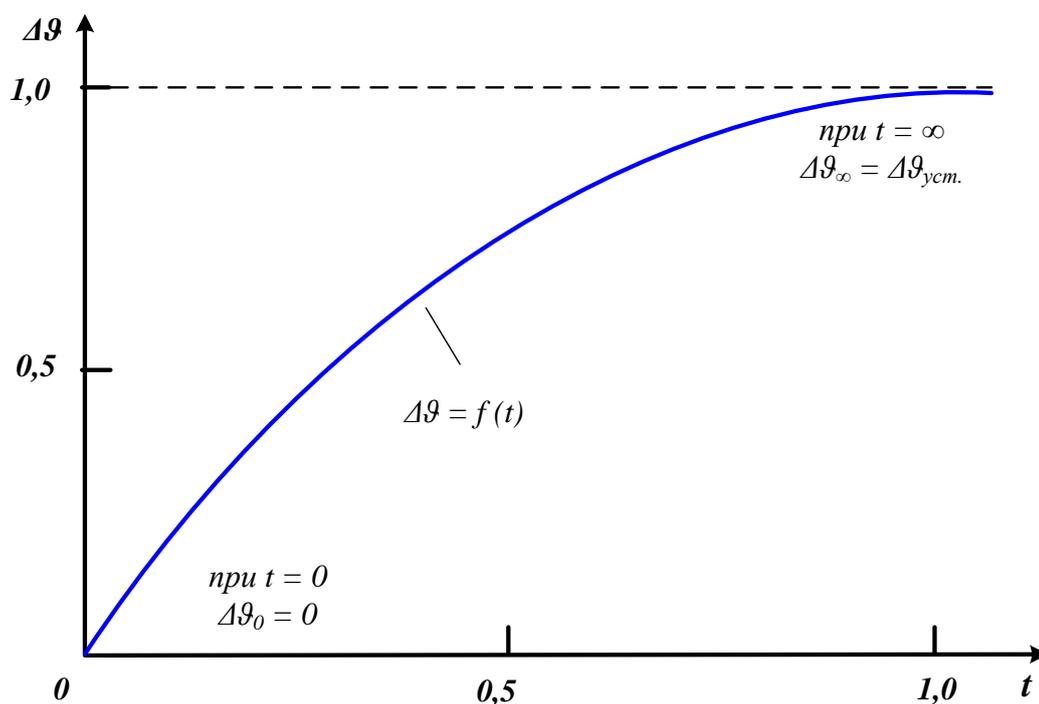


Рисунок 3.4 – Кривая нагрева ВАЭ.

На рисунке 3.4 показана графическая зависимость нагревания ВАЭ, из которой видно, что под нагрузкой температура машины растёт во времени и асимптотически приближается к установившемуся значению. Это происходит тогда, когда наступает баланс тепла, выделяемого машиной, с теплом, поступающим в систему охлаждения. Режим нагрева в этом случае будет иметь следующую характеристику перегрева: при $t=0$ $\Delta\theta_0=0$, при $t=\infty$ $\Delta\theta_\infty = \Delta\theta_{уст.}$. $\Delta\theta_{уст.}$ может отклоняться от реального значения лишь в том случае, если будут иметь место колебания нагрузки в процессе эксплуатации. Необходимо подчеркнуть, что это будет приводить к изменению теплового баланса узлов

ВАЭ и, как следствие, – вызовет соответствующие колебания их температуры. Естественно, эти колебания будут сдвинуты во времени относительно изменения нагрузки. Время запаздывания будет зависеть от величины постоянной времени T . Исследования показывают, что время сдвига, т.е. T , зависит от массы узлов ВАЭ и величины нагрузки.

На рисунке 3.5 приведена графическая зависимость остывания ВАЭ, где процесс охлаждения характеризуется следующими важными условиями: при $t = 0$ $\Delta\vartheta_0 = \Delta v_{ycm.}$, при $t = \infty$ $\Delta\vartheta_\infty = 0$. Приведенная зависимость нагревания машины характеризуется двумя слагаемыми приведенного уравнения. Первое слагаемое характеризует накопление тепловой энергии до расчётных пределов, второе – даёт возможность оценить параметры теплоотвода. Совместное их использование позволяет оценить температуру нагрева изоляции обмоток ВАЭ, которая является важным параметром.

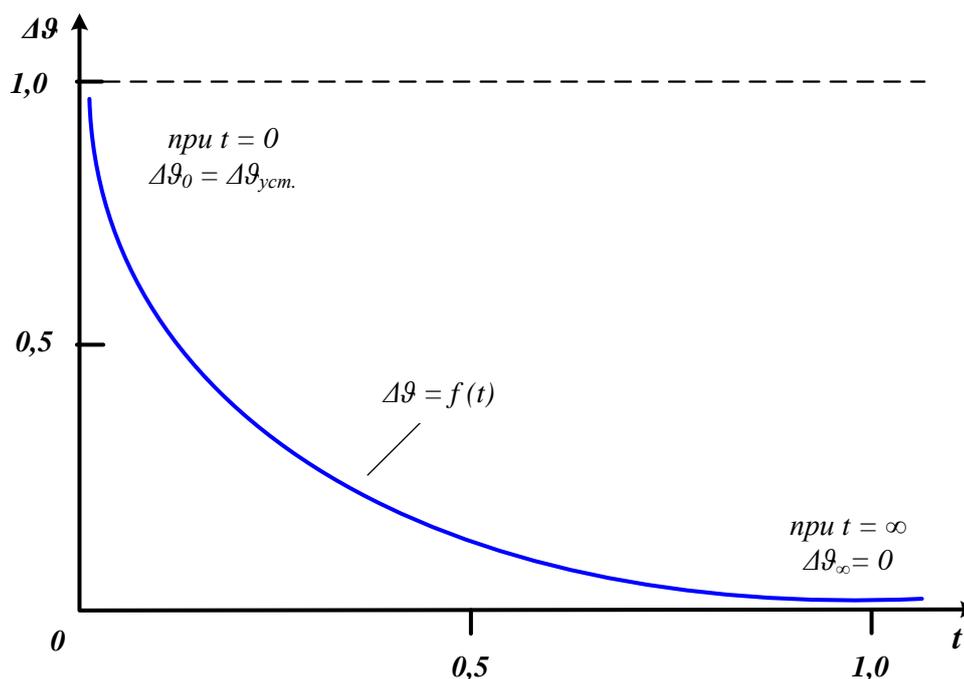


Рисунок 3.5 – Кривая остывания ВАЭ.

Во-первых, при тепловом расчёте ВАЭ главным критерием нагружения является температура перегрева обмоток изоляции, которая ограничивает её предельное значение. Во-вторых, если в эксплуатации такие случаи будут

иметь место, произойдёт снижение надёжности изоляции, в случае перегрева изоляции в течение длительного времени вероятность пробоя изоляции будет возрастать, приводя к тяжёлым аварийным последствиям. В-третьих, в режиме перегрузки ВАЭ, а такие случаи наблюдаются в производственных условиях, все показатели машины ухудшаются, возрастающий ток повышает тепловыделение в обмотках сердечника статора. Понимание серьёзности влияния перегрузок ВАЭ на надёжность изоляции ставит вопрос о необходимости обеспечения устойчивой работы ВАЭ в производственных условиях.

Нагрев электрической машины происходит по экспоненциальному закону $\tau = f(t)$. Аналитическое описание его является сложным по ряду причин. Статор ВАЭ является неоднородным телом, – состоит из листов электротехнической стали, изоляционных материалов, имеющих различные теплотехнические характеристики – коэффициент теплоотдачи A , теплоёмкость C и др. Они по-разному отдают тепло охлаждающему воздуху. Поэтому часто при расчётах тепловых характеристик принимается, что масса статора однородна. При этом после определения расчётных параметров машины изготовленный образец проходит стендовые испытания для доводки параметров нагревания и системы вентиляции в соответствии с заданными параметрами ТЗ.

Для определения влияния увеличения нагрузки на температуру (превышение) обмотки статора примем линейную корреляционную связь между мощностью и предельным значением температуры обмотки статора τ_{np} . Расчётным путём определим их характеристики. Для величины перегрузки, равной 4200 кВт превышение температуры изоляции составит 84 °С, для 4400 кВт – 88 °С, для 4600 кВт – 92 °С, для 4800 кВт – 96 °С, для 5000 кВт – 100 °С.

Величина предельного или установившегося превышения τ_{np} , а значит, и установившаяся температура обмотки зависят от количества тепла, выделяемого в машине в единицу времени, а также от теплоотдачи, она характеризуется постоянной времени нагревания, которая определяется следующими параметрами

$$T = \frac{C}{A}, \quad (3.10)$$

где C – теплоемкость машины, ккал/град, A – теплоотдача машины, ккал/град сек.

Приведенное соотношение показывает, что с увеличением нагрузки выше номинального значения величина T будет возрастать. Учитывая это, введём поправку для температуры превышения в виде коэффициента k , который имеет функциональную зависимость:

$$k = f(\Delta P) \quad (3.11)$$

где ΔP – приращение мощности ВАЭ в эксплуатации относительно номинальной нагрузки.

Примем поправочный коэффициент $k = 0,1$ [2]. Тогда по интервалам перегрузки от 4200 кВт до 5000 кВт будем иметь следующие значения установившегося превышения температуры – 92,4 °С; 96,8 °С; 101,2 °С; 105,6 °С; 110 °С. Определим ресурс изоляции с учётом приведенных температурных характеристик. Срок службы изоляции будет равен

$$\tau = \tau_0 e^{-0,0866 \cdot \theta} \quad (3.12)$$

где θ – температура нагрева изоляции, °С; τ_0 – условный срок службы (при $\theta = 105$ °С $\tau = 7$ лет).

Согласно [2] $\tau_0 = 6,225 \cdot 10^4$ лет при $\tau = 7$ лет и $\theta = 105$ °С. С повышением класса изоляции процессы старения при заданной температуре происходят медленнее. Для класса изоляции В $\Delta\theta = 10$ °С. На основании ранее полученных значений температуры нагревания изоляции статора определим срок службы изоляции статора ВАЭ. Для этого подставим в приведенное уравнение величины превышения температур. В результате были получены значения величин ресурса изоляции, приведенные в таблице 3.5. При этом срок службы

изоляции $\tau_0 = 33,3$ лет получен на основании исследований эксплуатационных режимов.

Параметры α и β характеризуют уровень показателя степени экспоненциальной функции.

Таблица 3.5 – Влияние температуры на надёжность изоляции ВАЭ

| № п/п | $\theta, ^\circ\text{C}$ | α | β | τ_i , лет | λ , 1/год |
|-------|--------------------------|----------|---------|----------------|-------------------|
| 1 | 92,4 | 8,0 | 2986 | 20,84 | 0,048 |
| 2 | 96,8 | 8,4 | 4371 | 14,23 | 0,07 |
| 3 | 101,2 | 8,8 | 6399 | 9,72 | 0,103 |
| 4 | 105,6 | 9,2 | 8892 | 6,20 | 0,161 |
| 5 | 110,0 | 9,5 | 13711 | 4,53 | 0,221 |

Из табличных данных видно, что по мере увеличения температуры перегрева нелинейно возрастает интенсивность отказов изоляции статора. Из этого следует, что одним из важных факторов, влияющим на надёжность изоляции, является температура её нагревания.

3.4 Исследования режимов активной и реактивной нагрузок в производственных условиях

Активная мощность характеризуется средним значением мгновенной величины за период T [82]:

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt. \quad (3.13)$$

Условия эксперимента позволяют периодически регистрировать активную мощность, потребляемую ВАЭ, с интервалом времени 0,5 час, 1,0 час, а также за сутки, месяцы, годы.

Одновременно с этим аналогичным образом регистрируется реактивная мощность, которая является источником потерь в обмотках ВАЭ. Таким образом, для активной мощности будет иметь место выражение [83, 84]:

$$P = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л} \cos \varphi \quad (3.14)$$

а для реактивной

$$Q = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi. \quad (3.15)$$

Полная мощность равна

$$S = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \quad (3.16)$$

Имея данные измерений мощности, можно получить значения активной и реактивной потребляемой энергии, умножив их на время работы ВАЭ. Результаты экспериментальных исследований обработаны и систематизированы, в табличной форме представлены параметры активной и реактивной мощности, полученные в производственных условиях предприятия. Данные измерений приведены в интервале 0,5 часа.

Статистика измерений была обработана методами теории вероятностей и математической статистики, приведенными в п. 2.4. Для этого приняты следующие важные условия:

1) массив данных мощностей работы ВАЭ представляет собой случайные события;

2) они (события) не коррелированы между собой, представляют собой случайную функцию, имеющую закон функции плотности распределения вида $N = \{x; m_x; \sigma_x\}$.

Так как запись показаний прибора ведется непрерывно и представляет собой случайный процесс, закон функции плотности распределения можно

считать эргодическим. Это даёт основание оценивать любые выборки во времени работы машины, – тогда оценки параметров будут не смещёнными и состоятельными [85, 86].

В результате обработки данных экспериментальных исследований были получены основные характеристики режима нагружения ВАЭ. Математическое ожидание – 3928 кВтч, среднеквадратическое отклонение – 295 кВт. Результаты сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Характеристики режима нагружения ВАЭ (активная мощность)

| m | x_{m-1} | x_m | n_m | P_m | x_m^* | $x_m^* P_m$ | $x_m^* - x^0$ | $(x_m^* - x^0)^2$ | $(x_m^* - x^0) P_m$ |
|-----|-----------|-------|-------|-------|---------|-------------|---------------|----------------------|---------------------|
| 1 | 3200 | 3400 | 10 | 0,026 | 3300 | 85,8 | -628 | $3,9 \cdot 10^5$ | $0,1 \cdot 10^5$ |
| 2 | 3400 | 3600 | 39 | 0,102 | 3500 | 357,0 | -428 | $1,8 \cdot 10^5$ | $0,18 \cdot 10^5$ |
| 3 | 3600 | 3800 | 48 | 0,126 | 3700 | 466,2 | -228 | $0,5 \cdot 10^5$ | $0,06 \cdot 10^5$ |
| 4 | 3800 | 4000 | 175 | 0,461 | 3900 | 1797,7 | -28 | $0,00784 \cdot 10^5$ | $0,03 \cdot 10^5$ |
| 5 | 4000 | 4200 | 51 | 0,134 | 4100 | 549,4 | 172 | $0,296 \cdot 10^5$ | $0,04 \cdot 10^5$ |
| 6 | 4200 | 4400 | 36 | 0,095 | 4300 | 408,5 | 372 | $1,3 \cdot 10^5$ | $0,12 \cdot 10^5$ |
| 7 | 4400 | 4600 | 9 | 0,024 | 4500 | 108,0 | 572 | $3,2 \cdot 10^5$ | $0,08 \cdot 10^5$ |
| 8 | 4600 | 4800 | 6 | 0,016 | 4700 | 75,2 | 772 | $5,9 \cdot 10^5$ | $0,09 \cdot 10^5$ |
| 9 | 4800 | 5000 | 4 | 0,011 | 4900 | 53,9 | 972 | $9,4 \cdot 10^5$ | $0,1 \cdot 10^5$ |
| 10 | 5000 | 5200 | 2 | 0,005 | 5100 | 26,8 | 1172 | $13,7 \cdot 10^5$ | $0,07 \cdot 10^5$ |

Поинтервальное исследование мощности ВАЭ позволяет анализировать вероятностные характеристики нагрузки в эксплуатации. Кроме того, при определённых допущениях – исследовать соответствие функции плотности распределения принятой гипотезе. В целом можно считать, что в представленном виде функция плотности распределения активной мощности

представляет собой монотонную функцию. Это даёт основание полагать, что объём статистики и интервалы удовлетворяют основным требованиям методики – обеспечение точности математических моделей и их адекватности. Разброс параметра (активной мощности) находится в пределах от 3043 кВт до 4813 кВт.

Была проведена проверка гипотезы о соответствии выборки из генеральной совокупности [87].

Исследование статистического ряда нагрузки даёт возможность оценить уровень сходимости экспериментальных данных с оцениваемыми параметрами. Первые должны асимптотически приближаться к параметрам функции принятой гипотезы. Ранее было дано обоснование необходимости применения для данной задачи Гауссовского закона функции плотности распределения – $f(p) = \{P; m_p; \sigma_p\}$. В результате было показано, что расчётное значение μ с учётом числа степеней свободы и наложенных связей не превышает табличного значения. Таким образом, функция плотности распределения подтверждает принятую гипотезу о нормальном законе распределения.

Результаты этой проверки сведены в таблицу 3.7. Экспериментальная функция распределения должна быть приведена к обобщённому виду, что необходимо, когда на этапе проектирования двигателя требуется произвести расчёт параметров надёжности элементов и узлов в различных диапазонах нагрузок. При этом каждый интервал имеет соответствующую вероятность. В соответствии с гипотезой о нормальном законе распределения случайной функции мощности ВАЭ была проведена поинтервальная коррекция параметров статистической выборки, её результаты приведены в таблице 3.8.

Полученные результаты дают основание принять следующие условия. 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. При этом могут отличаться только характеристики.

Таблица 3.7 – Проверка гипотезы о соответствии выборки из генеральной совокупности

| 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 | 10 | $-\infty$ | -1,69 | -0,4545 | 0,1501 | 57 | -47 | $2,2 \cdot 10^3$ | 35,6 |
| 2 | 39 | -1,69 | -1,02 | -0,3461 | 0,2168 | 82 | -41 | $1,68 \cdot 10^3$ | 20,5 |
| 3 | 48 | -1,02 | -0,33 | -0,1293 | 0,2586 | 98 | -50 | $2,5 \cdot 10^3$ | 25,5 |
| 4 | 175 | -0,33 | 0,33 | 0,1293 | 0,2053 | 78 | 97 | $9,4 \cdot 10^3$ | 20,5 |
| 5 | 51 | 0,33 | 1,02 | 0,3346 | 0,1199 | 46 | 5 | 25 | 0,54 |
| 6 | 36 | 1,02 | 1,69 | 0,4545 | 0,0338 | 13 | 23 | $5,3 \cdot 10^2$ | 40,8 |
| 7 | 9 | 1,69 | 2,37 | 0,4903 | 0,0085 | 3 | 6 | 36 | 12,0 |
| 8 | 6 | 2,37 | 3,05 | 0,4988 | 0,0011 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 4 | 3,05 | 3,73 | 0,4999 | 0,0005 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 2 | 3,73 | $+\infty$ | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 3.8 – Поинтервальная коррекция параметров статистической выборки

| № п/п | t_m | $P(x_m^*)$ | $\frac{P_m}{\Delta m}$ |
|----------|-------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 1,60 | $2,87 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | 1,05 | $6,05 \cdot 10^{-4}$ | $5,1 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | 0,53 | $9,12 \cdot 10^{-4}$ | $6,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | 0 | $39,89 \cdot 10^{-4}$ | $2,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 5 | 0,53 | $9,12 \cdot 10^{-4}$ | $6,7 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 1,05 | $6,05 \cdot 10^{-4}$ | $4,8 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 1,60 | $2,87 \cdot 10^{-4}$ | $1,2 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 2,10 | $11,33 \cdot 10^{-5}$ | $0,8 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 2,63 | $3,3 \cdot 10^{-5}$ | $0,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | 3,42 | $3,02 \cdot 10^{-5}$ | $0,3 \cdot 10^{-4}$ |

На рисунке 3.6 приведена графическая зависимость функции плотности распределения активной мощности с параметрами $m_p = 3928$ кВт, $\sigma_p = 295$ кВт.

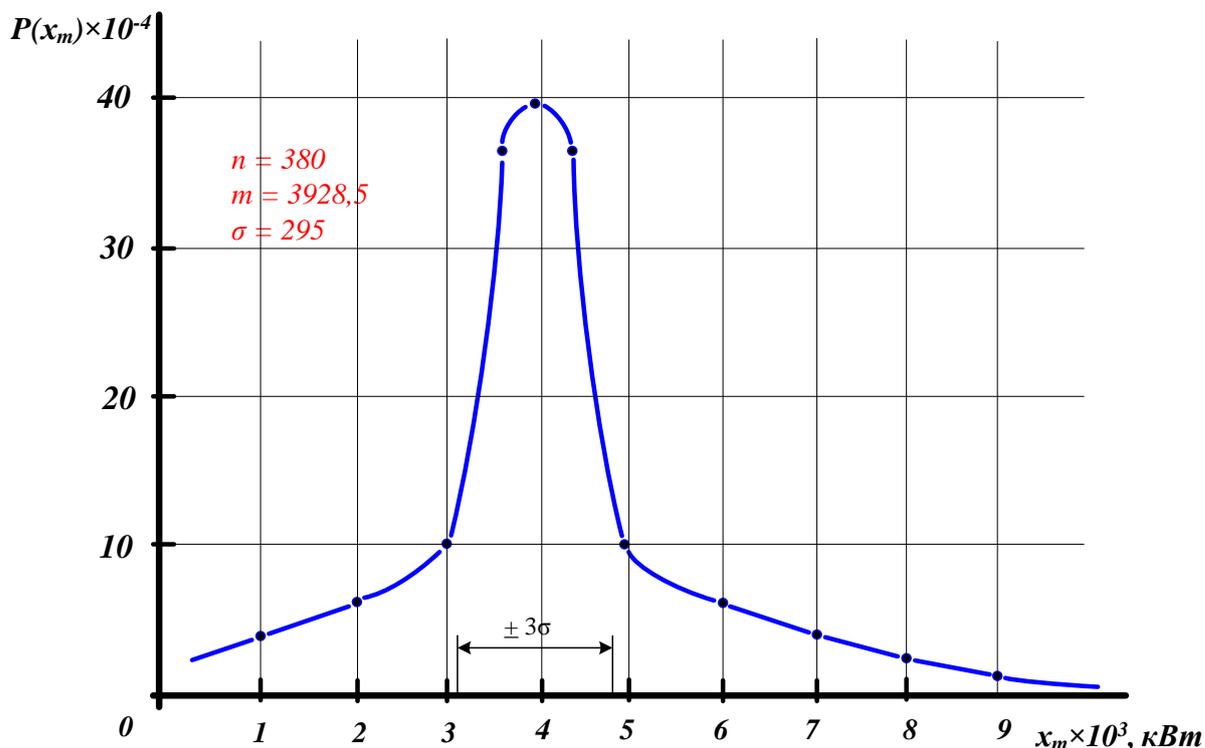


Рисунок 3.6 – Функция плотности распределения активной мощности ВАЭ.

Эти результаты можно считать важными, т.к. на этапе проектирования они могут быть использованы при проведении расчётов надёжности элементов ВАЭ, в частности, при определённых температурных режимах изоляции для эксплуатации. Это даёт возможность на ранней стадии проектирования установить оптимальные режимы нагревания изоляции обмотки статора ВАЭ. Приведенные данные экспериментальных исследований, а также полученные обобщённые вероятностно-статистические характеристики дают возможность установить вероятностные параметры перегрева изоляции ВАЭ с учётом параметров изменения нагрузки. Из этого следует, что режим нагрузки принимает в эксплуатации различные значения относительно номинального значения и ограничения допустимых токов с различными вероятностями и временными факторами. Известно, перегрев изоляции обмотки статора характеризуется величиной температуры и временем нахождения в данном режиме.

Ниже будет показано, насколько опасно нахождение электродвигателя в режиме перегрузки и с какой вероятностью можно гарантировать его безотказную работу, т.е. надёжность в эксплуатации.

Экспериментальные исследования, проведенные в производственных условиях, дали возможность оценить дисперсию реактивной мощности. Ранее было показано, что она может влиять на потери энергии в обмотках электрической машины. Это может быть выражено не только количеством выделяемого тепла в машине, но и увеличением сопротивления катушек статора [71, 88]. Следовательно, можно говорить о том, что с увеличением реактивных токов в машине можно наблюдать возрастание температуры обмоток статора. Проведенные исследования показали, что дисперсия разброса реактивной мощности ($\pm 3\sigma$) относительно математического ожидания достигает 40 %. В таблице 3.9 приведены предельные величины реактивной мощности (x_{m-1}), равные 1900 кВАр и 2600 кВАр. Интервалы по позициям (m) равны между собой (1000 кВАр). Определены средние значения по каждому интервалу (x_m) и далее вероятности, дисперсии внутриинтервальные.

Таблица 3.9 – Характеристика режима нагружения ВАЭ

| m | x_{m-1} | x_m | n_m | P_m | x_m^* | $x_m^* P_m$ | $x_m^* - x^0$ | $(x_m^* - x^0)^2$ | $(x_m^* - x^0) P_m$ |
|-----|-----------|-------|-------|-------|---------|-------------|---------------|-------------------|---------------------|
| 1 | 1900 | 2000 | 4 | 0,009 | 1950 | 17,55 | -394 | 155236 | 1397 |
| 2 | 2000 | 2100 | 18 | 0,040 | 2050 | 82,00 | -294 | 86436 | 3457 |
| 3 | 2100 | 2200 | 47 | 0,104 | 2150 | 223,6 | -194 | 37636 | 3914 |
| 4 | 2200 | 2300 | 111 | 0,246 | 2250 | 553,5 | -94 | 8836 | 2173 |
| 5 | 2300 | 2400 | 94 | 0,208 | 2350 | 488,8 | 6 | 36 | 8 |
| 6 | 2400 | 2500 | 117 | 0,259 | 2450 | 634,6 | 106 | 11236 | 2910 |
| 7 | 2500 | 2600 | 61 | 0,135 | 2550 | 344,3 | 206 | 42436 | 5728 |

Из данных таблицы видно, что при $n_m = 111$ наибольшую вероятность имеет интервальное значение $Q = 0,246$ кВАр. Дисперсия находится в

интервале от 1397 кВАр до 5728 кВАр. Анализ данных таблицы позволяет предположить следующее, – функция плотности распределения реактивной мощности может быть представлена законом Гаусса. Для этого необходимо провести дальнейшие исследования и расчёты.

Проверка гипотезы о нормальном распределении случайной функции Q , показала, что

$$\text{Sign}(\chi^2 - \chi_{кр.}^2) > 0. \quad 3.17$$

Результаты проверки гипотезы показаны в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Проверка гипотезы о нормальном распределении случайной функции

| r | n_r | t_{r-1} | t_r | $\Phi_0(t_{r-1})$ | \tilde{p}_r | $n\tilde{p}_r$ | $n_r - n\tilde{p}_r$ | $(n_r - n\tilde{p}_r)^2$ | $\frac{(n_r - n\tilde{p}_r)^2}{n \cdot n\tilde{p}_r}$ |
|-----|-------|-----------|-------|-------------------|---------------|----------------|----------------------|--------------------------|---|
| 1 | 4 | ∞ | -2,46 | 0,4930 | 0,0070 | 3 | 1 | 1 | 0,33 |
| 2 | 18 | -2,46 | -1,74 | 0,4591 | 0,027 | 12 | 6 | 36 | 3 |
| 3 | 47 | -1,74 | -1,03 | 0,3435 | 0,1156 | 52 | -5 | 25 | 0,48 |
| 4 | 111 | -1,03 | -0,31 | 0,1217 | 0,2218 | 100 | 11 | 121 | 1,21 |
| 5 | 94 | -0,31 | 0,40 | 0,1554 | 0,3037 | 137 | -41 | 1681 | 12,27 |
| 6 | 117 | 1,40 | 1,11 | 0,3665 | 0,2111 | 95 | 22 | 484 | 5,09 |
| 7 | 61 | 11 | 1,83 | 0,4664 | 0,0999 | 45 | 16 | 256 | 5,68 |

Данные в таблице 3.10 приведены в безразмерных относительных величинах. Изменены (центрированы) интервалы мощности. В результате расчёта получены интервальные значения координат стандартной функции и их расхождения с экспериментальными. Затем, проведя расчёты и последовательно сложив по интервалам, можно получить результат оценки по критерию χ^2 . Анализ показывает, что в данном случае расчётное значение критерия при числе степеней свободы k , равном 7 и наложенных связей s ,

равном 2, вид функции плотности распределения незначительно превышает табличное значение. Это говорит о том, что принятая гипотеза несколько отличается от стандартной. Таким образом, можно сделать следующий важный вывод о том, что полученной функцией распределения можно пользоваться при расчётах диапазонов регулирования реактивной мощности ВАЭ.

В особых случаях, когда требуется высокая точность расчётов, необходимо учесть следующую предпосылку: режим реактивной мощности является Пуассоновским, стационарным потоком, удовлетворяет условиям эргодичности, следовательно, воспользовавшись этими свойствами режимов нагрузки ВАЭ, можно поменять выборку и заново проверить выбранную гипотезу.

Ранее было принято условие, что нагрузка ВАЭ в производственных условиях удовлетворяет условиям Пуассоновского потока. Учитывая это, экспериментальная функция плотности распределения была расчётным путём приведена к Гауссовскому закону распределения. В таблице 3.11 приведены ее поинтервальные значения (гистограммы), а также выровненные эмпирические значения интервальных вероятностей Q .

Таблица 3.11 – Выравнивание распределения с помощью нормального закона

| x_m^* | t_m^* | $p(x_m^*) \cdot 10^{-4}$ | $\frac{P_m}{\Delta m}$ |
|---------|---------|--------------------------|------------------------|
| 1950 | -2,81 | $0,6 \cdot 10^{-4}$ | $0,9 \cdot 10^{-4}$ |
| 2050 | -2,10 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ |
| 2150 | -1,38 | $11 \cdot 10^{-4}$ | $1,04 \cdot 10^{-3}$ |
| 2250 | -0,67 | $23 \cdot 10^{-4}$ | $2,46 \cdot 10^{-3}$ |
| 2350 | 0,04 | $29 \cdot 10^{-4}$ | $2,08 \cdot 10^{-3}$ |
| 2450 | 0,76 | $21 \cdot 10^{-4}$ | $2,59 \cdot 10^{-3}$ |
| 2550 | 1,47 | $10 \cdot 10^{-4}$ | $1,35 \cdot 10^{-3}$ |

В таблице приведены поинтервальные нормированные вероятности функции плотности распределения, которые показывают численные значения по интервалам реактивной мощности ВАЭ. На рисунке 3.7 даны графические значения указанных функций.

Наибольшую плотность имеет вероятность нагрузки при значении 2250 кВАр, она равна $2,46 \cdot 10^{-3}$. При нагрузке 2450 кВАр плотность интервальная равна 2450 кВАр. В целом необходимо отметить следующее. Диапазон Q имеет широкие пределы, при этом имеет смещение плотности функции распределения в сторону больших значений Q . Такая тенденция приводит к серьезным последствиям в эксплуатации, способствует работе ВАЭ в условиях больших значений Q в течение продолжительного времени, что приводит к ускоренному старению изоляции катушек.

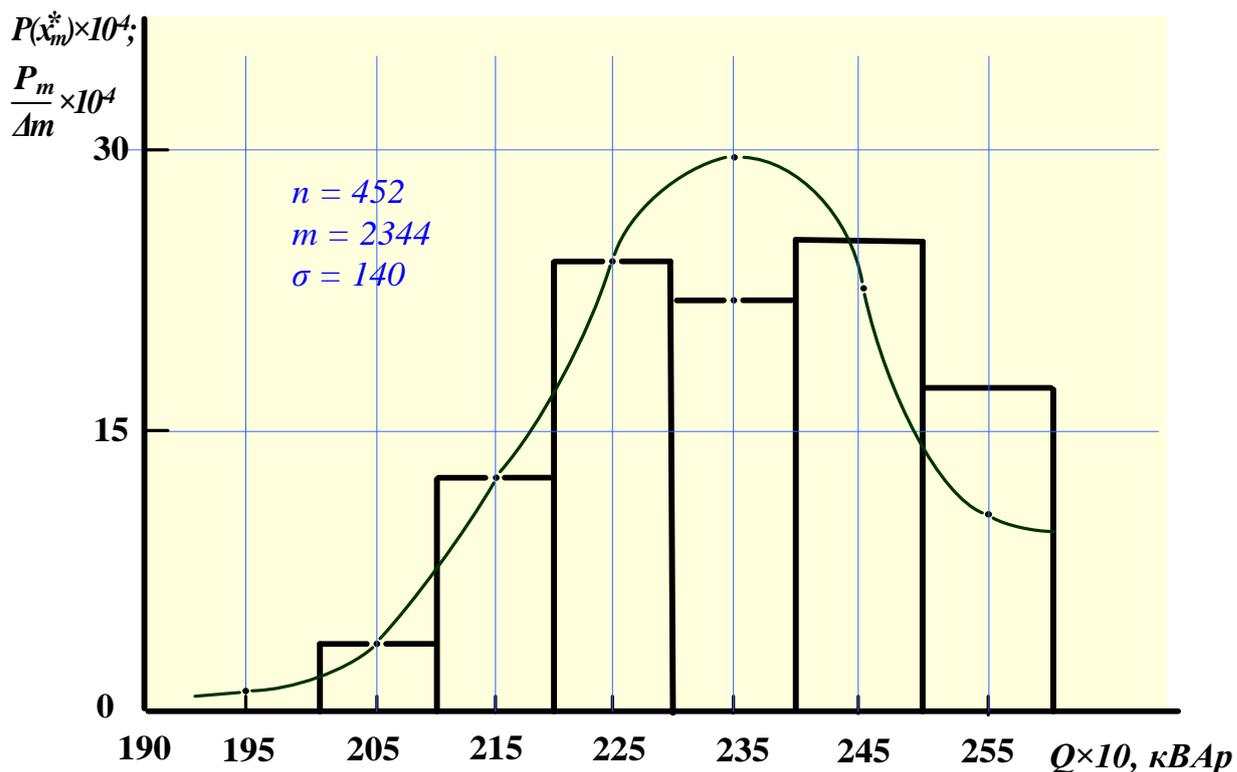


Рисунок 3.7 – Функции распределения реактивной мощности ВАЭ.

1 – гистограмма; 2 – выровненное эмпирическое распределение.

Сравнительный анализ данных производственных нагрузок относительно номинальной величины показывает, что токи двигателей могут превышать допустимые уровни. Во-первых – не всегда может срабатывать их защита (приборы). Второе – отклонения P и Q могут иметь место довольно длительное время, – в течение месяца и более. Третье – эти отклонения, как показывают проведенные исследования, могут периодически повторяться по несколько раз в год.

Известно, что отклонения P и Q отрицательно сказываются на работе ВАЭ. Перегревая обмотку статора, они ускоряют процесс старения изоляции обмоток, при определённых условиях – приводят к отказу, т.е. к снижению эксплуатационной надёжности ВАЭ [89]. В следующей главе будут исследованы характеристики надёжности ВАЭ в функции от эксплуатационных нагрузок и температуры нагревания их обмоток.

Отрицательное влияние реактивной мощности на работу обмоток электродвигателя общеизвестно. При превышении её допустимых пределов происходит нелинейное увеличение тепла в секциях катушек статора. В результате нарушения теплового баланса возрастает температура изоляции, которая превышает допустимые уровни. Ранее было отмечено, что такой режим нагрузки ВАЭ может превышать несколько месяцев, что в результате приводит к пробое изоляции секции, катушки.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ СТАТОРА ВАЭ

4.1 Исследование надёжности ВАЭ в производственных условиях

В соответствии с ГОСТ Р 53480-2009 [6] надёжность ВАЭ будет определяться как свойство, влияющее на его работоспособность. Отказы ВАЭ можно классифицировать по характеру процесса проявления на внезапные и постепенные, по физической природе – на катастрофические и параметрические.

Характерными видами отказов электрических машин вообще могут быть: изменение геометрии коллекторов электрических машин, износ, износ деталей подшипниковых узлов и др. Для ВАЭ к постепенным видам отказов можно отнести износ изоляции обмоток статора. Основными факторами, влияющими на устойчивую работу изоляции, могут быть тепловые нагрузки и вибрация. Как было сказано ранее, если ВАЭ работают в производственных цехах в режиме соответствующей технологической нагрузки, то можно считать, что условия работы ВАЭ соответствуют ТУ. Параметры надёжности для постепенных отказов будут выражаться законом Гаусса. Однако, как показано в предыдущей главе, нагрузка ВАЭ меняется в зависимости от технологической нагрузки. Это приводит при недопустимых перегрузках к ускоренному старению элементов и разрушению ВАЭ.

Внезапный отказ ВАЭ характеризуется скачкообразным изменением параметров под воздействием многих случайных факторов. Разделение отказов на внезапные и постепенные имеет всё-таки условный характер. В данном случае будем иметь в виду частичное или полное разрушение узлов и деталей ВАЭ с нарушением работоспособности объекта [97÷100].

Необходимо определить следующие дополнительные условия, – время работы ВАЭ принимается до первого отказа, – таковы условия эксперимента,

отказы учитываются только внезапные, – при этом они независимые. В процессе экспериментальных исследований под наблюдение принимаются только элементы паза (обмотки) статора ВАЭ. К ним относятся витковая изоляция, изоляция катушки обмотки статора, изоляция корпусная, секция катушки паза. При регистрации отказов фиксировались следующие характеристики: дата отказа, производственный цех, тип электродвигателя, мощность, зав. №, год выпуска, характер повреждений, объём выполненных ремонтных работ, активная и реактивная нагрузка и др.

Всего было под наблюдением 108 ВАЭ, мощностью от 200 до 5700 кВт, задействованных в производственном технологическом процессе. Учитывались только те ВАЭ, у которых имели место отказы изоляции. Все ВАЭ, можно считать, находились в одинаковых производственных условиях. Режимы нагрузок соответствовали ТУ на эксплуатацию, кроме случаев технологических отклонений. Кроме того, профилактическое обслуживание и ремонты выполнялись в строгом соответствии с графиком ППР, принятым для данного предприятия. Условиями эксперимента учитывалась наработка до отказа ВАЭ – наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения отказа. Характеристики ВАЭ и объём ремонтных работ приведены в Приложении А.

Показателем надёжности для узла паза принимается невосстанавливаемый отказ (пробой изоляции обмотки ВАЭ). Основными количественными характеристиками надёжности являются $P(t)$, $Q(t)$, $\lambda(t)$ и $T_{ср}$. $P(t)$ – убывающая, экспоненциальная функция, где $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$. Статистическая оценка отказов изоляции ВАЭ оценивается выражением

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (4.1)$$

где N_0 – начальное количество ВАЭ в процессе экспериментальных исследований, $n(t)$ – количество ВАЭ, отказавших за время t .

Точность оценок определяем с учётом требований допустимой погрешности, принимается её 5%-ный предел.

Согласно [2] ВБР узлов электрических машин подчиняется экспоненциальному закону. Выражение для интенсивности отказов $\lambda(t)$ будет иметь следующую зависимость

$$\lambda(t) = -\frac{P_o(t)}{P(t)}, \quad (4.2)$$

где $P_o(t)$ – частота отказов, $P(t)$ – ВБР.

ВБР в свою очередь связана с $\lambda(t)$ следующим выражением

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right], \quad (4.3)$$

где $\lambda(t)$ – функция плотности распределения отказов.

В производственных условиях интенсивность отказов может колебаться во времени. Мы принимаем условие, что поток отказов является ординарным, подчиняющимся Пуассоновскому потоку, и его плотность распределения также подчиняется закону Гаусса. Тогда принимается условие $\lambda(t)=\text{const}$.

Статистическая оценка средней наработки до первого отказа будет равна

$$T_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (4.4)$$

где t_i – время безотказной работы i -го узла, N_0 – количество испытуемых изделий (в начале эксперимента).

Для определения $T_{cp.}$ требуется контроль всех испытуемых электродвигателей. При этом в этот параметр не входит время простоя ВАЭ для проведения восстановительного ремонта.

Результаты испытаний, обработанные по специально разработанной методике с использованием ранее приведенных формул, сведены в таблицу 4.1. Из приведенных расчётных данных интенсивности отказов, вероятности безотказной работы, наработки на отказ видно, что наибольшую интенсивность отказов имеют случаи пробоя изоляции катушки.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний обмоток статора ВАЭ

| № п/п | Параметры деталей | Размерность | Пробой витковой изоляции | Пробой катушки статора | Пробой изоляции корпуса | Обрыв секции (витка) | Надежность узла ΣT_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 повреждения витковой изоляции и случаи пробоя изоляции на корпус (паз). Для оценки ВБР для каждого из элементов паза расчётным путём были определены их значения по интервалам наработки. Результаты расчёта приведены в таблице 4.2, где P_1 – ВБР витковой изоляции, P_2 – ВБР катушки паза статора, P_3 – ВБР корпусной изоляции статора, P_4 – ВБР меди секции катушки, P_5 – ВБР узла в целом.

Таблица 4.2 – оценка ВБР по интервалам наработки

| № п/п | $t, лет$ | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 5 | 0,870 | 0,840 | 0,870 | 0,855 | 0,546 |
| 2 | 10 | 0,763 | 0,714 | 0,763 | 0,724 | 0,299 |
| 3 | 15 | 0,667 | 0,392 | 0,667 | 0,625 | 0,163 |
| 4 | 20 | 0,588 | 0,497 | 0,588 | 0,526 | 0,089 |
| 5 | 25 | 0,510 | 0,417 | 0,510 | 0,451 | 0,049 |
| 6 | 30 | 0,444 | 0,349 | 0,444 | 0,385 | 0,026 |
| 7 | 35 | 0,390 | 0,294 | 0,390 | 0,327 | 0,015 |

Наибольшую надёжность имеют витковая и корпусная изоляция. Наименьшую ВБР имеет катушка паза статора. Необходимо отметить, что отдельные ВАЭ могут по наработке превышать установленный ресурс и сроки капитального ремонта, превышающие установленные плановые.

Это может быть достигнуто, если условия эксплуатации соответствуют требованиям ТУ, если отклонения нагрузок будут колебаться в пределах допустимых норм, выполнение графика ППР будет соответствовать принятым срокам межремонтного обслуживания и ремонта ВАЭ, квалификация ремонтного персонала позволит обеспечить качественное выполнение ремонтных работ и профилактического обслуживания. Исследование работы ВАЭ даёт основание считать, что внешние факторы, такие как температура окружающего воздуха, его запылённость, влажность, химический состав и др. имеют незначительное влияние на изоляцию.

На рисунке 4.1 приведены графические зависимости ВБР ВАЭ, полученные на основании эксплуатационных испытаний, где показаны характеристики для каждой детали паза в функции от наработки.

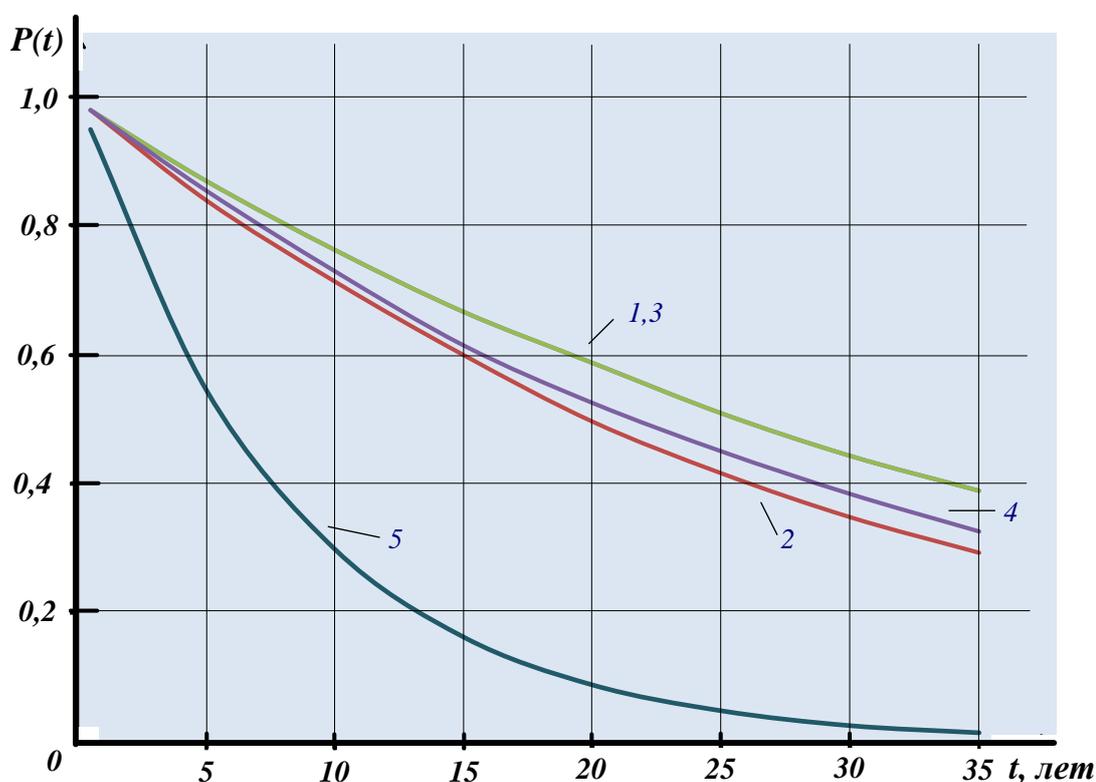


Рисунок 4.1 – ВБР деталей обмотки статора ВАЭ.

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 каждом из этапов существенное влияние на ВБР оказывают интеллектуальный уровень проектировщиков, инженерно-технического персонала заводов-изготовителей и, безусловно, специалистов, обеспечивающих выполнение планово-предупредительного ремонта в эксплуатации.

Предложенная методика расчёта позволяет установить уровни ВБР для различных элементов паза. Это открывает большие возможности для анализа и оценки системы ППР, применяемой на производстве.

В случае необходимости возможно, используя полученные данные, корректировать ресурсные параметры ВАЭ, объёмы и глубину ремонтного обслуживания обмоток, что видно из приведенных графических зависимостей (рисунок 4.1). Наибольшую надёжность имеют витковая и корпусная изоляция, наименьшую – изоляция катушки. Если не учитывать влияние механических факторов на работу изоляции, то можно считать, что надёжность в эксплуатации главным образом зависит от перегрева изоляции.

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

Анализ эксплуатационной надёжности изоляции обмотки показывает следующее. На работу данного узла влияет значительное количество факторов, они могут иметь место в процессе проектирования электродвигателя, на этапе изготовления опытных и серийных образцов, а также в процессе эксплуатации. Будем предполагать, что все они учитываются и в значительной мере известны параметры их влияния.

Вместе с этим необходимо из многообразия элементов статора выделить наиболее «уязвимые», имеющие высокую степень вероятности отказа. Использование структурно-функциональных моделей позволило решить поставленную задачу на более высоком уровне.

4.2 Исследование влияния нагрузки и температуры на надёжность обмотки ВАЭ

Элементные методы оценки надёжности электромеханических систем могут быть улучшены, если в расчётные модели надёжности ВАЭ ввести фактор времени. В процессе работы ВАЭ в производственных условиях λ -характеристика двигателей периодически меняется. Она зависит от загрузки производства в силу влияния различных технологических причин. В процессе работы предприятия имеет место отклонение параметров нагрузки в технологическом процессе, что сказывается на нагрузке электродвигателей. По результатам исследований, приведенных в п. 2.4, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 15$. В реальных условиях эксплуатации наблюдаются отклонения параметров нагрузки, превышающие допустимые для закона $N\{x; m = 55; \sigma = 15\}$ при уровне отклонений -3σ и $+3\sigma$.

Следовательно, это не может не влиять на надёжность деталей и узлов ВАЭ и, в частности, – на элементы паза. Витковая и межвитковая изоляция секций катушек могут работать в режиме перегрева для данного класса изоляции, при этом происходит её ускоренное старение, в результате чего может иметь место деформация стержней (секций) катушек с последующим разрывом изоляции и её пробоем.

Таким образом, качество элементных методов оценок может быть повышено, если в алгоритм расчёта ввести структурно-функциональные зависимости характеристик надёжности элементов системы, влияние режимов нагрузки на надёжность изоляции секций катушек. Безусловно, эти факторы при проектировании учитываются в виде поправочных коэффициентов, к

значениям λ -характеристик, которые берутся из справочников, добавляются величины поправочных коэффициентов $\Delta\lambda$.

Однако это не исключает ошибок и имеет свои недостатки. Такая форма учёта влияния температуры отражает лишь процесс в статике, что является не совсем точной формой поправки, т.к. режим нагрузки в эксплуатации не может изменяться дискретно. Это создает погрешности в расчётах и приводит к удорожанию ВАЭ.

На этапах разработки ТЗ, эскизного проекта и проектирования закладываются технические условия на эксплуатацию электродвигателей. Как показывает практический опыт, не всегда конструктор может «угадать» параметры изменения нагрузок из-за влияния большого количества эксплуатационных факторов. Следовательно, он вынужден в отдельных случаях, из-за ограниченности априорных данных, решать эту задачу на интуитивном уровне. Поэтому он вынужден пользоваться в расчётах показателей надёжности при условии $\lambda_i = \text{const}$.

Вторая важная особенность, которой конструктор, проектирующий машину, не может предусмотреть, заключается в следующем, – поступившие в эксплуатацию ВАЭ работают в промышленности 25 и более лет, технологическое и электрическое оборудование за это время в значительной мере изнашивается и морально устаревает, следовательно, происходит ухудшение электромеханических характеристик машины.

Изменения нагрузки могут быть учтены следующим образом. Расчётное номинальное значение λ может функционально зависеть от изменения нагрузки ВАЭ, принимая установленное значение после того, как нагрузка примет номинальное значение. Тогда в данной модели становится возможным учесть режимы старения изоляции.

Вместе с тем, как показывает анализ, поправочные коэффициенты отражают лишь «статическую» часть процессов, происходящих в системе. Фактически при изменении режимов работы они не отражают полно процесс старения деталей в зависимости от влияния изменения нагрузок ВАЭ в эксплуатации.

Таким образом, учитываются лишь постоянные режимы нагрузок машины, что не всегда является оправданным и обоснованным, о чём будет сказано ниже.

В действительности, ВАЭ, работающие в технологическом цикле, связаны с режимом производственного процесса и имеют широкий диапазон нагрузок. Безусловно, это сказывается на работе деталей паза статора и при неблагоприятных условиях вызывает их ускоренное старение. К примеру, если известен закон изменения нагрузки во времени, то всегда можно построить зависимость $\lambda(t, I)$, где I – ток нагрузки. Это позволит решить основное уравнение $P(t) = \exp\{\lambda, I\}$. Допускается, что зависимость может быть выражена полиномом.

Можно представить уравнение в виде полинома, когда имеет место сочетание: λ_0 – номинальное значение интенсивности отказов и λ_n – при воздействии колебаний нагрузок. Тогда интенсивность отказов будет равна

$$\lambda(t, I) = \lambda_0 \left(1 + \sum_{i=1}^m d_i t_i \right), \quad (4.5)$$

где $\lambda_0 = const$ – базовое значение интенсивности отказов, $\sum_{i=1}^m d_i t_i$ – функциональная составляющая интенсивности отказов.

Для функции вероятности безотказной работы элемента от обоих факторов после интегрирования будем иметь следующую зависимость:

$$\exp \left\{ -\lambda_0 t \left(1 + \sum_{i=1}^m d_i \frac{t_i}{i+1} \right) \right\}. \quad (4.6)$$

Выражение под знаком \sum характеризует влияние функциональных факторов на интенсивность отказов λ_n .

Ранее было отмечено, что нагрузка ВАЭ представляет собой случайный процесс. Поэтому перегруз ВАЭ в процессе эксплуатации также можно считать случайным событием, исходя из ранее принятого условия, что режим нагрузки может быть принят соответствующим законом Гаусса. Тогда отклонение

нагрузки в сторону увеличения можно выразить интервалом нагрузки α и β , где α_i и β_i – нижняя и верхняя границы интервала. Вероятность перегрузки равна

$$P(\alpha_i < x < \beta_i) = \Phi^*\left(\frac{\beta_i - m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{\alpha_i - m}{\sigma}\right), \quad (4.7)$$

где Φ^* – стандартная функция распределения (Гаусса), m – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение.

Проведённые расчёты по интервалам нагрузки дали следующие характеристики вероятности нагрузки:

$$P_5(m < x \leq m+200 \text{ кВт}) = 0,1199; \quad P_6(m+200 \text{ кВт} < x < m+400 \text{ кВт}) = 0,0338;$$

$$P_7(m+400 \text{ кВт} < x < m+600 \text{ кВт}) = 0,0085; \quad P_8(m+600 \text{ кВт} < x < m+800 \text{ кВт}) = 0,0011;$$

$$P_9(m+800 \text{ кВт} < x < m+1000 \text{ кВт}) = 0,00005.$$

Отклонение величины нагрузки в сторону её увеличения в процессе эксплуатации составляет 0,1638. Из приведенных данных видно, что вероятность перегрузки ВАЭ в эксплуатации незначительна. Анализ вероятности пребывания изоляции ВАЭ в режиме перегрева показывает, что в эксплуатации на каждый двигатель приходится 2758 час работы в режиме перегрева.

Определим время пребывания ВАЭ в режиме перегрузки для витковой и корпусной изоляции. Оно равно 3025 часов до первого отказа. Время нахождения ВАЭ в режиме перегрева изоляции обмотки статора равно 2397 часов. Для секции время нахождения в режиме перегрузки будет равно 2562 часа.

Необходимо отметить, что перегрев изоляции происходит по двум параметрам. Первый характеризуется для каждой детали временем нахождения в режиме перегрузки. Второй – величиной перегрузки. Она может принимать различные значения, от величины математического ожидания до ± 1000 кВт. Как показывают данные таблицы 3.6, вероятность нагрузки с ростом её значения снижается.

Если в интервале нагрузок $4000 \div 4200$ кВт вероятность равна 0,095, то в интервале $4800 \div 5000$ кВт она равна 0,005. С дальнейшим ростом нагрузки вероятность её асимптотически стремится к 0. Вместе с тем эти данные для

оценки надёжности изоляции статора ВАЭ являются недостаточными, т.к. изоляция может находиться в эксплуатации в следующих состояниях, – при относительно небольших значениях перегрева ВАЭ может работать длительное время (в течение нескольких тысяч часов), однако при больших перегрузках тепловой пробой происходит значительно раньше, за сравнительно короткий промежуток времени.

Из сказанного можно сделать заключение, что при оценке зависимости надёжности изоляции от величины перегрева необходимо учитывать температурные режимы изоляции по двум параметрам – тока нагрузки (мощности) и времени нахождения изоляции в режиме перегрева. Эти функциональные характеристики дают возможность адекватно оценить надёжность изоляции обмотки статора. В такой постановке задачи решение будет успешным, если обработанные данные экспериментальных исследований, изложенных в предыдущих главах, использовать в качестве базовых параметров.

Для этого необходимо вероятностно-статистические характеристики нагрузок транслировать посредством полученных моделей в температурные режимы в условиях перегрева ВАЭ. Это даст возможность оценить надёжность деталей изоляции и установить их ресурс.

В предыдущей главе (рисунки 3.4, 3.5) были приведены кривые нагревания и остывания $\Delta\vartheta = f(t)$, где было показано состояние теплового баланса при номинальной нагрузке – $\Delta\vartheta_{\infty} = \Delta\vartheta_{уст.}$, при котором перегрев изоляции машины не превышает предельно-допустимого значения для класса изоляции B . В случае превышения нагрузки на $8\div 10\%$ от номинального значения происходит увеличение температуры, которая превышает допустимое значение для данного класса изоляции. Тепловой пробой изоляции (отказ) может произойти в двух случаях. Первый – когда перегрузка ВАЭ достигает 600 кВт и более, – в этом случае отказ может произойти в течение короткого времени пребывания в этом режиме. Другой случай отказа может произойти в

интервале перегрузки 200÷400 кВт, но в течение длительного времени эксплуатации в режиме перегрева.

Таким образом, можно отметить, что на надёжность изоляции существенное влияние оказывает дисперсия нагрузок ВАЭ, среднеквадратичное отклонение которой равно 295 кВт. Она зависит от загрузки технологического оборудования. Повышение тока сверх допустимого значения не сразу приводит к аварийному состоянию машины, – требуется некоторое время, прежде чем статор нагреется до предельной температуры. Поэтому нет необходимости в том, чтобы защита реагировала на каждое превышение тока. Она должна отключить машину только в тех случаях, когда возникает опасность быстрого износа изоляции. С точки зрения нагрева изоляции большое значение имеют, как ранее было отмечено, величина и длительность протекания токов, превышающих номинальное значение. Эти параметры в основном зависят от характера протекания технологического процесса.

Технологические перегрузки электродвигателя, вызванные периодическими увеличениями момента на валу, постоянно изменяются. Соответственно, мощность нагрузки электродвигателя также изменяется. Трудно заметить сколько-нибудь длительный промежуток времени, в течение которого ток оставался бы неизменным по величине. На валу двигателя периодически возникают кратковременные механические перегрузки, создающие кратковременные броски тока.

Такой вид перегрузок обычно не вызывает перегрева изоляции из-за большой массы, имеющей сравнительно большую тепловую ёмкость, т.е. защита не должна реагировать на эти перегрузки. Этот вид нагрузки не представляет большой опасности.

Вместе с тем при большой длительности и неоднократных повторях может создаваться аварийный нагрев. В других случаях при небольших перегрузках, но в длительном режиме также может происходить тепловой износ изоляции. В нашем случае отключаются аварийные перегрузки ВАЭ, которые являются следствием воздействия внешних факторов.

В электрических машинах в процессе эксплуатации имеют место нестационарные тепловые процессы. Они сопровождают режимы пуска, отключения, торможения, изменения нагрузки и частоты вращения машин. Процессы нестационарного нагрева имеют место при токовых перегрузках. Примем необходимые дополнительные условия для проведения дальнейших исследований [101].

Ранее принято условие, что общий срок службы ВАЭ по сравнению со временем пусковых режимов несопоставимо велик, т.е. $t_n \ll T_p$. Поэтому на этом основании будем считать их влияние на температуру обмотки незначительным. Это значит, что на нагрев влияют значения тока нагрузки и напряжения. Если принять к сведению, что отклонения напряжения в сети ограничены требованиями ГОСТ 32144–2013 [103] в пределах 10%, тогда основным фактором является ток нагрузки, который коррелирован с мощностью (активной) нагрузки.

Важной особенностью тепловых режимов является их инерционность, проявляющаяся в значительном отставании изменений температуры обмотки статора от электромеханических переходных процессов.

Графические зависимости, приведенные на рисунке 4.2, характеризуют уровень влияния температуры на ВБР катушки статора в функции срока службы.

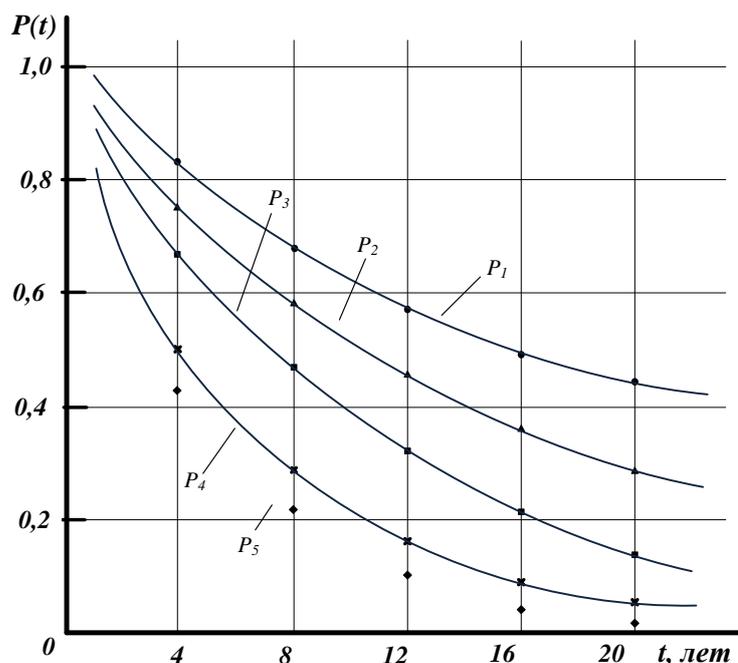


Рисунок 4.2 – Надёжность изоляции паза при различных температурах обмотки статора.

Кривая P_1 характеризует надёжность катушки при температуре $92,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_2 – при температуре $96,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_3 – при температуре $101,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_4 – $105,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_5 – $110,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные данные позволяют сделать следующий вывод. На ранней стадии проектирования можно получить адекватные оценки вероятности безотказной работы электродвигателя, если известны законы или функции плотности распределения элементов системы. В практических условиях при проектировании электродвигателя принимают за основу среднюю температуру статора в зоне нахождения катушек без учёта их структуры и надёжности.

Методами расчёта даётся лишь оценка превышения температуры при различных величинах нагрузки. Предложенная методика дополняет структуру расчёта тем, что определяется интенсивность отказов и ВБР для каждого случая превышения нагрузок электродвигателей. При этом появляется возможность более детальной оценки указанных характеристик для секции катушки паза, изоляции корпуса, катушки, витка.

Данная методика оценки надёжности элементов паза статора позволяет ещё на этапе проектирования оценить состояние изоляции при различных нагрузках и температурах. Тем самым может быть исключена возможность прохождения ошибок проектирования в производство и эксплуатацию ВАЭ.

4.3 Оценка надёжности ВАЭ с использованием структурно-функциональных моделей

Качество элементных методов можно улучшить, если в расчётную модель зависимостей характеристик надёжности ввести параметр частоты отказов. Учитывая, что изоляция катушек имеет различные функциональные свойства, т.е. они могут быть неоднородными, можно считать, что $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$. Вместе с тем имеет место случай, когда можно выделить группы элементов с одинаковыми функциональными свойствами, которые будем считать

однородными. В этом случае $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots \lambda_k$. Тогда для частоты отказов элементов паза в частных производных будем иметь выражение

$$F(t) = \sum_{in}^n \frac{dQ}{dq_i} f_i(t), \quad (4.8)$$

где n – число элементов в пазе; i – порядковый номер элемента; $f_i(t)$ – частота отказов элемента; Q – вероятность отказа узла; q_i – вероятность отказа блока, состоящего из однородных элементов.

Используем формулу для дальнейшего анализа структуры системы, при этом будем иметь в виду ранее принятое условие. Детали паза не однородные, их можно объединить в четыре группы. Первая состоит из витковой изоляции секций катушек, вторая – изоляция катушки, третья – корпусная изоляция обмотки, четвертая – медь. Внутри группы они обладают свойством однородности.

Тогда будем иметь следующую систему уравнений частоты отказов в частных производных для четырех групп элементов паза:

$$F(t) = \begin{cases} \frac{dQ}{dq_1} = 1 - Q_2 - Q_3 + Q_2 Q_3 - Q_3 Q_4 + Q_2 Q_3 Q_4 + Q_3^2 Q_4 - Q_2 Q_3^2 Q_4 \\ \frac{dQ}{dq_2} = 1 - Q_1 - Q_3 + Q_1 Q_3 - Q_3 Q_4 - Q_1 Q_3 Q_4 + Q_3^2 Q_4 - Q_1 Q_3^2 Q_4 \\ \frac{dQ}{dq_3} = 1 - Q_1 - Q_2 + Q_4 + Q_1 Q_2 - Q_2 Q_4 - Q_1 Q_4 + Q_1 Q_2 Q_4 - 2Q_3 Q_4 \\ + 2Q_2 Q_3 Q_4 + 2Q_1 Q_3 Q_4 - 2Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 \\ \frac{dQ}{dq_4} = Q_3 - Q_2 Q_3 - Q_1 Q_3 + Q_1 Q_2 Q_3 - Q_3^2 + Q_2 Q_3^2 + Q_1 Q_3^2 - Q_1 Q_2 Q_3^2. \end{cases} \quad (4.9)$$

Решение данных уравнений даёт возможность оценить характеристику частоты отказов системы (паза). При этом должно быть выполнено важное условие, – элементы имеют свойство однородности внутри каждой группы ($q_1 \dots q_4$). Между группами могут быть элементы неоднородные.

После преобразования правой части дифференциальных уравнений и приведения подобных получим уравнение частоты отказов

$$\begin{aligned}
 F(t) = & 3 - 2Q_1 - 2Q_2 - Q_3 + Q_4 + Q_1Q_2 - Q_1Q_4 - Q_2Q_4 - 4Q_3Q_4 + 2Q_3^2Q_4 + Q_2Q_3^2 \\
 & + Q_1Q_3^2 - Q_3Q_4 - Q_3^2 + 2Q_2Q_3Q_4 + Q_1Q_3Q_4 + Q_1Q_2Q_4 + Q_1Q_2Q_3 - Q_1Q_2Q_3^2 + 3Q_2Q_3Q_4 \\
 & - Q_2Q_3^2Q_4 - 2Q_1Q_2Q_3Q_4. \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Выражение частоты отказов позволяет оценить параметры узла и сравнить их с априорными данными предыдущих исследований. Если подставим в данное уравнение групповые характеристики вероятности отказа $Q_1 \dots Q_4$, то можно определить частоту отказов для паза статора ВАЭ при $Q_1 = 0,55$, $Q_2 = 0,20$, $Q_3 = 0,15$, $Q_4 = 0,10$. Подставив эти значения в уравнение и произведя расчёты, получим: частота отказов узла $F(t) = 1,45$. Приведенные аналитические зависимости дают возможность на ранней стадии проектирования, когда определены и рассчитаны параметры конструкции узла, определить его частоту отказов. Если значение будет ниже заданного значения, т.е. $F(t) < F_3(t)$, тогда данный вариант конструкции паза принимается и на этом анализ надёжности для данной системы прекращается. В противном случае расчёт повторяется методом итерации до тех пор, пока не будет выполнено заданное условие.

Предложенная методика группового анализа однородных, неоднородных или смешанных групп элементов, которые имеют место в электромеханических системах, является логически обоснованной. Она даёт возможность рассчитать частоту отказов на стадии проектирования, когда без больших затрат времени можно выявить наименее надёжные конструкции узлов, произвести корректировку параметров надёжности деталей, обосновать вероятностно-статистические характеристики элементов системы с учётом параметров надёжности.

Приведенные формулы могут быть использованы для расчёта конструкций с произвольной конфигурацией узла и различными

характеристиками деталей. Известно, что разработанные структурные параметры, характеризующие специфические характеристики проектируемого узла, не дают основания полагать, какова ожидаемая надёжность системы, представляемой конкретной структурой. Именно поэтому предложенная методика решает эту задачу и даёт возможность получить на стадии проектирования надёжность структур произвольной конфигурации узла, оценить её параметры и привести в соответствие надёжность элементов с надёжностью узла, заданной в ТЗ. При этом параметры и влияние внешней среды в эксплуатации принимаются постоянными, заданными техническими условиями на эксплуатацию.

Известно, что в процессе эксплуатации надёжность системы в силу воздействия на ВАЭ различных факторов λ_i может изменяться в зависимости от времени работы, что приводит к её отклонениям относительно установленных расчётных значений. Величины интенсивности отказов и параметра потока отказов могут принимать значения в основном в зависимости от условий эксплуатации. Эксплуатационная надёжность узла будет зависеть от закона распределения отказов. Если плотность функции отказов будет иметь параметры $N\{n; m_x; \sigma_x\}$, тогда отказы системы будут соответствовать закону Гаусса, а интенсивность при этом $e^{-\lambda t}$, то поток отказов будет соответствовать экспоненциальному закону.

Анализ экспериментальных данных, полученных на основании проведенных исследований на ПАО "Нижнекамскнефтехим", позволяет принять для частоты потока отказов экспоненциальный закон. Определим функции вероятности безотказной работы узла паза статора с учётом четырёх неоднородных групп, тогда

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t}; P_2 = e^{-\lambda_2 t}; P_3 = e^{-\lambda_3 t}; P_4 = e^{-\lambda_4 t}. \quad (4.11)$$

Для ВАЭ нефтехимического производства мощностью от 200 до 5700 кВт число отказов составляет 0,1 [1/год]. На долю данного узла приходится 80% от

общего числа отказов двигателя, тогда интенсивность отказов будет равна – 0,08 [1/год]. При этом интенсивность отказов для витковой изоляции будет равна 0,044 [1/год], изоляции катушки статора – 0,016 [1/год], корпусной изоляции – 0,012 [1/год], витка меди – 0,008 [1/год].

Отказы, происходящие в эксплуатации, во времени можно считать как случайные события. На основе ранее принятых допущений, подставив в выражение надёжности элементов узла, получим следующее уравнение

$$P = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_4 t}, \quad (4.12)$$

где $\lambda_1 \dots \lambda_4$ – интенсивность отказа четырёх групп элементов паза.

Подставив в уравнение соответствующие величины интенсивностей отказов, можно получить характеристику надёжности узла. В таблицы 4.3÷4.5 сведены характеристики вероятности безотказной работы для витковой изоляции, изоляции катушки, изоляции паза (корпуса) и секции катушки в функции от времени работы электродвигателя.

Таблица 4.3 – Характеристики ВБР элементов паза в функции от времени

| <i>t, лет</i> | $\lambda_1=0,044$ | $\lambda_2=0,016$ | $\lambda_3=0,012$ | $\lambda_4=0,008$ | $\lambda_c=0,1$ |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 2,5 | 0,11 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,25 |
| 5,0 | 0,22 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,5 |
| 7,5 | 0,33 | 0,12 | 0,09 | 0,06 | 0,75 |
| 10,0 | 0,44 | 0,16 | 0,12 | 0,08 | 0,80 |

Таблица 4.4 – Характеристики ВБР элементов паза в функции от времени

| <i>t, лет</i> | $e^{\lambda t}$ | $e^{\lambda_2 t}$ | $e^{\lambda_3 t}$ | $e^{\lambda_4 t}$ | $e^{\lambda t}$ |
|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 2,5 | 1,12 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,28 |
| 5,0 | 1,25 | 1,08 | 1,06 | 1,04 | 1,65 |
| 7,5 | 1,39 | 1,13 | 1,09 | 1,06 | 2,12 |
| 10,0 | 1,55 | 1,17 | 1,13 | 1,08 | 2,23 |

Таблица 4.5 – Характеристики ВБР элементов паза в функции от времени

| $t, лет$ | $P_1(t)$ | $P_2(t)$ | $P_3(t)$ | $P_4(t)$ | $P_c(t)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,5 | 0,89 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,78 |
| 5,0 | 0,80 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,61 |
| 7,5 | 0,72 | 0,89 | 0,92 | 0,94 | 0,47 |
| 10,0 | 0,65 | 0,86 | 0,85 | 0,93 | 0,45 |

Срок службы изоляции равен 10 годам, после истечения указанного срока производится капитальный ремонт обмотки машины. Из приведенных данных видно, что к моменту капитального ремонта остаточный ресурс составляет – 0,45. Для наглядности показаны графические зависимости надёжности в целом для паза, а также для составляющих его элементов (рисунок 4.3). 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.

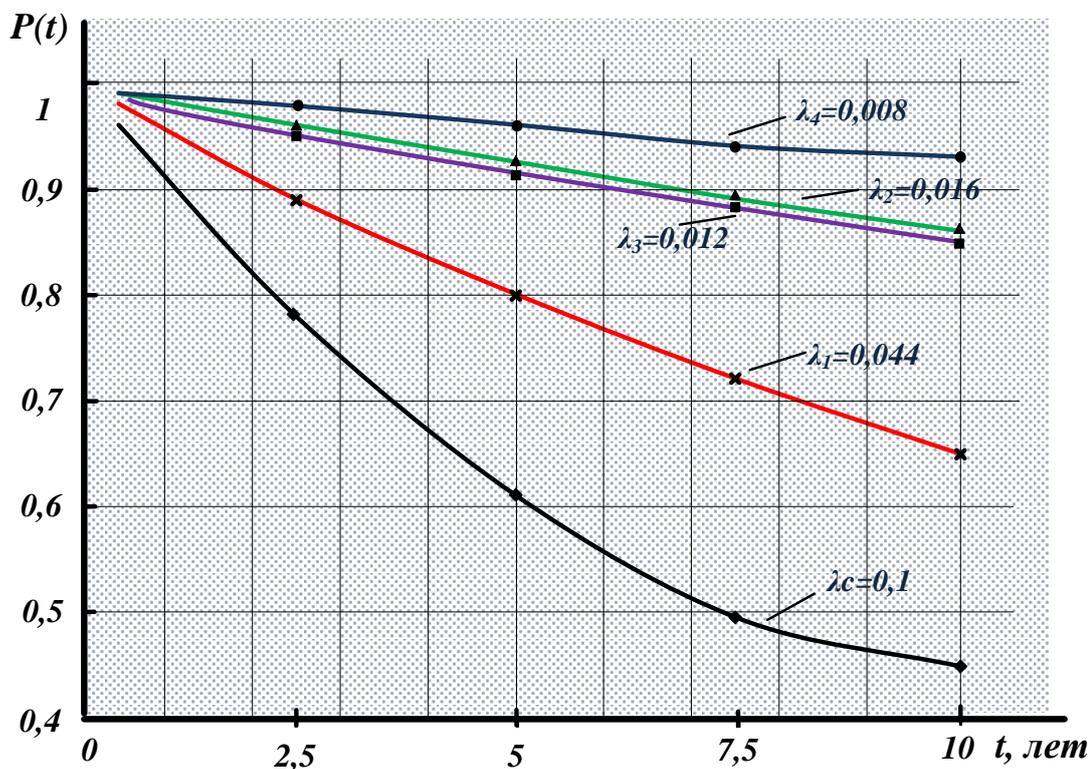


Рис. 4.3 – Характеристики надёжности элементов паза статора ВАЭ

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.

Полученные зависимости показывают низкую надёжность элементов паза. Например, к моменту наработки 5 лет витковая изоляция имеет ВБР, равную 0,80, изоляция катушки – 0,92, корпусная изоляция – 0,93, секция катушки – 0,97. Можно считать, что приведенные цифры вероятности отказа характеризуют отказы ВАЭ в период между плановыми ремонтами. Надёжность электромеханических систем зависит от разнообразных факторов. Всё множество неблагоприятных факторов, влияющих на ВАЭ, можно классифицировать по области их формирования.

Факторы, влияющие на надёжность ВАЭ, можно выделить в следующие группы – конструктивные, производственно-технологические и эксплуатационные.

К конструктивным факторам относятся:

- выбор структурно-функциональных параметров;
- определение материалов и комплектующих элементов;
- выбор режимов нагрузок и условий эксплуатации элементов в системе;
- назначение допусков на элементы конструкции и технологические характеристики.

Качественное выполнение указанных требований минимизирует прохождение дефектных элементов в эксплуатацию, тем самым закладывается надёжность узла.

К производственно-технологическим факторам производства, изготовления, сборки деталей, монтажа, наладки, испытаний относятся следующие:

- входной контроль качества материалов и элементов, получаемых от предприятий-поставщиков;
- организация высокотехнологического изготовления электромеханического оборудования ВАЭ;
- контроль качества продукции на всех этапах технологического процесса;
- обеспечение качества и контроль сборки и наладки ВАЭ.

Внешние факторы, как показывают исследования, практически на работу ВАЭ не влияют по следующим причинам, т.к. ВАЭ работают в цехах, где в течение года температура, влажность, запылённость практически не изменяются; механические воздействия исключены, кроме того, ВАЭ имеют закрытое исполнение. На основании проведённого анализа можно сделать следующее заключение, – надёжность ВАЭ в значительной мере зависит от качества проектирования, которое снижает затраты на последующих этапах производственно-технологического и эксплуатационного процессов.

Проведённые в предыдущих разделах исследования дали возможность разработать элементные методы расчёта, которые на ранней стадии проектирования дают возможность оценить надёжность системы. При этом ожидаемая надёжность паза статора определяется при условии минимума исходных данных и при отсутствии функциональных связей между элементами системы.

Вторым уровнем рекомендуемых методов является исследование надёжности системы с учётом структурно-функциональных связей, где параметрами, определяющими качество структурной схемы, являются межэлементные связи и элементная база системы с учётом их разделения на однородные и неоднородные. Таким образом, на последующих этапах

проектирования можно рекомендовать методы расчёта надёжности электрических машин.

Элементные методы расчёта при введении в методику расчёта функциональных связей в виде зависимостей основных характеристик надёжности деталей узла от режимов их нагрузок и рациональных параметров структуры системы дают возможность учесть влияние физических факторов на надёжность системы. Безусловно, для каждого этапа проектирования должен иметь место алгоритм расчёта. Таким образом, шаг за шагом в проектировании необходимо использовать более детальные методы расчёта, где на последнем этапе должно учитываться влияние тока нагрузки на температуру нагрева изоляции элементов катушки паза.

Определение условий старения изоляции в зависимости от перегрева обмотки статора и оценка её эксплуатационной надёжности является важной научной задачей. Её решение позволит на этапе проектирования, в отличие от существующих методов, определить ресурс изоляции и прогнозировать отказы ВАЭ в эксплуатации. Если в зависимостях, приведенных на рисунке 4.3, учесть дополнительные потери надёжности от влияния перегрева изоляции паза, тогда оценки параметров надёжности будут несмещёнными.

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 $92,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0,048$ 1/год, при температуре $96,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0,07$ 1/год, при $101,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0,103$ 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 – $\lambda=0,035$ 1/год, наименьшую интенсивность имеют повреждения витковой изоляции и случаи пробоя изоляции на корпус (паз) – $\lambda=0,027$ 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 (акты внедрения прилагаются).

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметшина, М.В. Прогнозирование и обеспечение надёжности асинхронных двигателей с учётом их старения / М.В. Ахметшина, В.В. Прусс // Вісник ЕДУ. – 2010. – № 4. – С.163-166.
2. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
3. Петриков, Л.В. Асинхронные электродвигатели. Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация: Справочник / Л.В. Петриков, Г.Н. Корниченко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
4. Родькин, Д.И. Системы динамического нагружения и диагностика электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д.И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
5. Теория надёжности в области радиоэлектроники : Сборник рекомендуемых терминов. Вып.60. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 51 с.
6. ГОСТ Р 53480–2009 Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 30 с.
7. Гнеденко, Б.В., Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 521 с.
8. Базовский, И. Надёжность, теория и практика / И. Базовский. – М.: Мир, 1965. – 373 с.
9. Барлоу, Р.М. Статистическая теория надёжности и испытания на безотказность / Р.М. Барлоу. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
10. Герцбах, И.Б., Модели отказов / И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский. – М.: Советское радио, 1966. – 166 с.
11. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 446 с.
12. Сотсков, Б.С. Основы теории и расчета надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б.С. Сотсков. – М.: Высшая школа, 1970. – 271 с.

13. Шишонок, Н.А. Основы теории надёжности и эксплуатации радиоэлектронной техники / Н.А. Шишонок, В.Ф. Репкин, Л.Л. Барвинский. – М.: Советское радио, 1964. – 551 с.
14. Вентцель, Е.С. Задачи и уравнения по теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Физматгиз, 1962. – 554 с.
15. Сандлер, Дж. Техника надёжности систем / Дж. Сандлер. – М.: Наука, 1966. – 300 с.
16. Дружинин, Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – 4-е издание, испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
17. Исаев, И.П. Ускоренные испытания и прогнозирование надёжности электрооборудования локомотивов / И.П. Исаев, П.П. Матвеевичев, Л.Г. Козлов. – М.: Транспорт, 1984. – 245 с.
18. Рипс, Я.А. Надёжность электрических аппаратов, электропривода, высоковольтных изоляторов, аккумуляторов и керамических материалов / Я.А. Рипс, Н.А. Тищенко, В.И. Павленко. – М., Информстандартэлектро, 1968. – С. 15–20.
19. Черкесов, Г.Н. Основы теории надёжности автоматизированных систем управления / Г.Н. Черкесов. – Л.: ЛПИ, 1975. – 219 с.
20. Проников, А.С. Содержание и основные направления науки о надёжности и долговечности машин / А.С. Проников // Надёжность и долговечность машин. – 1972. – № 3. – С. 23-62.
21. Калошкин, А.М. Исследование надёжности тяговых электродвигателей постоянного тока большегрузных электроавтомобилей: дис. канд. техн. наук / А.М. Калошкин. М., 1982. – 220 с.
22. Серенсен, С.В. Прочность элементов конструкций в статистическом аспекте и оценка их эксплуатационной надёжности / С.В. Серенсен // В сб. «Надёжность и долговечность машин и оборудования». – М.: Стандарты, 1972. – 316 с.

23. Рябинин, И.А. Основы теории и расчёта надёжности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.
24. Рябинин, И.А. Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
25. Рябинин, И.А. Надёжность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования / И.А. Рябинин, Ю.Н. Киреев. – Л.: Судостроение, 1974. – 264 с.
26. Барлоу, Р. Статистическая теория надёжности и испытания на безопасность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 326 с.
27. Микроэлектродвигатели для систем автоматики (технический справочник) / Под ред. Э.А. Лодочникова, Ф.М. Юферова. – М.: Энергия, 1969. – 272 с.
28. Ускоренные испытания изделий машиностроения на надёжность. Выпуск 2 / Под ред. В. Р. Верченко. – М.: Стандарты, 1969. – 84 с.
29. Жерве, Г.К. Промышленные испытания электрических машин / Г.К. Жерве – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
30. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
31. Кугель, Р.В. Методика выбора качества изделий для ресурсных испытаний / Р.В. Кугель, Ю.Н. Благоваценский. – М.: НАТИ, 1970. – 21 с.
32. Гивартовская, Н.А. Закон распределения времени износных отказов электрических машин / Н.А. Гивартовская, А.С. Иванов, И.А. Кроль // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 1970. – Том 33. – 190 с.
33. Герцбах, И.Б. Модели профилактики / И.Б. Герцбах. – М.: Советское радио, 1969. – 214 с.
34. Дружинин, Г.В. Надёжность устройств автоматики / Г.В. Дружинин. – Л.: Энергия, 1964. – 320 с.
35. Хевиленд, Р. Инженерная надёжность и расчёт на долговечность / Р. Хевиленд. – М.: Энергия, 1966. – 232 с.

36. Серенсен, С.В. О прочности деталей в связи с вероятностным представлением / С.В. Серенсен, Е.Г. Буглов // Вестник машиностроения. – 1960. – № 11. – С. 2–14.

37. Гаккель, Е.Я. Электрические машины и электрооборудование тепловозов. Учебник для вузов / Е.Я. Гаккель, К.И. Рудая, И.Ф. Пушкарёв, А.В. Лапин, В.В. Стрекопытов, М.А. Никулин; под ред. Е.Я. Гаккель. – М.: Транспорт, 1981. – 256 с.

38. Осичев, В.П. Создание высоконадёжного тягового генератора постоянного тока предельной мощности тепловоза 6000 л.с.: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Осичев Василий Петрович. – Харьков, 1977. – 32 с.

39. Стрельбицкий, Э.К. Исследования надёжности и качества электрических машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Стрельбицкий Эдуард Карлович. – Томск, 1967. – 44 с.

40. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 204 с.

41. Гольдберг, О.Д. Оценка надёжности штампованно-сварных обмоток торцевых асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, А.В. Бобков, В.Е. Доценко // Электричество. – 1981. – № 5. – С. 64–66.

42. Гандель, Ю.В. Математические модели для оценки вероятности совпадения дефектов в изоляции обмоток электрических машин / Ю.В. Гандель, О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский // Электротехника. – 1976. – № 12. – С. 35–37.

43. Фукс, Г.И. Поверхностные явления и надёжность узлов трения механизмов приборов / Г.И. Фукс, З.А. Кутейникова // Надёжность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1984. – 180 с.

44. Серенсен, С.В. Вероятностные методы расчёта на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев // Сб. Механическая усталость в статистическом аспекте. – М. : Стандарты, 1968. – С.12–18.

45. Рыженская, Б.М. Методы оценки надёжности электромашинных преобразователей средней мощности / Б.М. Рыженская // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 1978. Том 33. – С. 109–116.
46. Ожоган, В.А. Исследование и оценка эксплуатационной надёжности двигателей электробуров: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ожоган Владимир Антонович. – М., 1980. – 28 с.
47. Костырко, В.И. Математическая модель обмоток двигателей электробуров при неравномерном старении изоляции / В.И. Костырко, С.Г. Блантер, В.А. Ожоган // Известия ВУЗов СССР. Электромеханика. – 1979. – № 2. – С. 142–146.
48. Казановский, Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий / Д.М. Казановский, В.М. Тареев. – Л.: Энергия, 1980. – 213 с.
49. Гордеев, И.П. К вопросу возникновения перенапряжений в силовой цепи тепловозов с двигателями постоянного тока / И.П. Гордеев // Труды МИИТ. – 1978. Вып. 620. – С. 87–93.
50. Лившиц, П.С. Количественная оценка скорости изнашивания щёток электрических машин постоянного тока / П.С. Лившиц, А.А. Еремин // Электротехника. – 1982. – № 4. – С. 19–22.
51. Лившиц, П.С. Изменение износных и коммутационных свойств электрощёток / П.С. Лившиц, С.П. Калиниченко, И.Ф. Ковалёв, И.И. Бодров // Электротехника. – 1972. – № 9. С. – 34–36.
52. Гроссман, М.И. О закономерностях износа щёток электрических машин / М.И. Гроссман, А.Б. Гутерман // Электротехника. – 1973. – № 2. – С.50–52.
53. Duane, I.T. Reliability analysis for aircraft generators / I.T. Duane, H.I. Yeager // Applications and Industry. – 1960. – № 1. P. 426–434.
54. Воробьёв, А.А. Аналогии и различия при температурном, механическом, термическом и электрическом разрушениях твёрдых диэлектриков / А.А. Воробьёв // Сб. Пробой диэлектриков и полупроводников. – М.: Энергия, 1964. – 48 с.

55. Журков, С.Н. Связь между механической прочностью и термической деструкцией полимеров / С.Н. Журков, С.А. Аббасов // Высокомолекулярные соединения. – М.: Наука, 1962. – № 11. – 24 с.
56. Дмитриевский, В.С. Вывод уравнения надёжности электрической изоляции / В.С. Дмитриевский // Электротехника. – 1973. – № 1. – С. 56–58.
57. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 214 с.
58. Хазов, Б.Ф. Справочник по расчёту надёжности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
59. Balbir S. Dhillon. Reliability engineering in systems design and operation / Dhillon, B.S. – New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1982. – 317 p.
60. Webster, L.R. Optimum system reliability and cost effectiveness / L.R. Webster // Annual symposium on reliability. – 1967. – P.489–500.
61. Идиятуллин, Р.Г. Надёжность тяговых электрических машин / Р.Г. Идиятуллин. – Ташкент: Мехнат, 1987. – 152 с.
62. Ермолин, Н.П. Надёжность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
63. Галушко, А.И. Надёжность изоляции электрических машин / А.И. Галушко, И.С. Максимова, Р.Г. Оснач, П.М. Хазановский. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
64. Мантров, М.И. Расчёт изоляции электрических машин / М.И. Мантров. – М.: Изд-во МЭИ, 1964. – 111 с.
65. Острейковский, В.А. Теория надёжности / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 458 с.
66. ГОСТ 27.003–90 Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
67. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Том 1 / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 445 с.

68. Идиятуллин, Р.Г. Исследование эксплуатационной надёжности изоляции электрических машин / Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев, С.В. Колесников, А.М. Вдовин // Седьмой аспирантско-магистерский научный семинар. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2004. – С. 137–138.

69. Идиятуллин, Р.Г. Повышение эксплуатационной надёжности тяговых электродвигателей с целью энергосбережения / Р.Г. Идиятуллин, В.Н. Водолазов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Четвёртая Российская науч.-техн. конф. – Ульяновск: УГТУ, 2003. – Т. 1. – С. 26–28.

70. Идиятуллин, Р.Г. 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.

71. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

72. Хуснутдинов, А.Н. 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.

73. Идиятуллин, Р.Г. 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. 163–164.

74. Идиятуллин, Р.Г. 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.: Молодой учёный, 2011. – С. 51–54.

75. Королюк, В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1985. – 640 с.
76. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
77. Идиятуллин, Р.Г. Повышение эффективности системы электроснабжения энергонасыщенного производства / Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. – 226 с.
78. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 18 с.
79. Ящура, А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник / А.И. Ящура. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013. – 504 с.
80. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
81. Идиятуллин, Р.Г. Исследование энергетических характеристик электроприводов энергонасыщенного производства / Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов А.В, А.Н. Хуснутдинов // Электроприводы переменного тока: Четырнадцатая междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – С. 177–178.
82. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1984. – 490 с.
83. Идиятуллин, Р.Г. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения / Р.Г. Идиятуллин. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2009. – 144 с.
84. Железко, Ю.С. Потери электрической энергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2009. – 100 с.

85. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. В 2 томах. Пер. с англ. / В. Феллер. – М. : Мир, 1984. – 528 с.
86. Шуренков, В.М. Эргодические теоремы и смежные вопросы теории случайных процессов / В.М. Шуренков. – Киев: Наукова думка, 1981. – 118 с.
87. Боровков, А.А. Математическая статистика. Оценка параметров, проверка гипотез / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
88. Железко, Ю.С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев. О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.
89. Кузнецов, Н.Л. Надёжность электрических машин / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
90. ГОСТ Р 51901-6–2005 Менеджмент риска. Программа повышения надёжности. – М.: Стандартинформ, 2005. – 36 с.
91. ГОСТ 8865–93 Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. – М. : Издательство стандартов, 1995. – 8 с.
92. Рябинин, И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – М.: Политехника, 2000. – 248 с.
93. Проников, А. С. Параметрическая надёжность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
94. Управление качеством электроэнергии / Под ред. Ю.В. Шарова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 354 с.
95. Хуснутдинов, А.Н. 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.
96. Идиятуллин, Р.Г. Оценка эксплуатационной надёжности 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.

97. Беллуян, З.А. Ускоренные испытания синхронных генераторов на надежность / З.А. Беллуян // Известия Томского политехнического университета. Вып. 2005. Т. 308. № 2. – С. 142–145.

98. Ванеев, Б.Н. Эксплуатационная надёжность взрывозащищенного и рудничного электрооборудования по результатам исследований 2005-2006 годов / Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк.: УкрНИИВЭ, 2007. – С. 402–409.

99. Ванеев, Б.Н. Учёт надёжности при оптимальном проектировании взрывозащищённых асинхронных электродвигателей / Б.Н. Ванеев, В.Ф. Горягин // Электротехника. – 1990. – № 9. – С. 19–21.

100. Захарченко, П.И. Обеспечение надёжности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев. – Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.

101. Любалин, В.А. Исследование зависимости показателей надёжности асинхронных двигателей от основных эксплуатационных факторов / В.А. Любалин // Сб. трудов ВЗПИ. Вып.129, сер. Электрические машины. М.: 1981. – С. 58–60.

102. ГОСТ 27.301–95 Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – М. : Издательство стандартов, 1996. – 16 с.

103. ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

104. Идиятуллин, Р.Г. 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: Пятнадцатая междунар. науч.-техн. конф. – Крым, Алушта, 2014. – С. 86–88.

105. Положение о системе технического обслуживания и ремонта электрооборудования предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – Уфа.: Миннефтехимпром, 1982. – 176 с.
106. Lawless, J.F. Statistical Models and Methods for Lifetime Data / J.F. Lawless. – N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1982. – 583 p.
107. Nelson, W. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses / W. Nelson. – N.Y., John Wiley & Sons/ Inc., 1990. – 605 p.
108. Meeker, W.Q. Statistical Methods for Reliability Data / W.Q. Meeker, L.A. Escobar. – N.Y., John Wiley & Sons/ Inc., 1998. – 701 p.
109. Kaminskiy, M.P. Reliability models for engineers and scientists / M.P. Kaminskiy. – SRC Press, Taylor & Francis Grope, 2012. – 152 p.
110. Хуснутдинов, А.Н. Оценка потерь мощности участков цепи 0,4 кВ с учётом характеристики реактивной мощности / А.Н. Хуснутдинов, А.В. Попов, А.М. Вдовин // Семнадцатый аспирант.-магистер. науч. семинар, посвящ. Дню энергетика. – Казань, 2013. – С. 155–157.
111. Тумаева, Е.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.
112. Тумаева, Е.В. Выбор возбуждательного устройства синхронных двигателей для работы в условиях нефтехимического производства / Е.В. Тумаева, А.В. Попов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 15. – С. 200–201.
113. Попов, А.В. Исследование и совершенствование методов расчёта надёжности элементов электротехнических комплексов и систем / А.В. Попов // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетика. – 2015. № 3–4. – С. 114–123.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сведения о ремонтах ВАЭ, связанных с восстановлением повреждённой обмотки статора

| № п/п | Дата | Тип электро-двигателя | Рн, кВт | Зав. № | Год вы-пуска | Характер повреждений | Выполненные работы |
|-------|----------|-----------------------|---------|---------------|--------------|------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 28.04.99 | А-112-4 | 200 | 942 | 1974 | Пробой изоляции (выгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции |
| 2 | 31.05.99 | А-13-62-8 | 630 | 769 | 1971 | Повреждение витковой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 3 | 01.06.99 | А3-12-52-4 | 630 | 452920 | 1966 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора (замена изоляции одной секции). |
| 4 | 08.07.99 | СДКП-2-16-36-12 | 500 | 34488 | 1977 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой пазовой изоляции |
| 5 | 02.12.99 | А-13-59-6 | 800 | 456021 | 1977 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 6 | 28.12.99 | IEBOE-136-55-4 | 2500 | 125520 | 1966 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 7 | 23.02.00 | А-13-37-6 | 500 | 487315 | 1977 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 8 | 15.03.00 | А-13-59-6 | 800 | 476196 | 1978 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора |
| 9 | 11.05.00 | SFS2E | 4000 | 2E2012 102 | 1976 | Пробой изоляции секции обмотки | Перемотка обмотки статора |
| 10 | 10.07.00 | ДА30-13-62-4 | 800 | 112825 | 1979 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 11 | 18.09.00 | ДА30-13-62-4 | 800 | 17478 | 1973 | Витковое замыкание | Перемотка обмотки статора |
| 12 | 01.11.00 | СТД-800-2-4 | 800 | 53454 | 1994 | Пробой изоляции | Ремонт обмотки статора (замена изоляции секции). |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|-----------------|------|---------|------|-----------------------------------|---|
| 13 | 19.02.01 | А-13-37-6 | 500 | 461246 | 1972 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции. |
| 14 | 13.01.01 | ДС 1710-6 | 1350 | 624386 | 1966 | Повреждение изоляции | Перемотка обмотки статора. |
| 15 | 27.03.01 | БСДКП-15-21-12 | 200 | ПТКРК | 1978 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 16 | 09.04.01 | А-13-59-6 | 800 | 467300 | 1979 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 17 | 04.06.01 | ДАП-14-79-4 | 2500 | 632984 | 1966 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора |
| 18 | 04.06.01 | ДАП-14-79-4 | 2500 | 632931 | 1966 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора |
| 19 | 04.06.01 | А-13-46-6 | 630 | 491877 | 1974 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 20 | 02.07.01 | АН-15-44-10 | 1000 | 650406 | 1978 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 21 | 15.08.01 | А-13-62-8 | 630 | 460116 | 1975 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора, чистка механических частей |
| 22 | 29.10.01 | А2-450М-4М | 500 | 458980 | 1973 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора |
| 23 | 13.11.01 | А3-800/6000 | 800 | 1069 | 1973 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 24 | 24.05.02 | ІЕВОНЕ-136-40-4 | 1800 | 125519 | 1966 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 25 | 14.06.02 | АН-15-36-10 | 800 | 680456 | 1972 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 26 | 22.08.02 | АН-15-36-10 | 800 | 680442 | 1972 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 27 | 22.08.02 | К632/6-66 | 1800 | 1607505 | 1976 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 28 | 02.10.02 | А-13-59-6 | 800 | 467299 | 1979 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|-----------------|------|---------|-------|-----------------------------------|--|
| 29 | 28.10.02 | BAO2-560M4Y2 | 630 | 8375 | 1985 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 30 | 26.12.02 | A-13-59-6 | 800 | 404452 | 1972 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 31 | 03.02.03 | K632/6-66 | 1800 | 1607504 | 1976 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 32 | 12.03.03 | IEBOE-155-75-4 | 2900 | 129306 | 1963 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 33 | 08.04.03 | АН-15-36-10 | 800 | 690475 | 1972 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 34 | 21.05.03 | СДН2-16-56-10 | 1000 | 14402 | 1981 | Пробой изоляции (сгорела обмотка) | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 35 | 31.05.03 | ДАП-14-79-4 | 2500 | 124990 | 19664 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 36 | 09.07.03 | A2-450M | 500 | 458988 | 1973 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 37 | 18.09.03 | A-112-4 | 200 | 124029 | 1978 | Межфазное замыкание | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 38 | 17.11.03 | ДС 1710-6 | 1350 | 624404 | 1966 | Сгорела обмотка | Перемотка обмотки статора |
| 39 | 10.12.03 | ДАП 14-79-4 | 2500 | 632987 | 1966 | Пробой изоляции на корпус | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 40 | 24.12.03 | A-13-59-6 | 800 | 422688 | 1964 | Витковое замыкание | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 41 | 28.12.03 | A-13-46-6 | 630 | 491878 | 1974 | Витковое замыкание | Частичный ремонт обмотки статора (замена изоляции 2-х секций). |
| 42 | 17.03.04 | СДН3-2-16-56-10 | 1000 | 18562 | 1981 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 43 | 05.04.04 | СТМП-3500-2 | 3500 | 50069 | 1974 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 44 | 08.04.04 | АТО2-100 | 1000 | 85 | 1964 | Пробой изоляции на корпус | Частичный ремонт обмотки статора. |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|-----------------|------|--------|------|---------------------------|--|
| 45 | 15.04.04 | СДНЗ-2-16-56-10 | 1000 | 18532 | 1981 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 46 | 04.05.04 | СДНЗ-2-16-56-10 | 1000 | 14378 | 1974 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 47 | 29.09.04 | А12-39-6 | 320 | 459436 | 1973 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции |
| 48 | 30.09.04 | А-13-59-6 | 800 | 422658 | 1964 | Пробой изоляции | Восстановление изоляции секции обмотки статора |
| 49 | 05.10.04 | СТД-800-2-4 | 800 | 55854 | 1976 | Пробой изоляции | Замена изоляции выводных концов и перемычек. |
| 50 | 10.02.05 | А3-12-52-10 | 250 | 425278 | 1964 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 51 | 16.02.05 | ДАЗО-13-62 | 800 | 18673 | 1974 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 52 | 01.03.05 | ДАЗО4-450У2 | 800 | 62126 | 1981 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 53 | 04.03.05 | СДН2-16-56-10 | 1000 | 9908 | 1972 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 54 | 23.04.05 | СДН2-16-56-10 | 1000 | 9514 | 1972 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. Замена изоляции выводных концов. |
| 55 | 19.05.05 | ДАЗО4-450У2 | 800 | 56194 | 1977 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора |
| 56 | 09.06.05 | ПЕВОЕ-136-74-4 | 2900 | 124313 | 1966 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 57 | 25.08.05 | А-13-59-6 | 800 | 475666 | 1978 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 58 | 20.09.05 | СДН-15-49-6 | 1600 | 23803 | 1976 | Пробой изоляции | Восстановление изоляции статора |
| 59 | 25.09.05 | ДАП 14-79-4 | 2500 | 124991 | 1964 | Пробой изоляции на корпус | Полная перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|----------------|------|---------|------|----------------------------|--|
| 60 | 27.12.05 | IEBOE-136-74-4 | 2900 | 124312 | 1966 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 61 | 25.01.06 | A3-12-32-4 | 400 | 452890 | 1973 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 62 | 27.01.06 | БСДКП-15-21-12 | 200 | 45520 | 1977 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 63 | 22.02.06 | АН15-36-10 | 800 | 690474 | 1972 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 64 | 05.06.06 | AB-16-49-10 | 1600 | 14647 | 1974 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. Замена изоляции выводных концов. |
| 65 | 16.06.06 | A-13-37-6 | 500 | 458777 | 1973 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 66 | 24.07.06 | A-13-59-6 | 800 | 456023 | 1977 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 67 | 26.07.06 | СТД-3150 | 3150 | 33526 | 1981 | Пробой изоляции | Частичный ремонт обмотки статора. Замена изоляции выводных концов. |
| 68 | 02.08.06 | K632/6-66 | 1800 | 1607506 | 1976 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 69 | 11.08.06 | ДС 1710-6 | 1350 | 624445 | 1966 | Витковое замыкание обмотки | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 70 | 28.12.06 | A-13-46-6 | 630 | 491967 | 1972 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора |
| 71 | 03.04.07 | A3-13-59-6 | 800 | 423431 | 1964 | Пробой изоляции | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|----------------|------|--------|------|------------------------------|---|
| 72 | 10.12.07 | АТО2-100 | 1000 | 75 | 1964 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 73 | 15.02.08 | АТО2-100 | 1000 | 76 | 1964 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 74 | 12.05.08 | А3-12-52-10 | 250 | 425773 | 1964 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 75 | 23.09.08 | ДАП-14-79-4 | 2500 | 126705 | 1964 | Витковое замыкание | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 76 | 23.09.08 | А-112-4 | 200 | 123788 | 1984 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции |
| 77 | 25.11.08 | А3-800/6000 | 800 | 1071 | 1973 | Витковое замыкание | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 78 | 05.02.09 | СДН-15-49-6 | 1000 | 6501 | 1974 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора |
| 79 | 11.03.09 | АН15-36-10 | 800 | 700518 | 1972 | Пробой изоляции статора | Перемотка обмотки статора с заменой пазовой и витковой изоляции |
| 80 | 20.04.09 | А-13-37-6 | 500 | 487318 | 1976 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной изоляции |
| 81 | 07.07.09 | СДН-2-16-56-10 | 1000 | 14985 | 1980 | Пробой изоляции | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 82 | 12.08.09 | А3-12-32-4 | 400 | 452915 | 1973 | Пробой изоляции на корпус | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 83 | 01.12.09 | ВАО500М2 | 315 | 760 | 1977 | Заклинило передний подшипник | Частичный ремонт обмотки |
| 84 | 23.12.09 | А-13-59-6 | 800 | 467296 | 1979 | Витковое замыкание | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------|----------------|------|--------|------|----------------------------|--|
| 85 | 02.03.10 | АН-15-36-10 | 800 | 700733 | 1972 | Замыкание на корпус | Частичный ремонт обмотки статора |
| 86 | 25.02.10 | А3-800/6000 | 800 | 1070 | 1973 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 87 | 10.03.10 | А3-630/6000 | 630 | 1406 | 1972 | Пробой обмотки на корпус | Частичный ремонт обмотки статора. Переклиновка статора. Покрытие обмотки эмалью |
| 88 | 11.05.10 | СДКП2-17-16-12 | 630 | 34345 | 1973 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. Изготовление новых секций |
| 89 | 16.04.10 | А3-12-32-4 | 400 | 452880 | 1973 | Пробой изоляции на корпус | Частичный ремонт обмотки |
| 90 | 23.06.10 | А3-800/6000 | 800 | 1867 | 1974 | Пробой изоляции на корпус | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой и пазовой изоляции. |
| 91 | 02.09.10 | ЕВОЕ-136-55-4 | 1600 | 123938 | 1970 | Обрыв витка обмотки | Частичный ремонт обмотки |
| 92 | 13.09.10 | ДС 1710-6 | 1350 | 624440 | 1966 | Пробой изоляции на корпус | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 93 | 10.11.10 | ДАЗО4-450У2 | 800 | 56191 | 1981 | Пробой изоляции на корпус | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 94 | 28.02.11 | ВАСВ-14-34-24 | 100 | 26895 | 1973 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 95 | 16.03.11 | ДС 1710-6 | 1350 | 624444 | 1966 | Повреждение изоляции | Частичная перемотка обмотки статора. |
| 96 | 11.04.11 | АН-15-36-10 | 800 | 700445 | 1972 | Витковое замыкание обмотки | Перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|----------|-----------------|------|--------|------|----------------------------|---|
| 97 | 21.04.11 | АН-15-36-10 | 800 | 700773 | 1972 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 98 | 07.07.11 | АТО2-1000 | 1000 | 86 | 1964 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 99 | 01.12.11 | СДН2-16-56-10 | 1000 | У521 | 1974 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с изготовлением новых секций |
| 100 | 23.01.12 | ДАЗО13-62-4М | 800 | 17544 | 1973 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора |
| 101 | 15.02.12 | А-13-52-8 | 500 | 463046 | 1976 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 102 | 12.03.12 | А3-12-32-4 | 400 | 460354 | 1973 | Витковое замыкание | Полная перемотка обмотки статора с заменой витковой изоляции. |
| 103 | 26.03.12 | А3-630/6000 | 630 | 1408 | 1972 | Витковое замыкание обмотки | Полная перемотка обмотки статора. |
| 104 | 02.04.12 | А3-1000/6000 | 1000 | 96 | 1964 | Короткое замыкание обмотки | Частичный ремонт обмотки статора. Покрытие обмотки статора эмалью ГФ-92 |
| 105 | 28.06.12 | А4-400У-6 | 500 | 420286 | 1977 | Витковое замыкание обмотки | Перемотка обмотки статора |
| 106 | 19.07.12 | ПЕВООЕ-136-55-4 | 2500 | 125523 | 1966 | Витковое замыкание обмотки | Перемотка обмотки статора с заменой корпусной и витковой изоляции. |
| 107 | 01.10.12 | ДАЗО4-450-4 | 800 | 56199 | 1973 | Витковое замыкание | Частичный ремонт обмотки статора. |
| 108 | 02.11.12 | ДАЗО4-450-4 | 800 | 62124 | 1974 | Повреждение изоляции | Полная перемотка обмотки статора |