

На правах рукописи



Ведашкин Максим Викторович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
КРАНОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск-2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы»

Научный руководитель: Муравлев Олег Павлович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Щуров Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет, кафедра «Электротехнических комплексов», заведующий кафедрой, деканат факультета «Мехатроники и автоматизации», декан.

Встовский Алексей Львович, кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, кафедра «Электротехнические комплексы и системы», профессор.

Ведущая организация: Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского университета систем управления и радиоэлектроники» ФГБОУ ВПО "ТУСУР" (НИИ АЭМ ТУСУР) г. Томск

Защита диссертации состоится « 11 » апреля 2012 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат диссертации разослан «11» марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Чупак Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Асинхронные двигатели получили широкое применение в различных отраслях народного хозяйства благодаря высокой надежности, экономичности, относительно низкой стоимости и простоте эксплуатации. Они являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. Поэтому асинхронные двигатели (АД) всегда находятся в центре внимания разработчиков, изготовителей и потребителей, особенно в настоящее время, при переходе к рыночной экономике. Эффективность и надежность функционирования электрических машин (ЭМ) зависит не только от качества их проектирования и изготовления, но и от обоснованной системы эксплуатации, правильного технического обслуживания и качественного и своевременного ремонта. Вопросами надежности асинхронных двигателей, мостовых кранов, электрооборудования объектов энергетики успешно занимались Стрельбицкий Э.К., Гольдберг О.Д., Похолков Ю.П., Муравлев О.П., Пястолов А.А., Ванеев Б.Н., Брауде В.И., Александров М.П., Назарычев А.Н. и другие. В этих работах представлен ряд методик расчета надежности при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей. Рассмотрены виды отказов при эксплуатации и причины их возникновения. Это позволяет, в какой – то степени, исключить или снизить вероятность их появления уже на стадии проектирования и изготовления, что способствует в общем случае некоторому повышению надежности асинхронных двигателей на стадии эксплуатации. При таком подходе не определяются количественные значения показателя эксплуатационной надежности: наработка на отказ, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, вероятность отказа и другие показатели, которые являются основой теории надежности. При таком положении получается, что отказы и их количество не связаны в теоретическом плане ни с количественными показателями эксплуатационной надежности электрических машин, ни с системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР) асинхронных двигателей в эксплуатации. Следует отметить, что исследованию эксплуатационной надежности асинхронных двигателей до настоящего времени уделялось недостаточно внимания, хотя и больше, чем для других типов ЭМ.

Появление и внедрение системы планово – предупредительного ремонта (ППР) электрооборудования исторически увязывается с усложнением конструкции оборудования. Это объективная реальность. Усложняется оборудование – повышаются эксплуатационные требования производителя, которые, в свою очередь, требуют реакции от ремонтной службы. Отличительной особенностью нашей системы ППР является формальный учет времени работы оборудования, которое принимается за основу при формировании ремонтного цикла, что создает обманчивое впечатление относительно истинного состояния по износу оборудования в процессе эксплуатации. Оценка технического состояния оборудования в процессе эксплуатации производится с упором на благополучие механической составляющей, которая лишь одна из составляющих частей конструкции, особенно для ЭМ. В современных условиях эксплуатации поддержание

работоспособности электрических машин переменного тока обеспечивается только с помощью системы ППР, которая не учитывает конкретные условия эксплуатации, нет увязки ремонтных циклов с показателями надежности, и имеет сравнительно высокую трудоемкость технического обслуживания. К настоящему времени в области эксплуатации ЭМ сложилась ситуация, характеризующаяся тем, что разработки, связанные с повышением надежности не полностью оправдывают себя, не достигнут требуемый уровень безотказности, а применяемые мероприятия не дают ожидаемого эффекта. Одна часть деталей и сборочных единиц ЭМ отказывает до наступления плановых сроков ремонта, другая часть, оказавшаяся в более благоприятных условиях и полностью работоспособная, направляется на ремонт преждевременно, в соответствии с планом. Все это приводит к дополнительным затратам. Широкий диапазон условий эксплуатации и режимов работы ЭМ, весьма часто низкий уровень обслуживания обуславливают необходимость совершенствования системы ТОиР на основе оценки эксплуатационной надежности, которую можно определить только по данным эксплуатации. Исследованием эксплуатационной надежности ЭМ занимаются крайне недостаточно.

Решение обозначенных проблем является актуальным и представляет научный и практический интерес.

Целью работы является моделирование эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей и определение количественных показателей их надежности в реальных условиях для принятия решений, направленных на повышение эффективности эксплуатации.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач:

1. Произвести исследование и анализ информационного потенциала параметров эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей и выбрать метод исследования эксплуатационной надежности электрических машин.

2. Разработать компьютерную модель оценки эксплуатационной надежности КрАД, состоящую из математической модели, алгоритмов расчета показателей надежности и программного обеспечения для расчетов на ЭВМ.

3. Создать программно – вычислительный комплекс по расчету эксплуатационной надежности асинхронных двигателей.

4. Разработать методику инженерного анализа эксплуатационной надежности асинхронных двигателей, работающих на мостовых кранах.

5. Определить фактические численные значения показателей эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей (КрАД) по статистическим данным наработок, полученным при изучении процесса эксплуатации мостовых кранов на промышленном предприятии.

6. По результатам оценки показателей эксплуатационной надежности определить стратегию совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются крановые асинхронные двигатели. Предметом исследования являются методы оценки эксплуатационной надежности и методы технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории электрических машин, математического и статистического моделирования, теории вероятностей, надежности и математической статистики, опыт эксплуатации и экспериментально – статистический анализ надежности, пакеты прикладных программ Word, Excel, MathCAD, программное обеспечение по оценке надежности ЭМ по эксплуатационным данным. Экспериментальные исследования по определению эксплуатационной надежности асинхронных двигателей проведены на предприятиях.

Достоверность полученных результатов. Достоверность предложенных моделей и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректным применением теоретических методов, сходимостью результатов проведенных исследований и вычислительных экспериментов, а также подтверждается данными, полученными в реальных условиях эксплуатации КрАД и положительным опытом внедрения полученных результатов на промышленных предприятиях.

Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в совершенствовании методов количественного расчета показателей надежности крановых асинхронных двигателей с учетом условий эксплуатации, и состоит в следующем:

1. Разработана компьютерная модель количественной оценки эксплуатационной надежности сборочных единиц крановых асинхронных двигателей, состоящая из математической модели, алгоритмов ее реализации и программного обеспечения для ЭВМ. Она позволяет определять законы распределения отказов и фактические значения количественных показателей эксплуатационной надежности, необходимые как для совершенствования двигателей, так и системы их технического обслуживания и ремонта.

2. Создана математическая модель инженерного анализа эксплуатационной надежности для оценки общей надежности двигателей мостовых кранов при изменении их средних наработок на отказ и вероятностей безотказной работы КрАД (приводов моста и тележки, главного и вспомогательного подъема) и выбора стратегии повышения показателей надежности двигателей.

3. Впервые систематизированы законы распределения отказов и статистические данные о показателях эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей мостовых кранов.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Для математического моделирования эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей создан программно – вычислительный комплекс «Расчет эксплуатационной надежности» на ЭВМ, позволяющий оперативно определять вид закона распределения и проводить оценку его параметров.

2. Получены объективные значения количественных показателей эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей на основе фактических данных эксплуатации, необходимые для совершенствования их проектирования, технологии изготовления и системы технического обслуживания и ремонта.

3. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонта крановых асинхронных двигателей.

Реализация результатов работы. Полученные результаты переданы и используются на ООО «Юргинский машиностроительный завод» для совершенствования системы технического обслуживания и ремонта крановых асинхронных двигателей и на ОАО «Сибэлектромотор» для учета реальных показателей эксплуатационной надежности при проектировании и изготовлении крановых асинхронных двигателей.

Результаты работы используются на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы» Национального исследовательского Томского политехнического университета в учебном процессе при подготовке магистрантов и специалистов в курсовом и дипломном проектировании и при проведении научных исследований.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель количественной оценки эксплуатационной надежности сборочных единиц крановых асинхронных двигателей (математическая модель, алгоритмы ее реализации и программное обеспечение).

2. Математическая модель инженерного анализа эксплуатационной надежности двигателей мостовых кранов.

3. Программно – вычислительный комплекс для моделирования эксплуатационной надежности асинхронных двигателей.

4. Законы распределения отказов и статистические данные о показателях эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей мостовых кранов.

5. Рекомендации по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонта и обеспечению эксплуатационной надежности КрАД.

Личный вклад в работу. Автор непосредственно участвовал в качестве исполнителя на всех этапах проведенных исследований, включая постановку задач, анализ литературы по проблеме, сбор исходных эксплуатационных данных по надежности, обработку статистического материала и результатов, разработку математических моделей, алгоритмов, создание программного обеспечения, проведение расчетов, обобщение и интерпретацию результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и были обсуждены: на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск 2008-2009 гг.); Международной научно-практической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (ТПУ, г. Томск 2007г., 2009г., 2011г.); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации»

(НГТУ, г. Новосибирск 2008г.); Всероссийской научно – технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (ТПУ, г. Томск 2008 г.).

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и получено свидетельство об официальной регистрации программно – вычислительного комплекса «Расчет эксплуатационной надежности».

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений, общий объем работы составляет 192 страницы, включая 32 рисунок, 30 таблиц и списка литературы из 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи, раскрыта научная новизна и практическая ценность исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Во втором разделе представлен обзор современного состояния теории надежности АД. Проблема обеспечения надежности асинхронных двигателей актуальна в настоящее время. В результате сформулированы основные положения и требования к обеспечению безотказности на этапе эксплуатации. Проектирование АД, когда для получения новых свойств (обеспечение энергосбережения и надежности, снижение затрат на ТОиР при эксплуатации) увеличивается масса активных материалов, можно считать устойчивой тенденцией их совершенствования. Рассмотрены результаты исследования отказов АД общепромышленного применения, показатели надежности, классификация отказов и их причин, отмечены наиболее аварийные сборочные единицы и детали, показано, что совместная оптимизация технических характеристик и надежности АД пока затруднена и требует проведения дополнительных научных работ. В настоящее время интерес к надежности вызван экономическими факторами и идет, в первую очередь, по направлению исследования эксплуатационной надежности. При этом методы исследования выбираются статистические на основе теории надежности, теории вероятностей и математической статистики.

Проведен анализ основных исследований в области обеспечения надежности и существующих систем ремонта, который показал, что данная проблема с позиций оптимальной организации и эффективного функционирования системы ТОиР ЭМ по техническому состоянию отражена в них недостаточно полно. Основные принципы, которые современная система ТОиР должна использовать базируются на следующих положениях: оценка технического состояния выполняется при периодическом или непрерывном диагностировании; плановое техническое обслуживание по мере нормативной выработки ресурса, опре-

деляемой техническими требованиями для ЭМ; текущий ремонт при снижении надежности ниже установленного уровня и капитальный ремонт при достижении ЭМ предельного состояния. Анализ системы ППР ЭМ выявил существенные недостатки и проблемы, связанные с рядом объективных изменений при эксплуатации ЭМ. Обоснована необходимость совершенствования системы ТОиР для обеспечения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей с учетом их технического состояния, особенно когда они находятся за пределами сроков амортизации.

Изучение эксплуатационной надежности в реальном процессе производства имеет значительное преимущество перед проведением специальных определительных испытаний на надежность: информация получается более дешевой, наиболее полной и достоверной. Организовывать сбор информации о наработках и отказах в процессе эксплуатации целесообразно на машиностроительном предприятии, где в производстве используется большое число мостовых кранов. Необходимо разработать компьютерную модель оценки эксплуатационной надежности КрАД, которая должна содержать математическую модель, алгоритмы моделирования и программное обеспечение для решения задач определения фактических значений показателей эксплуатационной надежности КрАД по статистическим данным наработок, полученным при изучении процесса эксплуатации мостовых кранов на промышленном предприятии. Она позволит определить фактические численные значения показателей эксплуатационной надежности КрАД по статистическим данным наработок, полученным при изучении процесса эксплуатации мостовых кранов на промышленном предприятии. Создание методики инженерного анализа эксплуатационной надежности асинхронных двигателей мостового крана позволит получить результаты количественного анализа надежности как для совершенствования системы ТОиР, так и для использования их при проектировании и разработке технологии изготовления современных крановых асинхронных двигателей.

Третий раздел посвящен оценке технического состояния КрАД вероятностно-статистическим методом. Обоснован процесс формирования эксплуатационного массива данных для статистического анализа надежности КрАД и предложена схема натурного обследования их технического состояния. Система сбора данных об отказах должна удовлетворять следующим требованиям:

- статистические данные, получаемые из эксплуатации, должны позволять подтвердить характеристики надежности ЭМ, полученные в процессе проектирования;
- статистические данные должны позволять получить показатели надежности не только для ЭМ в целом, но и для ее элементов;
- методика сбора данных должна быть предельно простой, не требующей больших усилий работников по эксплуатации.

Исследование эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей было проведено на предприятии ООО «Юргинский машиностроительный завод».

В основе предлагаемой математической модели (ММ) лежат следующие допущения:

1) считается, что наработки до отказа являются статистически независимыми;

2) анализируемые объекты идентичны по устройству, назначению и условия эксплуатации относительно однородны;

3) в качестве исходных данных для статистической обработки эксплуатационной информации применяются случайные наработки до отказов;

4) для оценки и анализа эксплуатационной надежности в качестве основных вероятностей безотказной работы ЭМ приняты функции распределения, которые адекватно сопоставляются с наработкой на отказ для электромеханических систем: нормальная, логарифмически-нормальная и функция распределения Вейбулла.

Опираясь на данные допущения, построена ММ, на базе, которой дано строгое количественное описание процессов, влияющих на эксплуатационную надежность обмоток статоров и роторов КрАД. В качестве исходных данных ММ мы рассматриваем эксплуатационную информацию объемом N , содержащую наработки t_i ($i=1, 2, \dots, N$), которые являются наработками до отказов первоначально работающих ЭМ, а также после замен или восстановлений.

Для оценки надежности КрАД по принятой информации используется показатель вероятности безотказной работы (ВБР) $P(t)$. Эта функция обладает хорошей наглядностью, по ней можно определить остальные показатели надежности (функцию вероятности отказа $Q(t)$, среднюю наработку до отказа T_{cp} , интенсивность отказов $\lambda(t)$ и т. д.). Под *вероятностью безотказной работы* АД понимается вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ КрАД не возникнет. ВБР является основной количественной характеристикой безотказности объекта на заданном временном интервале. Функция ВБР записывается в виде

$$P(t) = P\{T \geq t\}, t \geq 0,$$

где T – момент отказа кранового асинхронного двигателя, t – время, для которого необходимо определить значение ВБР. Статистически ВБР равна

$$\hat{P}(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0} \approx \frac{N(t)}{N_0},$$

где N_0 – число объектов в начале испытаний, n_i – число отказавших объектов в интервале времени Δt_i , $N(t)$ – число объектов, исправно работающих в интервале времени $[0, t]$. В ММ аналогичные формулы используются и для определения других показателей надежности и параметров законов распределения. На рис. 1 представлен алгоритм реализации ММ для вычисления статистических оценок надежности.

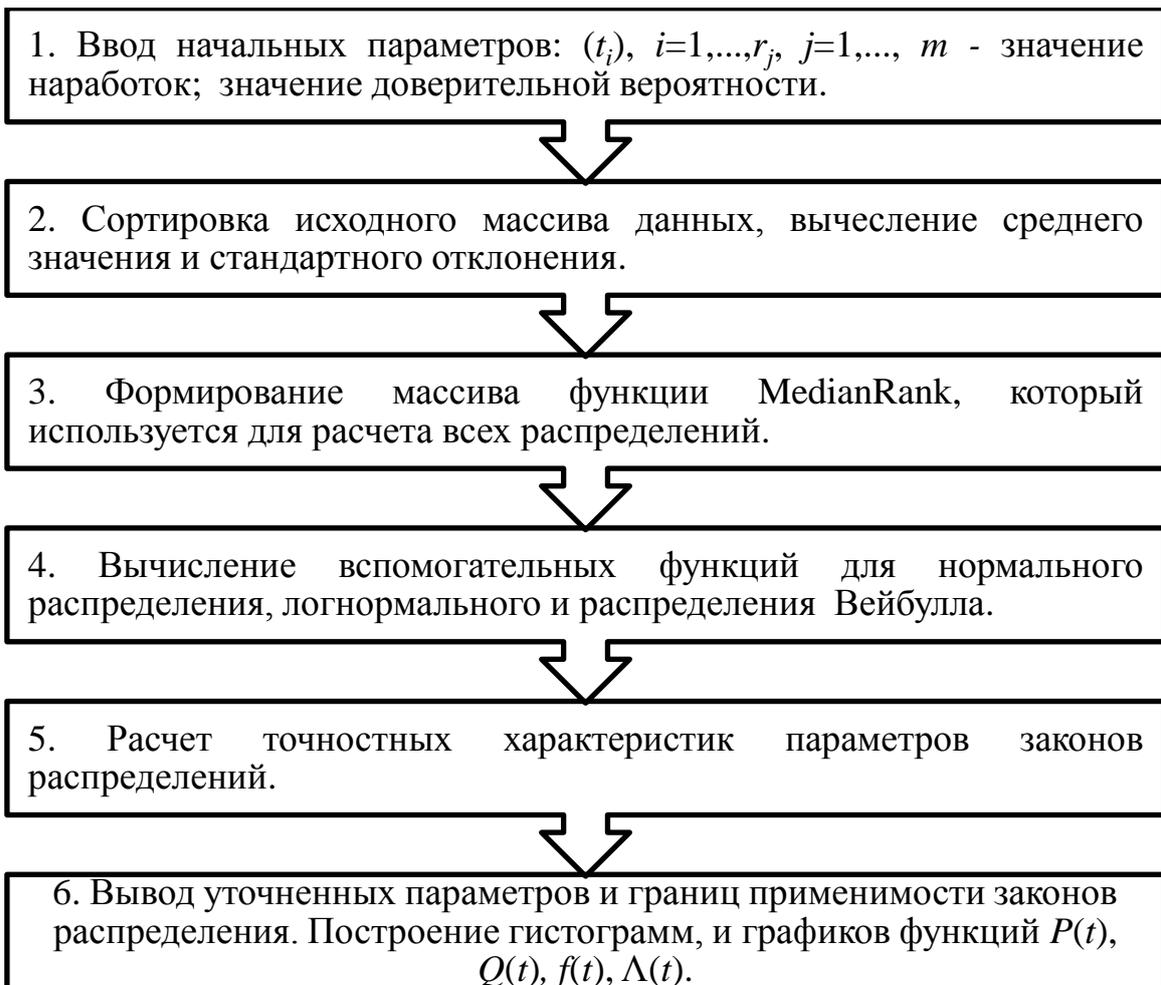


Рисунок 1 – Алгоритм математической модели оценки надежности

Алгоритм определения надежности КрАД работает следующим образом:

1 – ввод исходных данных различными способами: вручную, импортироваться из текстового файла, загружаться из сохраненного файла. Также пользователем должны быть введены значение Γ для вычисления значения гамма-процентной наработки и необходимое значение доверительной вероятности;

2 – производится обработка исходного массива данных (сортировка данных, определение стандартных статистических параметров);

3 – формирование значений массива значениями функции MedianRank, который используется для разных видов распределения (Вейбулла, нормального, логарифмически нормального);

4 – вычисление вспомогательных функций для распределения Вейбулла, а также для нормального и логарифмически нормального распределения;

5 – уточнение значений определенного закона распределения, и определение границ применимости соответствующего закона;

6 – служит для вывода точностных характеристик параметров распределения и вывода графиков.

Задача решается следующим образом:

- находят массив исходных эксплуатационных данных для всех элементов асинхронных двигателей мостового крана;

- определяют типы законов распределения и количественные значения их параметров;
- определяют фактические значения показателей надежности на основе полученных законов распределения.

На рис.2 представлен интерфейс программы с графическим изображением точечной оценки функции вероятности безотказной работы.

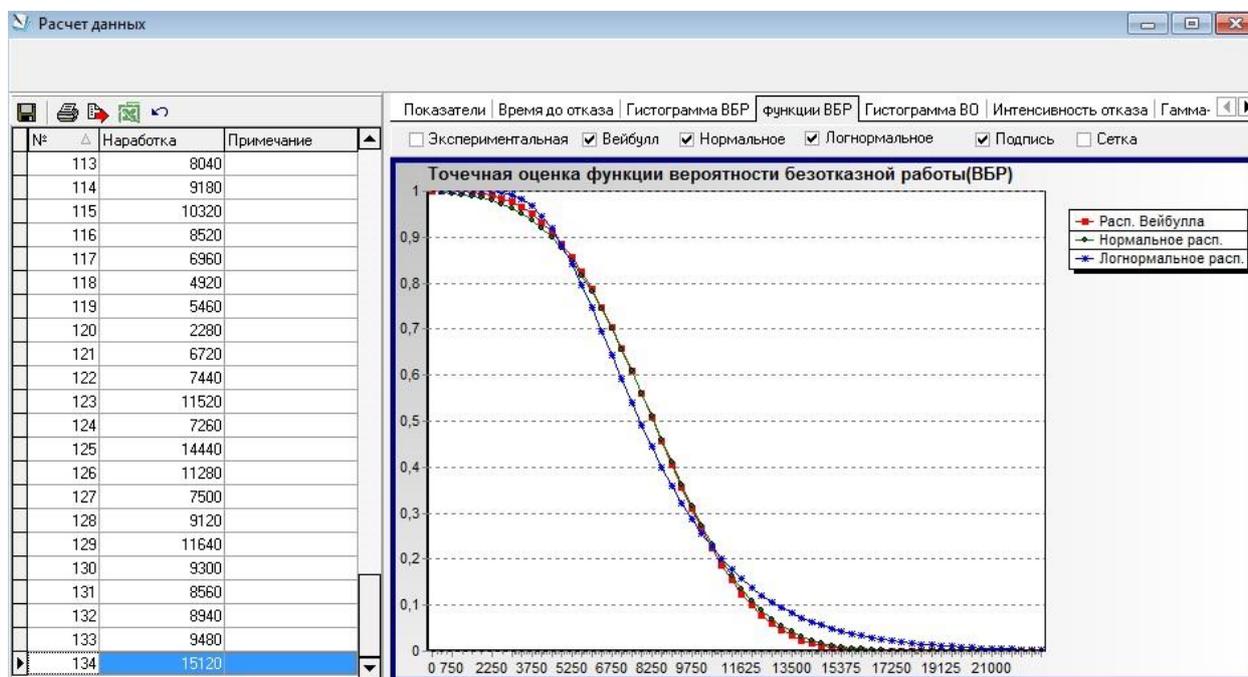


Рисунок 2 – Интерфейс программы функции безотказной работы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что разработана компьютерная модель эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей, состоящая из математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов и связей между ними, отражающих необходимые свойства объекта моделирования, математического аппарата, используемого для получения количественных результатов с помощью математической модели и программного комплекса, реализующей модель на компьютере. Сбор данных по эксплуатации проводился по всем видам отказов крановых асинхронных двигателей в следующих электроприводах: главного и вспомогательного подъемов, передвижения моста крана и тележки крана за 2005 – 2009 годы.

При рассмотрении трех основных моделей надежности (модель надежности Вейбулла, нормальная и логнормальная модели) для всех отказов обмоток статоров выбран нормальный закон распределения отказов. Выбор закона распределения отказов обмоток роторов возможен следующий: для главного подъема – можно выбрать любой из трех; для вспомогательного подъема и тележки крана – только распределение Вейбулла; для моста крана и всех приводов, работающих в нормальных условиях окружающей среды, – распределение Вейбулла и нормальное и для специальных подъемных устройств, работающих при

повышенной температуре и условиях агрессивной окружающей среды, – распределение Вейбулла. Для унификации моделирования эксплуатационной надежности обмоток роторов для всех приводов мостового крана принято распределение Вейбулла.

На основании эксплуатационных наблюдений и результатов моделирования законов распределения отказов с помощью программного комплекса построены гистограммы и функции плотности распределения наработок на отказ обмоток статоров и обмоток роторов для приводов главного и вспомогательного подъема, передвижения моста крана и тележки крана, для всех приводов мостового крана, работающих при нормальных условиях окружающей среды, и специальных подъемно-транспортных механизмов, работающих при повышенной окружающей температуре и при наличии агрессивной среды, которые необходимы для определения показателей эксплуатационной надежности и сравнения принятых законов распределения с экспериментальными данными. На рис. 3 в качестве примера приведена гистограмма и функция плотности распределения наработок на отказ обмоток статоров КрАД для всех приводов мостового крана.

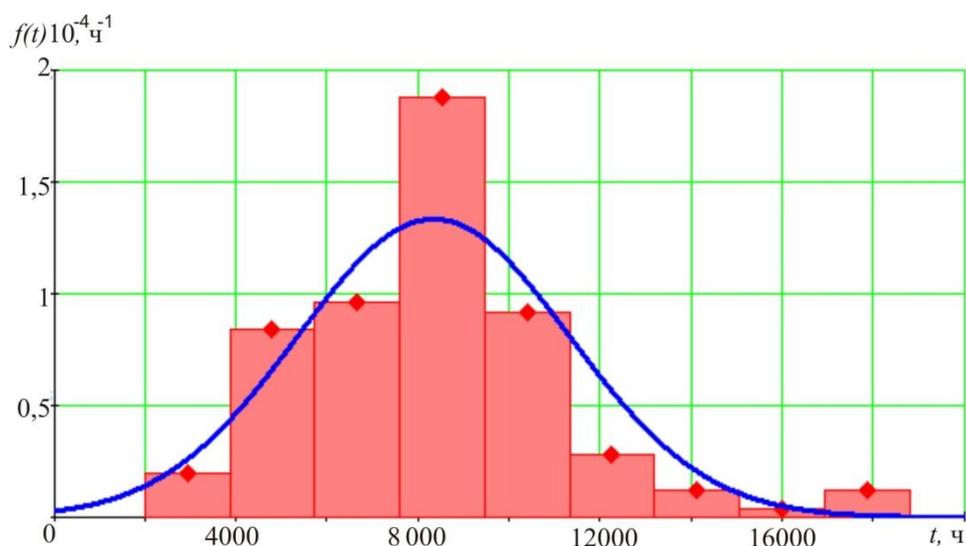


Рисунок 3 – Гистограмма и функция плотности распределения наработок на отказ обмоток статоров КрАД для всех приводов мостового крана

Сравнение интервальных оценок наработок позволяет сделать выводы о значимости соотношений средних наработок обмоток статоров для различных приводов мостового крана: главный подъем имеет статистически устойчивую наибольшую среднюю наработку, вспомогательный подъем и привод передвижения моста имеют практически одинаковые интервальные оценки средних наработок и можно сказать, что с вероятностной точки зрения их средние наработки одинаковы, средняя наработка привода передвижения тележки по интервальным оценкам имеет среднее положение между главным подъемом и приводами вспомогательного подъема и передвижения моста, специальные подъемные устройства, работающие при повышенной температуре окружающей среды

при наличии пыли и различных паров, имеют статистически устойчивую минимальную среднюю наработку из всех видов приводов. Сравнение интервальных оценок наработок обмоток роторов позволяет сделать вывод, что средние наработки на отказ для всех приводов мостового крана статистически значимо не отличаются и наработки составляют одну генеральную совокупность.

В результате моделирования получены количественные значения параметров законов распределения и впервые получены фактические значения средних наработок и вероятности безотказной работы обмоток статоров и роторов в зависимости от величины наработки для всех типов приводов мостового крана, которые определяют эксплуатационную надежность крановых асинхронных двигателей.

Четвертый раздел посвящен инженерному анализу, который основан на математическом моделировании эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей и мостовых кранов в целом, на законах распределения отказов обмоток статоров и роторов и подшипниковых устройств. Основной характеристикой эксплуатационной надежности КрАД является функция вероятности безотказной работы, которая определяется по формуле:

$$P_i(t) = P_{oci}(t)P_{opi}(t)P_{nyi}(t),$$

где P_{oci} – ВБР обмоток статоров асинхронных двигателей i -го привода кранового асинхронного двигателя мостового крана; P_{opi} – ВБР обмотки ротора; P_{nyi} – ВБР подшипниковых устройств. Проведенный всесторонний анализ этой зависимости позволяет считать, что вероятность безотказной работы АД полностью определяется ВБР обмотки статора $P_{АД}(t) = P_{OC}(t)$ для всех параметров надежности, определенных в работе по данным эксплуатации.

Математическая модель надежности мостового крана устанавливает взаимосвязь наработок и вероятностей безотказной работы всего мостового крана и его приводов – привода моста, тележки, главного и вспомогательного подъема. Расчет надежности мостового крана рассматриваем по двум направлениям: первое – направление главного подъема «мост-тележка-главный подъем» и второе – направление вспомогательного подъема «мост-тележка-вспомогательный подъем».

Вероятность безотказной работы МК по первому направлению (1):

$$P_{MKI}(t) = P_M(t) \cdot P_T(t) \cdot P_{ГП}(t) = \\ = \frac{(2\pi)^{-\frac{3}{2}}}{\sigma_M \cdot \sigma_T \cdot \sigma_{ГП}} \cdot \left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_M}{\sigma_M} \right)^2} d\tau \right) \cdot \left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_T}{\sigma_T} \right)^2} d\tau \right) \cdot \left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_{ГП}}{\sigma_{ГП}} \right)^2} d\tau \right), \quad (1)$$

где все параметры законов распределения получены по эксплуатационным данным с помощью программно - вычислительного комплекса «Расчет эксплуатационной надежности», разработанного автором.

Средняя наработка на отказ МК в направлении «мост-тележка-главный подъем» определяется по формуле

$$T_{cpMKI} = \int_0^{\infty} P_{MKI}(t) dt = \int_0^{\infty} P_M(t) \cdot P_T(t) \cdot P_{ГП}(t) dt = \quad (2)$$

$$= \frac{(2\pi)^{-\frac{3}{2}}}{\sigma_M \cdot \sigma_T \cdot \sigma_{ГП}} \int_0^{\infty} \left[\left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_M}{\sigma_M} \right)^2} d\tau \right) \cdot \left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_T}{\sigma_T} \right)^2} d\tau \right) \cdot \left(\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_{ГП}}{\sigma_{ГП}} \right)^2} d\tau \right) \right] dt.$$

Расчет по формуле (2) произведен с использованием встроенных функций Mathcad. При параметрах нормального распределения для КрАД: $\mu_M = 7561$ ч и $\sigma_M = 2408$ ч; $\mu_T = 8889$ ч и $\sigma_T = 2694$ ч; $\mu_{ГП} = 9986$ ч и $\sigma_{ГП} = 3636$ ч средняя наработка на отказ $T_{cpMKI} = 6177$ ч. Аналогично были проведены расчеты по второму направлению «мост-тележка-вспомогательный подъем». На рис. 4 представлены ВБР для МК. Средние наработки на отказ в случае нормального распределения имеют место при значении ВБР равном 0,5.

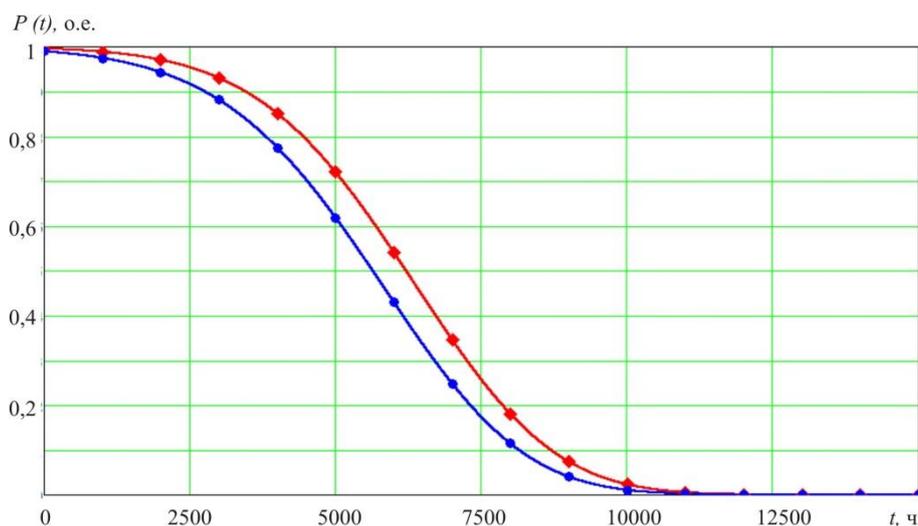


Рисунок 4 – Функции вероятности безотказной работы мостового крана:

◆ – направление главного подъема; ● – направление вспомогательного подъема мостового крана

Для проведения анализа влияния изменений средних наработок КрАД моста, тележки, главного и вспомогательного подъемов мостового крана на вероятность безотказной работы и изменение средней наработки увеличивали параметр T_{cp} на 5, 10, 15, 20, 25, 30 % для каждого привода в отдельности и для всех приводов одновременно, и получили изменения T_{cp} мостового крана по направлениям главного и вспомогательного подъемов. Результаты моделирования представлены в виде зависимости средней наработки на отказ мостового крана по направлению главного подъема от изменений средней наработки всех приводов в отдельности и одновременно на рис.5.

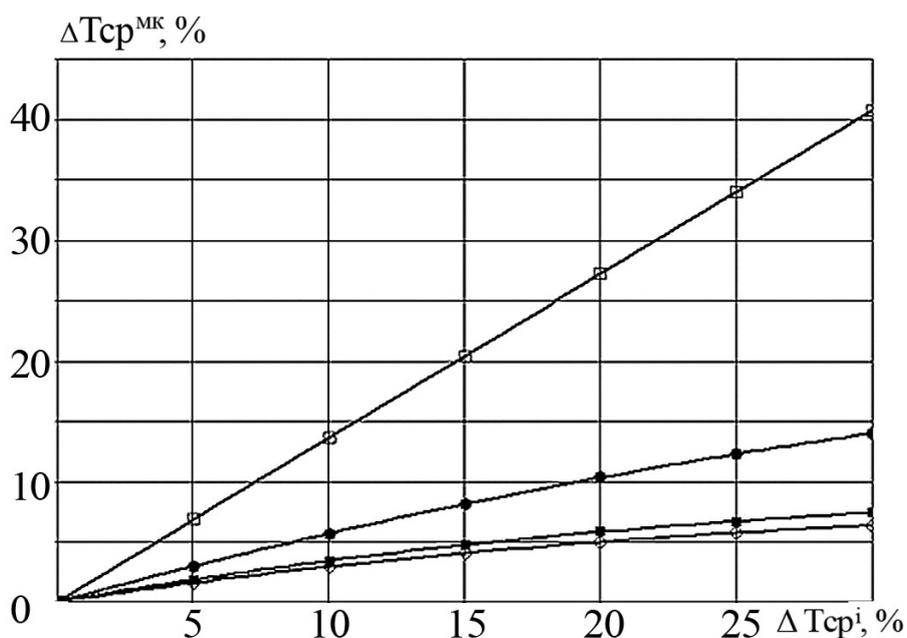


Рисунок 5 – Зависимость приращения средней наработки МК от приращений средней наработки: ● – мост, ■ – тележка, ◇ – главный подъем, □ – одновременные приращения

Пятый раздел посвящен совершенствованию системы ТОиР ЭМ. Уровень эксплуатационной надежности и режимы технического обслуживания ЭМ в значительной степени определяют эффективность их использования и затраты на эксплуатацию и ремонт. Особенности эксплуатации и конструктивное исполнение ЭМ накладывают ограничения на выбор стратегии технического обслуживания и ремонта – техническое состояние обмоток ЭМ не может быть определено методами технической диагностики. Методы технической диагностики применимы только для оценки состояния подшипниковых устройств, которые для крановых асинхронных двигателей не определяют наработку на отказ. Поэтому стандартные стратегии ТОиР не могут быть использованы для КрАД. Рекомендуется смешанная стратегия. Она состоит в том, что ремонт двигателя происходит по техническому состоянию – при отказе обмотки статора, которая определяет наработку на отказ асинхронного двигателя. При этом двигатель полностью разбирается, и производится ремонт обмотки статора и дефектация состояния ротора и подшипников. Определяется техническое состояние обмотки ротора, колец, бандажей и подшипников. В соответствии с состоянием производится проточка или замена колец ротора, ремонт бандажей обмотки ротора и заменяются подшипники при необходимости. Другая часть системы технического обслуживания и ремонта крановых асинхронных двигателей, связанная с техническим обслуживанием, проводится по программе планово-предупредительного ремонта, в соответствии с которой происходит замена или добавление смазки в подшипниках двигателя, замена щеток и пружин щеточного аппарата без разборки КрАД и снятия его с моста крана.

Эксплуатационная надежность КрАД характеризуется: наработкой на отказ, вероятностью безотказной работы и коэффициентом готовности, который определяется по формуле

$$K_{ГiN} = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + T_{в}} \quad (3)$$

где $T_{ср}$ – средняя наработка на отказ приводов мостового крана, $T_{в}$ – среднее время восстановления работоспособного состояния КрАД, которое 120-144 ч для ООО «Юргинский машиностроительный завод» и 672 ч для ОАО «Сибэлектромотор». Соответственно, для этих предприятий $K_{Гю} = 0,980-0,986$ и $K_{Гс} = 0,913-0,936$ – отличие весьма существенное.

Ремонт обмотки статоров КрАД может производиться в двух вариантах – на предприятии, где они эксплуатируются, при наличии ремонтных служб, и на заводе-изготовителе в г. Томске. Качество ремонта КрАД характеризуется средними наработками на отказ – в первом случае по данным эксплуатации 7512-9986 ч, а во втором – 17500 ч гарантируется нормативно-технической документацией и реально обеспечивается. Таким образом, почти в два раза фактическая наработка на отказ по эксплуатационным данным КрАД меньше, чем установленная стандартами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Впервые в практике эксплуатации ЭМ получены фактические данные по эксплуатационной надежности КрАД, установлены законы распределения наработок на отказ обмоток статоров и роторов и двигателей в целом и определены параметры этих законов. Для отказов обмоток статоров и двигателей в целом выбран нормальный закон распределения, а для обмоток роторов – принято распределение Вейбулла. Средние наработки на отказ обмоток статоров – 7082 – 9986 ч, обмоток роторов – 17320 – 19269 ч. Исследование эксплуатационной надежности КрАД проводилось в течение 2005 – 2009 г.г. на предприятии ООО «Юргинский машиностроительный завод», на котором все мостовые краны выработали установленный ресурс 25 лет, что характерно для большинства машиностроительных предприятий России.

2. Получены данные по видам отказов для всех мостовых кранов, работающих как в стандартных окружающих условиях (отказы обмотки статора – 66 %, обмотки ротора – 31 %, подшипниковых узлов – 3 %), так и для специальных подъемно – транспортных механизмов, которые работают при повышенной окружающей температуре и при наличии агрессивной среды (70 %, 29 %, 1 % – соответственно).

3. Разработана компьютерная модель эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей, состоящая из математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов и связей между ними, отражающих необходимые свойства объекта моделирования, математиче-

ского аппарата, используемого для получения количественных результатов с помощью математической модели и программного комплекса, реализующей модель на компьютере.

4. Разработан программно-вычислительный комплекс «Расчет эксплуатационной надежности» для определения показателей и исследования эксплуатационной надежности крановых асинхронных двигателей, основанный на математической модели эксплуатационной надежности КрАД и ее алгоритмах, который может быть использован для различных типов ЭМ.

5. Построены гистограммы и функции плотности распределения наработок на отказ обмоток статоров и обмоток роторов для всех приводов, которые необходимы для определения показателей эксплуатационной надежности и сравнения принятых законов распределения с экспериментальными данными.

6. Инженерный анализ эксплуатационной надежности связан с надежностью КрАД как цельного объекта. Вероятность безотказной работы КрАД определяется надежностью обмоток статора и ротора и подшипникового устройства. Проведенные расчеты позволяют принять с достаточной для инженерного анализа точностью, что надежность КрАД полностью определяется надежностью обмотки статора.

7. Для проведения инженерного анализа разработана математическая модель надежности мостового крана, которая определяет взаимосвязь наработок и вероятностей безотказной работы всего мостового крана и его приводов – моста, тележки, главного и вспомогательного подъема.

8. Основным результатом инженерного анализа эксплуатационной надежности заключается в том, что разработана методика определения средней наработки на отказ мостового крана по средним наработкам двигателей приводов. Так для направления главного подъема «мост–тележка–главный подъем» при $T_{ср.м.} = 7561$ ч, $T_{ср.т.} = 8889$ ч, $T_{ср.гп.} = 9986$ ч средняя наработка на отказ мостового крана составляет 6177 ч, которая определена по ВБР МК.

9. Создана методика количественной оценки изменения средней наработки мостового крана при изменении средних наработок приводов МК, которая позволяет найти наиболее эффективный вариант повышения средней наработки на отказ моста мостового крана.

10. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что современные существующие стратегии технического обслуживания и ремонта ЭМ связаны с процессами старения при их эксплуатации, количественные показатели которых могут быть определены методами теории надежности. Определить техническое состояние КрАД с помощью методов технической диагностики не представляется возможным и для системы технического обслуживания и ремонта крановых асинхронных двигателей необходима смешанная стратегия, которая имеет следующие составляющие – ремонт двигателя происходит по техническому состоянию при отказе обмотки статора, а другая часть системы технического обслуживания и ремонта крановых асинхронных двигателей, связанная с техническим обслуживанием, проводится по программе планово-предупредительного ремонта.

11. Третий комплексный показатель надежности – коэффициент готовности зависит от средней наработки на отказ и среднего времени восстановления работоспособного состояния КрАД, которое для ООО «Юргинский машиностроительный завод» составляет – 120 –144 ч, а для ОАО «Сибэлектромотор» – 672 ч. Абсолютное значение коэффициента готовности находится в пределах для первого случая от 0,980 до 0,986, для второго от 0,913 до 0,936. Восстанавливать отказавшие двигатели необходимо на предприятии, где они работают, учитывая, что при существующей системе ремонтов на ООО «Юргинский машиностроительный завод» фактическая средняя наработка на отказ обмоток статоров КрАД составляет от 7500 до 9990 ч., пропитка обмотки статора осуществляется окунанием и лаком МЛ-92, который имеет класс нагревостойкости В. Это объясняет причину низкой фактической наработки двигателей. На ОАО «Сибэлектромотор» крановые асинхронные двигатели выпускаются по классу изоляции F и H с применением вакуумной пропитки, что обеспечивает гарантируемую среднюю наработку двигателей – 17500 ч. Результаты математического моделирования эксплуатационной надежности КрАД позволяют рекомендовать предприятию ООО «Юргинский машиностроительный завод» изготовление обмоток статоров с применением вакуумной пропитки лаком КО 916 или аналогом для класса нагревостойкости F с использованием материалов, соответствующих этому классу нагревостойкости, что существенно повысит среднюю наработку на отказ КрАД. Учитывая производственные мощности, установку для вакуумной пропитки предприятие может изготовить собственными силами.

12. Средняя наработка на отказ мостового крана по фактическим показателям эксплуатационной надежности составляет: по направлению «мост–тележка–главный подъем» – 6177 ч, по направлению «мост–тележка–вспомогательный подъем» – 5553 ч, а для мостовых кранов с установленными КрАД, которые изготовлены на ОАО «Сибэлектромотор», она будет составлять для обоих направлений – 12760 ч, что говорит об эффективности предложенной рекомендации по организации ремонта обмоток статоров.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ведяшкин М.В. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей / Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. // Известия ТПУ. Энергетика. – 2011. Т. 319 – №4. – С. 117–122.

2. Ведяшкин М.В. Эксплуатационная надежность асинхронных двигателей мостовых кранов / Муравлев О.П., Ведяшкин М.В. // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – №6. – С. 34–38.

Авторские свидетельства

3. Ведяшкин М.В. Программно-вычислительный комплекс «Расчет эксплуатационной надежности» / Ведяшкин М.В., Муравлев О.П., Ефремов А.А. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2012610252 от 10.01.2012.

Другие научные публикации по теме диссертации

4. Ведяшкин М.В. Особенности информационных данных при изучении эксплуатационной надежности асинхронных двигателей / Ведяшкин М.В. // XIV Международная научно-практическая конференция СТТ 24-28 марта 2008 г. г. Томск: ТПУ / сборник трудов в 3-х томах. Т. 1.- С. 350-352.

5. Ведяшкин М.В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин в процессе эксплуатации / Ведяшкин М.В. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной научно-технической конференции 17-19 октября 2007 г. г. Томск: ТПУ. – С. 49–51.

6. Ведяшкин М.В. Оценка ресурса асинхронных двигателей на этапах жизненного цикла. / Ведяшкин М.В., Муравлева О.О. // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования. Всероссийская научно-техническая конференция 12-14 мая 2008 г. г. Томск: ТПУ. – С. 214–216.

7. Ведяшкин М.В. Анализ методов оценки надежности электрических машин / Ведяшкин М.В. // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НГТУ, г. Новосибирск 4-7 декабря 2008г. – Т.3. – С. 60–62.

8. Ведяшкин М.В. Сбор и анализ данных по эксплуатационной надежности асинхронных двигателей / Ведяшкин М.В. // XV Международная научно-практическая конференция СТТ 4-8 мая 2009 г. / сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. - С. 377-378.

9. Ведяшкин М.В. Роль информации по эксплуатации в оценке надежности асинхронных двигателей / Ведяшкин М.В. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции 13-16 октября 2009 г. г. Томск: ТПУ. – С. 87–91.

10. Ведяшкин М.В. Оценка эксплуатационной надежности элементов крановых асинхронных двигателей / Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы V Международной научно-технической конференции 12-14 октября 2011 г. г. Томск: ТПУ. – С. 106–112.