

на правах рукописи

Гусев Валерий Вадимович

**МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы» и в Мирнинском политехническом институте филиала ФГАОУ ВПО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муравлев Олег Павлович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Шевчук Владимир Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Казанцев Юрий Михайлович

кандидат технических наук
Целебровский Игорь Викторович

Ведущая организация: Институт Физико-Технических
проблем Севера СО РАН (г. Якутск)

Защита диссертации состоится « 24 » ноября 2010 г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат диссертации разослан « 14 » октября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций,
кандидат технических наук, доцент _____ Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие добычи полезных ископаемых в алмазодобывающей промышленности АК «АЛРОСА» в настоящее время идет по пути роста производственной мощности. Вместе с тем, поддержание высоких темпов добычи ставит задачу обеспечения и сохранения надежности, качества эксплуатации и эффективности использования технических средств. Особое влияние на решение этой задачи оказывает эксплуатационная надежность электрических машин (ЭМ) переменного тока, являющихся основным элементом электропривода механизмов.

Эксплуатация ЭМ в алмазодобывающей промышленности связана с влиянием различных воздействующих факторов, как климатических, характерных для районов Крайнего Севера, так технологических, обусловленных условиями применения. В частности, ЭМ переменного тока, работающие в качестве приводов горно-шахтного оборудования, подвергаются комплексному воздействию тепла, вибрации, пыли, влаги и др. Так, колебания температуры воздуха в течение года в подземных выработках составляют от 6 до 15°C (на поверхности – от плюс 35 до минус 55°C), колебания значений относительной влажности – от 80 до 98% (на поверхности – от 22 до 100%), запыленности воздуха в подземных выработках – от 70 до 695 мг/м³.

Одним из основных инструментов в обеспечении надежности является широкое использование на всех стадиях жизненного цикла ЭМ методов и средств технической диагностики. Диагностика становится своеобразным индикатором, а возможно и гарантом качества и надежности оборудования.

Несмотря на ведущую роль показателей надежности, их использование для анализа и количественной оценки не нашло должного внимания в действующей системе эксплуатации и ремонта оборудования алмазодобывающей промышленности. До настоящего времени техническая диагностика является основным инструментарием в оценке технического состояния. Но насколько надежны подконтрольные объекты, какова их вероятность безотказной работы – этот вопрос остается открытым. Особенность заключается еще и в том, что надежность, как свойство ЭМ, нельзя измерить обычным для других характеристик или величин способом путем физических измерений с помощью измерительных приборов. Но ее можно количественно выразить на основе соответствующей теории – теории надежности, в основе которой лежит теория вероятности, позволяющая аналитически определить показатели надежности ЭМ, используя результаты технического диагностирования и систем наблюдений, являющихся функцией мониторинга.

Определить основные пути совершенствования системы управления эксплуатационной надежностью ЭМ можно только на основе методологии, получившей название системный анализ. Реализация принципов системного анализа позволяет найти оптимальные направления в обеспечении эффективности функционирования ЭМ на основании имеющихся данных эксплуатации, а также предоставляет возможность совершенствовать систему технической диагностики и технического обслуживания и ремонта (ТОиР) ЭМ.

Формализация процедур заложенных в системном анализе, таких как экспертные оценки, представит дополнительную априорную информацию.

В задаче обеспечения надежности важное место отводится количественным методам, базирующимся на вероятностно-статистических методах оценивания. Данные методы оценки дают приемлемые результаты, если обладают определенностью и однородностью информации. Однако эксплуатационная информация представляет собой специфические выборки, основной особенностью которых является отсутствие сведений о моментах отказов части контролируемых объектов. Данное явление носит название цензурированные данные.

Этап эксплуатации ЭМ является одной из важнейших стадий их существования и, следовательно, от организации обслуживания на этом этапе, в частности от периодичности проведения ТОиР, во многом зависит эффективность использования ЭМ. Совершенствование системы организации ТОиР на основе эксплуатационной надежности ЭМ с учетом результатов технического диагностирования и мониторинга позволяют обеспечить работоспособность ЭМ в алмазодобывающей промышленности и сделать ее адаптированной в сложных условиях эксплуатации.

Решение обозначенных проблем является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

Целью диссертационной работы является обеспечение эксплуатационной надежности электрических машин в алмазодобывающей промышленности на основе взаимодействия задач мониторинга и диагностического обследования с совершенствованием систем технического обслуживания и ремонта.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Рассмотреть концептуальные аспекты повышения эффективности функционирования ЭМ на основе системного анализа. Оценить влияние соотношения компонентов, составляющих систему повышения эффективности функционирования ЭМ, для формализованного принятия решения по обеспечению и сохранению надежности и качества эксплуатации ЭМ.

2. Произвести исследование и анализ информационного потенциала контролируемых параметров, полученных по результатам технического диагностирования и мониторинга.

3. Разработать математическую модель оценки эксплуатационной надежности ЭМ, учитывающую произвольные распределения до отказов и цензурированные данные.

4. Разработать алгоритмы расчета показателей надежности ЭМ, на основе которых создать программное обеспечение для ЭВМ.

5. Определить численные значения показателей эксплуатационной надежности ЭМ, используя статистические данные наработок и анализа отказов ЭМ по результатам диагностического контроля и мониторинга.

6. По результатам оценки показателей эксплуатационной надежности определить стратегию совершенствования системы ТОиР.

Методы решения задач. В процессе исследования использовались

методы системного анализа, теория электрических машин, теория вероятности, надежности, математической статистики, математического программирования, пакеты прикладных программ Word, Excel, MathCAD, Delphi, Диамант2, программа по оценке надежности ЭМ по эксплуатационным данным.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. На основе системного анализа функционирования энергомеханического оборудования разработана методология, определяющая эффективность эксплуатации и обслуживания ЭМ и позволяющая рассматривать в полном единстве взаимосвязей оценку эксплуатационной надежности, систему технического диагностирования и мониторинга, и техническое обслуживание и ремонт.

2. Для эксплуатации ЭМ, являющихся электроприводом вентиляторов главного проветривания подземного рудника, обоснованы модели оценки технического ресурса и проведена оценка информативных данных, полученных по результатам мониторинга и диагностического контроля.

3. Разработана и апробирована оригинальная математическая модель оценки эксплуатационной надежности ЭМ, отличающаяся от существующих тем, что позволяет учитывать произвольные распределения до отказов и цензурированные данные, а также эксплуатационную информацию ограниченного объема.

4. Синтезирован алгоритм оценки эксплуатационной надежности ЭМ на основе разработанной автором математической модели, который направлен на значительное упрощение задачи оценки показателей надежности в процессе мониторинга и диагностирования ЭМ.

5. Разработаны модели эксплуатационной надежности рудничного взрывозащищенного электрооборудования, определенные на срезе эксплуатационной информации с учетом установления критерия оценки технического состояния посредством диагностического контроля.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложен формализованный инструмент определения и соизмерения коэффициентов относительной важности элементов иерархической древовидной структуры, что, в свою очередь, является ценным дополнением к техническим и должностным инструкциям, показывая персоналу возможные варианты развития событий в зависимости от предпринимаемых действий в ходе обеспечения эффективности функционирования ЭМ.

2. Разработана программа для ЭВМ, обеспечивающая определение показателей надежности ЭМ по эксплуатационной информации, что позволяет оперативно устанавливать вид закона надежности и получать оценку параметров этого закона на основе установления функциональных связей между исследуемыми факторами и наработкой ЭМ по результатам мониторинга и диагностирования.

3. Получены объективные показатели эксплуатационной надежности на основе многоаспектной оценки фактических данных эксплуатации и апостериорной информации диагностического обследования и мониторинга, которые отражают действительное состояние ЭМ на временных отрезках

наработок в соответствии с влиянием воздействующих факторов, что позволят оценить эффективность эксплуатации ЭМ.

4. На основе фактических эксплуатационных показателей надежности ЭМ определены расчетные значения, устанавливающие график периодичности межремонтного периода обслуживаемого парка ЭМ в алмазодобывающей промышленности по действительному состоянию.

5. Предложены рекомендации по определению периодичности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования, сформулированные по результатам диагностических обследований и мониторинга технических средств, эксплуатируемых в алмазодобывающей промышленности.

Реализация результатов работы. Результаты диссертации использованы и внедрены в ЗАО АК «АЛРОСА» и Светлинской ГЭС ОАО «Вилуйская ГЭС-3» для определения показателей эксплуатационной надежности электрооборудования, составления планов ТОиР и выработки рекомендаций по диагностированию и обеспечению эффективности эксплуатации ЭМ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

➤ Методологические положения и принципы на основе системного анализа, определяющие эффективное функционирование ЭМ;

➤ Математическая модель определения эксплуатационных показателей безотказности ЭМ, учитывающая произвольные распределения до отказов и цензурированные данные, в соответствии с результатами мониторинга и диагностики;

➤ Алгоритм и программа для ЭВМ по оценке надежности ЭМ в эксплуатации, позволяющие проводить анализ показателей эксплуатационной надежности на основе установления функциональных связей между исследуемыми факторами и наработкой ЭМ по результатам диагностического обследования и мониторинга;

➤ Результаты исследования показателей эксплуатационной надежности ЭМ на основе итогов технического диагностирования и мониторинга, направленные на совершенствование ремонтно-обслуживающих воздействий.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г.Томск, 2006 - 2010 г.; на Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» г.Томск, 2007, 2009 г.; на Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г.Томск, 2008, 2010 г.; на Международной научно-практической конференции «Стабилизация экономического развития Российской Федерации», г. Пенза, 2008 г.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г.Новосибирск, 2008, 2009 г.; на Всероссийской конференции, г.Мирный, 2009г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 17 работах, в том числе в 5 статьях по списку ВАК, в 1 статье центральной печати,

11 докладах в материалах научно-практических конференций, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 165 страниц, включая 73 рисунка, 21 таблиц и списка литературы из 119 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 и практики технического диагностирования и мониторинга ЭМ. Рассмотрены основные стратегии ТОиР, принципы управления организацией ремонтных работ. В результате сформулированы основные положения и требования к обеспечению безотказности на этапе эксплуатации. Обоснован выбор методологии исследования – системный анализ. Раскрыто содержание этапов системного подхода для разработки системных методологических предпосылок, определяющих оптимальные пути управления надежностью ЭМ.

Проведен анализ системы диагностики электроэнергетического оборудования в алмазодобывающей промышленности и установлено, что концепция диагностического контроля не соответствует уровню и значимости эксплуатируемого парка оборудования и не полностью отвечает современным требованиям к подобным системам. Ремонтное диагностирование является основным средством выявления дефектов в ЭМ. Это и определяет сложившуюся структуру ремонтного и технического обслуживания с четкой регламентацией сроков и типов плановых ремонтов. В настоящее время в алмазодобывающем комплексе практикуется периодический индивидуальный контроль с использованием метода анализа виброакустических процессов того оборудования, которое в недостаточной степени охвачено инструментальными средствами, входящими в штатную систему контроля и защиты. Сложившаяся система диагностики позволила сформулировать основную концепцию с точки зрения реализации цели данного исследования.

Для оценки показателей надежности на стадии эксплуатации проведен анализ методов их расчета. Было выявлено, что проведение испытаний требует длительного промежутка времени и большого количества образцов, что приводит к практическим неопределимым трудностям, которые возникают при анализе надежности в процессе эксплуатации. При весьма ограниченном объеме информации не предоставляется в рамках традиционных статистических моделей осуществить достаточно достоверные оценки и прогнозы. В этой ситуации приходится вычислять по “неклассическим” выборкам, элементами которых являются как наработки отказавших, так и неотказавших объектов. Выборки такого типа получили наименование –

цензурированные. Информация о надежности ЭМ в условиях реальной эксплуатации представляется практически в виде цензурированных выборок. Эта информация значительно "дешевле" информации, получаемой в результате испытаний, поэтому применение методов оценивания по цензурированным выборкам имеет практическое значение в эксплуатационных режимах.

Третий раздел посвящен разработке логически и процедурно организованной последовательности операций обеспечения эффективности функционирования ЭМ. Поскольку теория систем оперирует определенными категориями, то для изложения методологии были конкретизированы: проблема, цель и система. Так, проблемой является координация концептуальных принципов оценки качественных показателей ЭМ, установленные на основе взаимодействия системы технической диагностики и системы оценки эксплуатационной надежности. Целью является повышение эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ. Система есть средство или условие, выполняющее процесс решения проблемы, т.е. дерево целей. Поэтапно структурируя цель, был выявлен полный набор элементов для построения дерева целей.

В сформированном дереве целей, нашел отражение весь комплекс мероприятий и дано содержательное описание подсистем, по достижению требуемой цели. Используя метод анализа иерархии, опирающийся на алгебраическую теорию матриц с экспертными процедурами, был формализован процесс описания древовидной иерархической структуры, что позволило определить коэффициенты относительной важности, устанавливающие вклад каждого элемента дерева целей, что является значимым в условиях многокритериальности. На основе ранжирования данных экспертов определены количественные и качественные показатели, отражающие надежность ЭМ в ходе эксплуатации.

В соответствии с принятыми методологическими аспектами в отношении ЭМ мощностью 2000 кВт, являющихся электроприводом вентиляторов главного проветривания (ВГП) подземного рудника, были обоснованы модели оценки технического ресурса и проведена оценка информативных данных. В частности, для прогнозирования долговечности узлов ЭМ были исследованы вибрационные характеристики подшипников скольжения ВГП ВОД-50 за период наблюдения работы более 76000 ч., начиная с 2001 года. Выходные параметры вибрации послужили основой в целях установления зависимости фактора времени эксплуатации на степень увеличения вибрации. Именно эти параметры наиболее объективно отражали уровень технического состояния деталей и узлов, а также развитие того или иного процесса старения, приводящего к появлению потенциальных отказов. В качестве признака, характеризующего потенциальные отказы, была использована 1-ая обратная частота для ВОД-50 №1 и 2-ая обратная частота для ВОД-50 №2. Динамика изменения гармонических составляющих на указанной частоте зафиксирована в полосе 2-4,5 Гц для ВОД-50 №1, и в полосе 6-8,8 Гц для ВОД-50 №2 (рис. 1, 2). На данной частоте были выделены гармонические составляющие, которые вносили наибольший вклад в нарушение эталона качества работы.

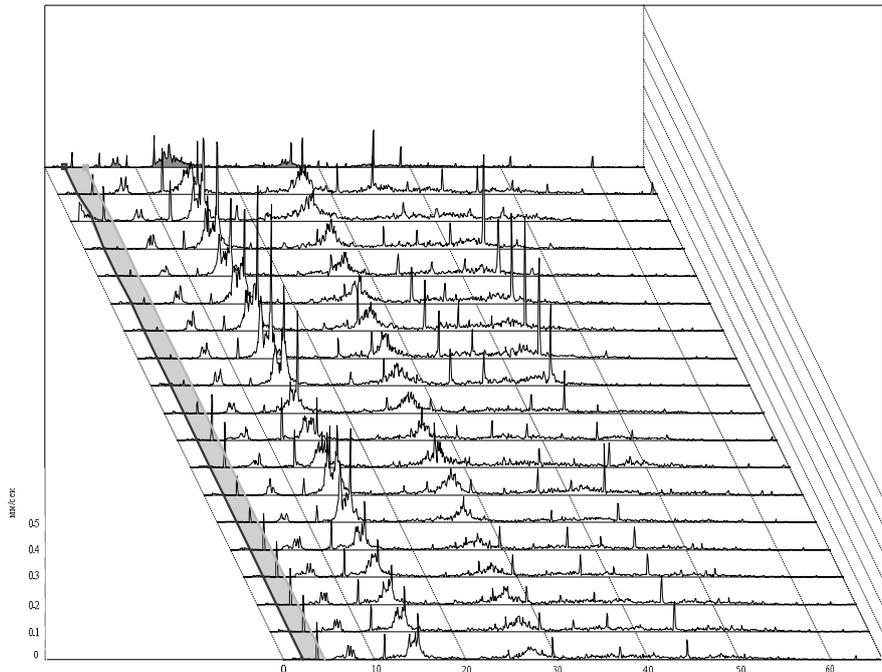


Рис. 1. Вибрационный каскад спектров в полосе 2-4,5 Гц по ВОД-50 №1

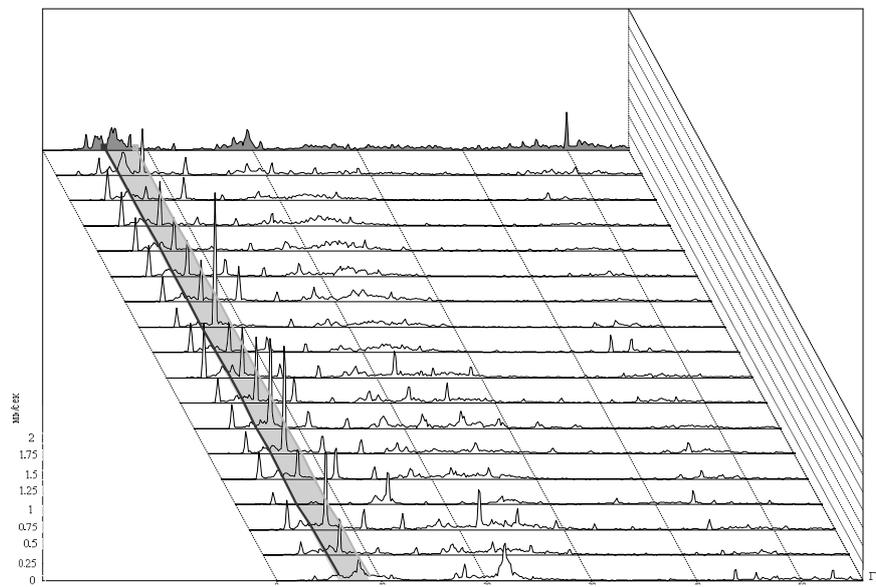


Рис. 2. Вибрационный каскад спектров в полосе 6-8,8 Гц по ВОД-50 №2

Проведение корреляционного анализа в логарифмических координатах зависимости изменения указанных выходных параметров от времени, позволило получить математическое описание реального процесса функционирования узлов синхронных машин в виде степенной функции (рис. 3). Установление границ достижения до предельного состояния для выбранного контролируемого параметра предоставляет возможность определить соответствующее время наработки, приводящее к появлению потенциальных отказов (износные разрушения деталей).

Полученные результаты указывают на достаточную достоверность уравнения регрессии, так для ВОД-50 №1 и №2 коэффициент корреляции $\rho_{yx} > 0,9$. Кроме того, проведенные исследования позволили определить гамма-

процентный ресурс, в течение которого объект не достигнет предельного состояния.

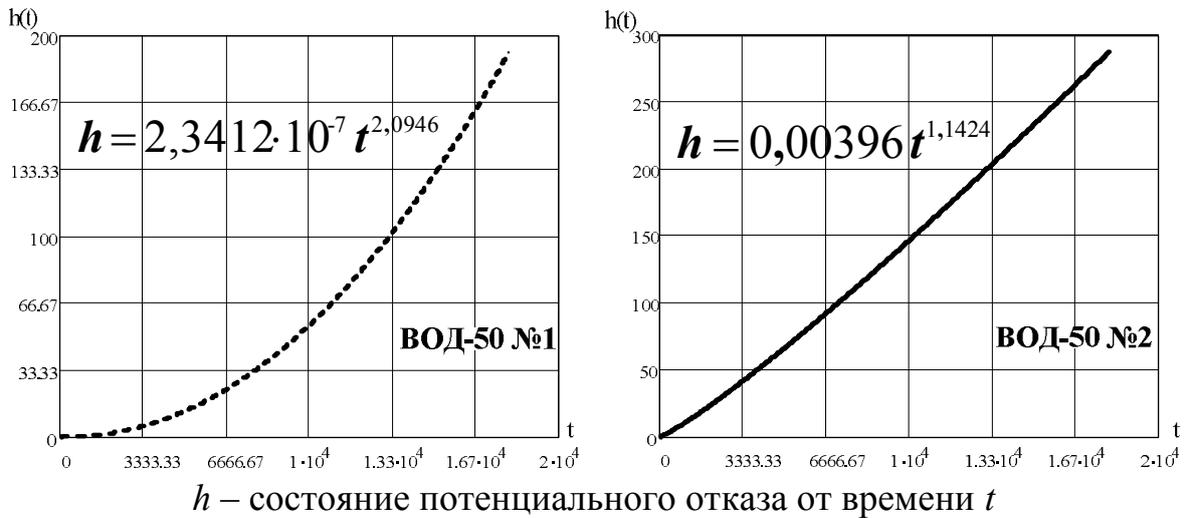


Рис. 3. Степень изменения состояния подшипников скольжения ВОД-50

Исходя из основной цели системного анализа эффективность эксплуатации и обслуживания ЭМ представляет собой степень соответствия реального результата процесса работы ЭМ требуемому. Поскольку данный процесс пребывания ЭМ в каком-либо положении является переходным, то для выбора оптимальных регламентов эксплуатации могут использоваться доли времени, при которых объект находится в различных состояниях или среднее время пребывания в различных состояниях. Использование марковской аппроксимации приводит к получению результата процесса такого действия. Для раскрытия внутренних связей эксплуатационных процессов и установления закономерностей этих связей и возможностей управления ими, с целью минимизацией ремонтных оперативных затрат, а также других потерь, связанных с восстановлением работоспособности, были построены структурные модели надежности ЭМ ВОД-50 на основе графа состояний. На рис. 4 представлена структурная модель надежности по обеспечению технического состояния резервного ВОД-50.

Характерной особенностью эксплуатации вентиляторных установок для проветривания подземных рудников является периодическое функционирование одного из двух вентиляторов ВОД-50, при этом неэксплуатируемый в данный период вентилятор находится в постоянной готовности. Безусловно, это неизбежно накладывает отпечаток на подход к системе подготовки данного оборудования к использованию по назначению. Поэтому для обеспечения максимального уровня надежности двух машин (ВОД-50) необходимо учесть согласованность следующих процессов: периодичность ТО; среднее время ТО; время устранения повреждений и отказов (ремонт); интенсивность отказа.

Задача описания марковского процесса переходов сводится к отысканию безусловных вероятностей каждого из состояния P_i для любого момента времени t , с использованием систем дифференциальных уравнений

Колмогорова. Расчет данных систем уравнений позволил определить вероятностные зависимости при различных состояниях графа.

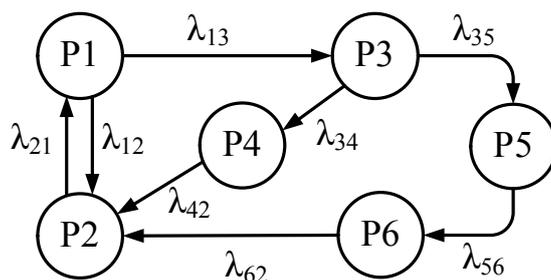


Рис. 4. Граф состояний резервированного ВОД-50 с периодическим контролем технического состояния

где $P1$ – работоспособное состояние (готовность к работе) основного и резервного объектов; $P2$ – периодический контроль при двух работоспособных объектах; $P3$ – работоспособное состояние (готовность к работе) одного из объектов; $P4$ – периодический контроль при одном работоспособном объекте; $P5$ – скрытый отказ второго объекта; $P6$ – периодический контроль при двух отказавших объектах. В случае, если для периодического контроля ЭМ выводятся из работоспособного состояния (состояния готовности), то работоспособными являются только состояния $P1$ и $P3$. Тогда основным показателем надежности можно считать суммарную вероятность $P_{1-3}=P1+P3$. Если же контроль осуществляется без отключения, то работоспособными являются состояния $P1, P2, P3, P4$, и основным показателем эксплуатационной надежности является суммарная вероятность $P_{1-4}=P1+P2+P3+P4$.

По исходным статистическим данным определены значения переходов графа для каждого соответствующего состояния. Поскольку в системе эксплуатации объекта ВГП для периодического контроля ЭМ выводятся из работоспособного состояния, то суммарной вероятностью считается P_{1-3} . Оценку уровня надежности резервных синхронных машин для случаев связанных при контроле с отключением определили по выражению:

$$P_{1-3} = \frac{1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}}}{1 + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{42}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{62}} \right)} \quad (1)$$

По данному показателю произвели моделирование ситуаций при различных значениях времени контроля технического состояния ЭМ и периодичности контроля (рис. 5).

Проведенное моделирование показало, что оптимальная периодичность контроля пропорциональна увеличению его продолжительности. При значении интенсивности отказов $\lambda = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ увеличение продолжительности ТО с 5ч до

55ч приводит к увеличению периодичности с 1 до 2 месяцев, при этом вероятность готовности резервного ВОД-50 снижается на уровень менее 1%.

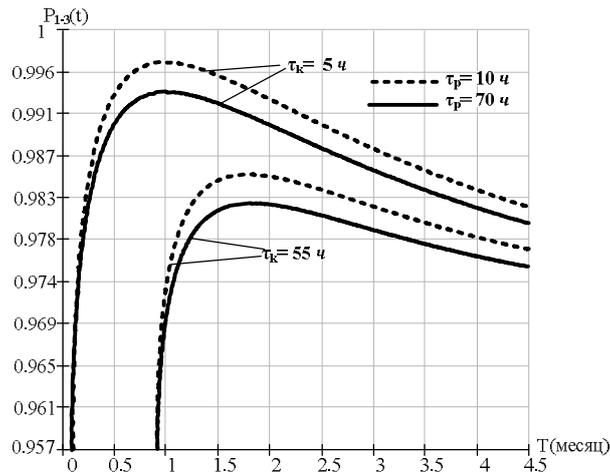


Рис. 5. Зависимость вероятности готовности резервного ВОД-50 от периодичности технического контроля

Обращает на себя внимание, что изменение периодичности ТО (особенно в сторону уменьшения) существенно снижает вероятность готовности объекта. Действительно, при увеличении периодичности, с одной стороны, увеличивается вероятность скрытого дефекта (отказа) до проведения ТО, однако, с другой стороны, уменьшается доля времени на ТО в общем ресурсе ВОД-50, и тем самым увеличивается вероятность состояния готовности объекта к использованию. Вариация интенсивности влияния таких факторов как интенсивность отказа, периодичность контроля, среднего времени контроля, обуславливает наличие экстремумов на графиках функции. Таким образом, учитывая вышеприведенный расчет, а также требования безопасности при эксплуатации рудников опасных по выделению газа и нефтепродуктов в качестве оптимальной периодичности и продолжительности ТО для ВОД-50 принято 18 ч в 1 месяц.

Исследование ЭМ с использованием марковских процессов способствовало определению эффективности системы ТО по величине функционала, характеризующего время пребывания ВОД-50 в состояниях ТО и восстановления по отношению ко времени нахождения в работоспособном состоянии при определённом уровне технической готовности:

$$J = \left[\int_0^t P3(t)dt + \int_0^t P4(t)dt + \int_0^t P5(t)dt + \int_0^t P6(t)dt \right] / T, \quad (2)$$

где T – период непрерывного функционирования.

Четвертый раздел посвящен оценке технического состояния ЭМ вероятностно-статистическим методом. Обоснован процесс формирования эксплуатационного массива данных для статистического анализа надежности ЭМ и предложена схема натурного обследования технического состояния ЭМ

на различных участках технологического процесса алмазодобычи учитывающая цензурированные выборки (ЦВ). Причинами ЦВ являются две категории: внешние и внутренние. К внешним причинам относятся следующие признаки:

- разное время начала и окончания эксплуатации ЭМ;
- снятие с испытаний или с эксплуатации некоторых ЭМ по организационным причинам или из-за отказов составных частей;
- перевод ЭМ из одного режима работы в другой в процессе эксплуатации;
- необходимость оценки надежности до наступления отказов всех испытываемых ЭМ;
- периодический контроль ЭМ, приводящий к поступлению информации о надежности в виде интервалов наблюдений.

Внутренние причины обусловлены свойством безотказности самой ЭМ и для этой категории необходим учет причин отказов по заданным показателям технического диагностирования.

При разработке математической модели (ММ) оценки эксплуатационной надежности ЭМ приняты следующие допущения:

- считается, что наработки до отказа и до цензурирования являются статистически независимые;
- результаты получены с использованием одного из планов $[NUr]$, $[NUT]$, $[NUz]$;
- анализируемые объекты идентичны по устройству, назначению и условия эксплуатации относительно однородны;
- в качестве исходных данных для статистической обработки эксплуатационной информации возможно применять случайные наработки до отказов и стохастически цензурированные наработки по статистически подобным техническим системам по принятым статистическим планам;
- 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: экспоненциальная, нормальная, логарифмически-нормальная и Вейбулла.

Опираясь на данные допущения, представляется возможным построить математическую модель, на базе которой можно дать строгое количественное описание процессов, влияющих на эксплуатационную надежность ЭМ, эксплуатирующихся в различных системах технологического процесса алмазодобычи. На рис. 6 представлен алгоритм реализации ММ для вычисления статистической оценки надежности.

Представленная модель включает в себя следующие компоненты:

1. В блоке № 1 организуется сбор и классификация исходных данных в соответствии со схемой натурного обследования технического состояния ЭМ на различных участках технологического процесса алмазодобычи.

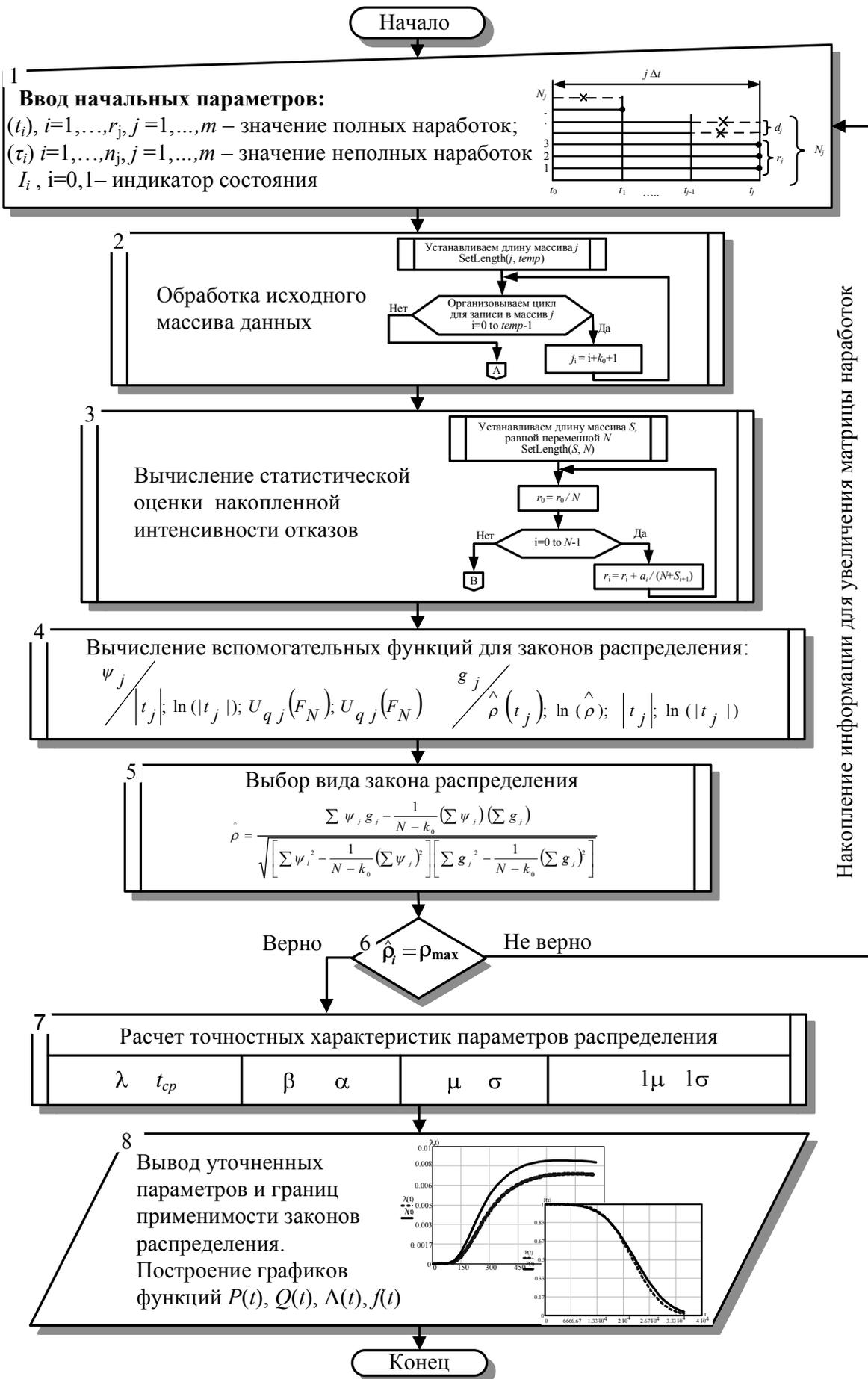


Рис. 6. Алгоритм математической модели оценки надежности

2. В блоке № 2 производится обработка исходного массива данных (сортировка данных, определение длины массива, цикл для записи).

3. В блоке № 3 – вычисление статистической оценки накопленной интенсивности отказа.

4. В блоке № 4 производится вычисление вспомогательных функций для определенных законов распределения (экспоненциальный, Вейбулла нормальный, логарифмически нормальный).

5. В блоках № 5 и 6 осуществляется выбор вида закона надежности, руководствуясь мерой оценки параметров законов распределения.

6. В блоке № 7 производится уточнение значений определенного закона распределения и определяются границы применимости соответствующего закона.

7. Блок № 8 служит для вывода точностных характеристик параметров распределения и вывода графиков.

Представленный подход не противоречит классическим моделям теории надежности, а лишь расширяет их. Математическая модель справедлива для любого закона распределения, так как в нее не внесено никаких ограничений на величину интенсивности отказа λ . С учетом введенных допущений ММ позволяет последовательно рассматривать значения накопленной интенсивности отказов в разных точках (интервалах) временного диапазона. Это дает возможность значительно сократить период наблюдений без ущерба для представительной выборки.

Обоснован подход оценивания параметров выборочной совокупности наработок до отказа и цензурирования в математической модели.

На основе ММ синтезирована алгоритмическая модель, позволившая создать программное обеспечение для ЭВМ. Для исследования чувствительности ММ к изменению исходных данных произведено статистическое моделирование с использованием разработанной программы. Адекватность ММ оценивалась критерием, представляющим отношение среднестатистической оценки средней наработки до отказа к средней наработке до отказа, вычисляемой по разработанной программе, $T=T_{cp}/T_{по}$. В качестве исходных данных использовались выборки, свойственные определенному закону распределения: экспоненциальный, Вейбулла, нормальный.

Далее производилось изменение глубины цензурирования наработок. Установлено, что с увеличением объема выборки диапазон отклонений границ средней наработки до отказа уменьшается, а вероятность попадания в интервал увеличивается. Допустимый минимальный объем выборки $N \geq 8$. С увеличением глубины цензурирования выборки диапазон отклонений границ средней наработки до отказа увеличивается (допустимый уровень $0,4 \div 0,5 N$).

Предварительный анализ эксплуатационной информации показал, что для ЭМ наиболее распространенными причинами отказов и повреждений являются разрушение изоляции обмотки статора и ротора, увлажнение обмоток, износ подшипников, нарушение центровки, технологические перегрузки. Также, наблюдается значительный разброс и неравномерность наработки на отказ как ЭМ в целом, так и их отдельных узлов. Систематизация статистических данных

позволила получить динамику по отказам в зависимости от частоты вращения (рис. 7).

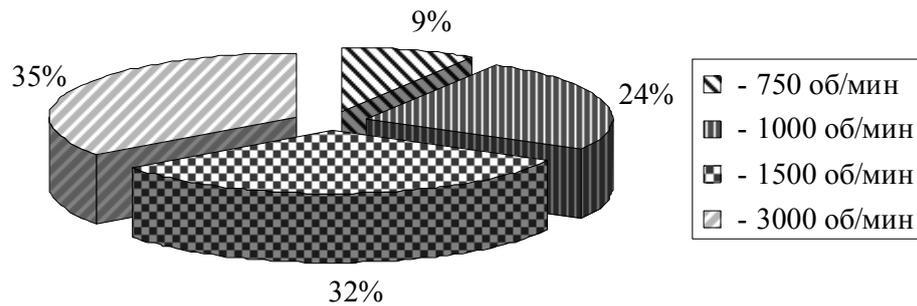


Рис. 7. Структура отказов в зависимости от частоты вращения

Диаграмма наглядно демонстрирует, что в основном преобладают отказы ЭМ с частотой вращения от 1000 об/мин и выше. Определяющие факторы, обуславливающие данные отказы, часто связаны с возрастающим уровнем вибрации и недостаточной уравновешенностью вращающихся частей машины или ее небалансом, а также с технологической культурой эксплуатации.

Отмечены сложившиеся закономерности отказов ЭМ в зависимости от серии изготовления. Ретроспективный анализ эксплуатационных данных позволил классифицировать количество отказов по сериям (рис. 8) и определить удельную долю отказов каждой серии рассматриваемого оборудования в их общей сумме (рис. 9).

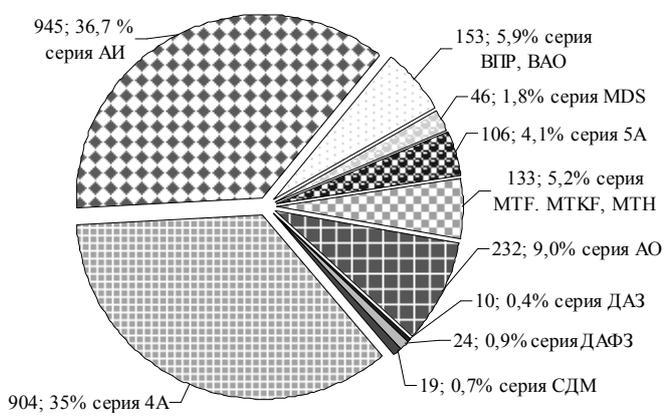


Рис. 8. Общая количественная оценка отказов по сериям электрических машин

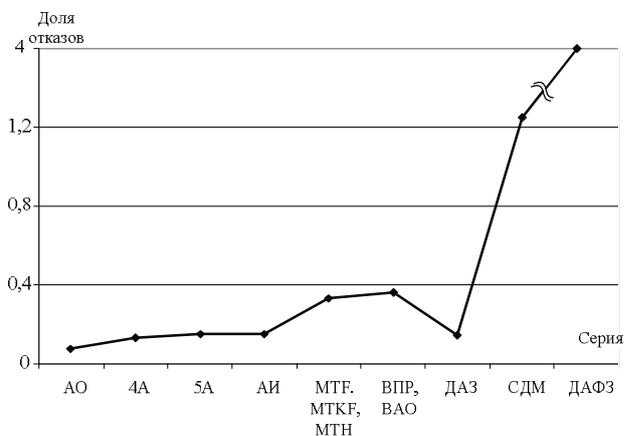


Рис. 9. Удельная доля отказов по сериям электрических машин

Обработка эксплуатационной информации показала, что в большинстве случаев конструкции ЭМ далеки от соблюдения равнопрочности.

На основе метода оценки надежности по малым цензурированным выборкам, используя результаты эксплуатационных наблюдений и апостериорную информацию диагностического обследования и мониторинга, были получены количественные характеристики по эксплуатационной надежности ЭМ рудничного взрывозащищенного исполнения, общепромышленного назначения и элементов электротехнического оборудования с учетом условий эксплуатации. Статистическая точность

показателей надежности оценивалась посредством доверительных интервалов с коэффициентом доверия не ниже 0,9. Результаты расчетов показателей эксплуатационной надежности для горно-проходческого комбайна АМ-75 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели эксплуатационной надежности электротехнического оборудования горно-проходческого комбайна

Элемент оборудования	Вид распределения	Функция плотности распределения $f(t)$	Нижняя граница T_1 , час	Верхняя граница T_2 , час
Электродвигатель режущего органа d2PRWX250/31-4KL	Логарифмически-нормальный	$f(t) = \frac{2,38}{t} e^{-17,30(\ln(t)-8,91)^2}$	7720	9483
Электродвигатель гидравлич. привода SP2225L-4	Логарифмически-нормальный	$f(t) = \frac{0,98}{t} e^{-3,06(\ln(t)-9,51)^2}$	8814	11298
Электродвигатель погрузоч. устройства 2SG4225S-4	Вейбулла	$f(t) = 1,7 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t}{1,18}\right)^{0,9} e^{-\left[\frac{t}{1,18}\right]^{0,9}}$	8085	9356
Электродвигатель станции водяных насосов dAM132SX4AX	Нормальный	$f(t) = 4,3 \cdot 10^{-5} e^{-5,79 \cdot 10^{-9} \cdot (t-25067,30)^2}$	23082	27051
Магнитная станция	Нормальный	$f(t) = 1,5 \cdot 10^{-4} e^{-7,43 \cdot 10^{-8} (t-11506,74)^2}$	9248	13764

Полученные показатели надежности, определенные на срезе эксплуатационной информации по заданным критериям оценки технического состояния, позволяют учитывать вклад каждого элемента электротехнического оборудования в общей вероятности безотказной работы горно-проходческого комбайна АМ-75. Для удобства пользования полученный результат был представлен в виде карты надежности.

Среди рудничного подземного электрооборудования были рассмотрены составные элементы электротехнического оборудования самоходного вагона 5BC-15M, вентиляторы местного проветривания рудников и определены фактические модели эксплуатационной надежности (табл. 2).

Таблица 2. Показатели эксплуатационной надежности шахтных вентиляторов местного проветривания

Элемент оборудования	Вид распределения	Функция надежности $P(t)$	Нижняя граница T_1 , час	Верхняя граница T_2 , час
ВМЭ-12, P = 110 кВт	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-22418,36}{5943,87}\right)$	20714	24122
ВМЭВО-8, P = 90 кВт	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-14974,51}{4117,36}\right)$	12420	16191
ВМЭВО-6, P = 25 кВт	Логарифмически-нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\ln t - 11,38}{1,19}\right)$	10249	13159

Для подшипниковых узлов ЭМ шахтных вентиляторов, работающих в сложных геологических условиях подземных выработок рудников с достаточно высоким уровнем запыленности, характерен прогрессирующий абразивный износ рабочих поверхностей подшипников, поэтому и вероятность возникновения таких отказов зависит от длительности наработки.

По данным эксплуатации произведен анализ технического состояния и расчет показателей надежности ЭМ общепромышленного назначения по оборудованию обогатительных фабрик, котельных установок и насосных станций и компрессорных станций. В табл. 3 указаны частичные данные обогатительных фабрик.

Таблица 3. Показатели эксплуатационной надежности оборудования фабрик

Тип оборудования	Серия	Технические параметры	Число отказов, n	Средняя наработка до отказа, час	Нижняя граница T_1 , час	Верхняя граница T_2 , час
Мельница ММС	СДМ	$P=1600$ кВт 1000 об/мин	19	8608	7464	10741
	ДАФЗ	$P=4000$ кВт 750 об/мин	24	7561	6143	9782
Классификатор	4А, АИ	$P=7,5$ кВт 1500 об/мин	20	9016	7626	11805
Элеватор	4А	$P=18,5$ кВт 1000 об/мин	14	15438	13021	17284
	4А	$P=30$ кВт 1500 об/мин	19	15249	13829	16617

Величины T_1 , T_2 определяют доверительные интервалы для средней наработки до первого отказа и накрывают истинное значение математического ожидания случайной величины наработок.

Адекватность использованной в диссертационной работе модели оценки эксплуатационной надежности на основе цензурированных выборок подтверждается непротиворечивостью полученных показателей надежности по ЭМ, а также элементов электротехнического оборудования с рядом других работ, выполненных на основе статистических данных большого объема.

Пятый раздел посвящен совершенствованию системы организации ТОиР ЭМ. Применения в современных установках сложных гидравлических, механических и электрических систем управления в последние годы все труднее обеспечить необходимый уровень эксплуатационной надежности ЭМ без установления эффективной системы ТОиР. Сложность функционирования по назначению, случайность действия климатических, режимных и некоторых других факторов требуют разработки основных характеристик системы ТОиР с применением вероятностно-статистических методов исследования. Результатом обобщения межремонтного периода является увеличение числа unplanned ремонтов и восстановлений, что приводит к увеличению затрат. В соответствии с вышесказанным стратегия ТОиР должна опираться частично не на детерминированную систему планово-предупредительного ремонта, а на

стохастическую систему, предусматривающую проведение ремонтно-обслуживающих воздействий в зависимости от состояния элементов ЭМ.

Исходя из факта вероятностно-статистических характеристик эксплуатационной надежности определены оптимальные периодичности ремонтно-восстановительных воздействий для ЭМ, задействованных в конкретных горнотехнических условиях. Некоторые результаты расчета определения межремонтного периода для ЭМ рудничного взрывозащищенного исполнения отражены в табл. 4 и графически представлены на рис 10. На рис. 10 принято следующее обозначение: $\hat{1}$, $\hat{2}$, $\hat{3}$, $\hat{4}$ соответствуют эмпирическим функциям интенсивности отказов ЭМ и 1, 2, 3, 4 представляют теоретические функциям интенсивности отказов соответственно для данных машин.

Таблица 4. Результаты расчета межремонтного периода электрических машин рудничного взрывозащищенного исполнения

Вычисляемые параметры	ВМЭ-12	ВМЭВО-8	ВМЭВО-6	2SG4225S-4
Обозначение на графике	1	2	3	4
Межремонтный период $T_{МП}$	19780	11250	9670	8120
Нижняя граница T_1 , ч	19120	10510	9130	7440
Верхняя граница T_2 , ч	20440	11980	10220	8790

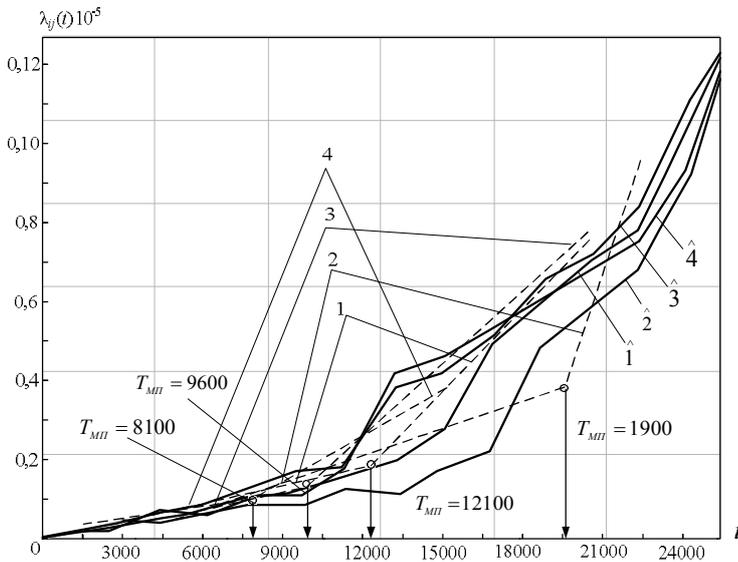


Рис. 10. Межремонтный период электрических машин рудничного взрывозащищенного исполнения

Сопоставление расчетных значений межремонтного периода с действующими графиками ТОиР обслуживаемого оборудования позволило скорректировать план ремонтно-обслуживающих мероприятий, а в отношении горно-проходческих комбайнов установить конкретные межремонтные сроки, поскольку как таковые ЭМ в графиках ремонта на данных агрегатах не отражались.

По итогам накопленного опыта диагностирования оборудования, эксплуатируемого в алмазодобывающей промышленности, даны рекомендации по определению периодичности вибродиагностического контроля технических средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет законченную научно-исследовательскую работу, в которой решен комплекс научно-практических задач, заключающихся

в получении объективных показателей эксплуатационной надежности ЭМ на основе многоаспектной оценки фактических данных эксплуатации и апостериорной информации диагностического обследования и мониторинга, позволяющие совершенствовать систему ТОиР.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Определена стратегическая концепция по обеспечению эффективности функционирования ЭМ. Основным содержанием концепции является обеспечение эксплуатационной надежности ЭМ в алмазодобывающей промышленности на основе взаимодействия задач мониторинга и диагностического обследования с совершенствованием систем технического обслуживания и ремонта. На стадии эксплуатации в условиях недостаточной информации исходных данных о надежности и их параметров оценку эксплуатационной надежности следует проводить с использованием теории цензурированных выборок. Совершенствование методов оценки эксплуатационной надежности ЭМ на основе указанной теории послужит инструментарием в процессе установки показателей надежности ЭМ.

2. Разработана методология определяющая эффективность функционирования ЭМ, разрешившая конкретизировать перечень элементов, определяющих эффективность эксплуатации и обслуживания ЭМ, и позволяющая рассматривать в полном единстве взаимосвязей оценку эксплуатационной надежности, систему технического диагностирования и мониторинга, и техническое обслуживание и ремонт.

3. Разработана математическая модель реального процесса функционирования узлов синхронных машин по результатам технического диагностирования и мониторинга. Численным моделированием статистических данных определена оптимальная периодичность и продолжительность технического обслуживания.

4. Обоснован процесс формирования эксплуатационного массива данных для статистического анализа надежности ЭМ и предложена схема натурного обследования технического состояния ЭМ на различных участках технологического процесса алмазодобычи, учитывающая ЦВ.

5. Разработана математическая модель оценки эксплуатационной надежности ЭМ, учитывающая произвольные распределения до отказов и цензурированные данные.

6. На основе математической модели синтезирована алгоритмическая модель и реализующее ее программное обеспечение. Программа позволяет оперативно исследовать влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на показатели надежности ЭМ на основе установления функциональных связей между исследуемыми факторами и наработкой ЭМ по результатам мониторинга и диагностического обследования.

7. По результатам эксплуатационных наблюдений и итогам технического диагностирования и мониторинга проведено описание и анализ отказов с позиций условий их формирования и развития. Получены фактические количественные характеристики показателей эксплуатационной надежности, отражающие работоспособность ЭМ рудничного взрывозащищенного

исполнения и общепромышленного назначения в алмазодобывающей промышленности. С учетом условий эксплуатации и воздействующих при этом факторов определены границы характеристики надежности. На основе объективных показателей надежности представлены адаптивные математические модели, дающие полное представление о свойстве безотказности рудничного электрооборудования. Классифицированы отказы ЭМ, изготовленных по серийному технологическому циклу, в зависимости от мощности и частоты вращения.

8. Разработана стратегия совершенствования системы организации ТОиР ЭМ по действительному состоянию и периодичности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Гусев В.В.** Показатели безотказности электрических машин в реальных условиях эксплуатации алмазодобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. – 2010 – Т.316. – №4 – С. 178–183.

2. **Гусев В.В.** Методологические предпосылки к оценке эксплуатационной надежности электрических машин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т.313. – №4 – С. 110–114.

3. Муравлев О.П., Шевчук В.П., **Гусев В.В.** Информационное обеспечение для оценки надежности электрических машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1. – С. 183–191.

4. **Гусев В.В.**, Муравлев О.П., Шевчук В.П. Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе // Известия Томского политехнического университета. – 2009 – Т.314. – №4 – С. 74–78.

5. Муравлев О.П., **Гусев В.В.**, Шевчук В.П. Оценка показателей долговечности узлов электрических машин на основе информации диагностирования и мониторинга // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. №6 С. 42–46.

Авторские свидетельства

7. **Гусев В.В.**, Шевчук В.П. Программа оценки надежности электрических машин по эксплуатационным данным. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614199. Роспатент. Москва, 12.08. 2009.

Публикации в рецензируемых журналах, сборниках научных трудов

8. Шевчук В.П., **Гусев В.В.** Методика оценки эксплуатационной надежности электрических машин // Электрика. 2009. №3 С. 26–31.

9. Шевчук В.П., **Гусев В.В.** Диагностирование технического состояния электрических машин экскаваторов // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 17-19 октября 2007 г. Томск: ТПУ, 2007. – С. 34–38.

10. **Гусев В.В.** Анализ надежности электрических машин в реальных условиях эксплуатации // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 358–360.

11. Шевчук В.П., **Гусев В.В.** Принципы оценки эффективности работы электрических машин // Стабилизация экономического развития Российской Федерации. VII Международная научно-практическая конференция (октябрь - 2008): сборник статей. – Пенза: РИО ПГСХА, 2008. – С. 230–232.

12. Шевчук В.П., **Гусев В.В.** Формирование эксплуатационных данных по оценке надежности электрических машин // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. (04 – 07 декабря 2008 г.) Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. Часть 3 – с. 80–82.

13. **Гусев В.В.** Система информационного обеспечения статистической информации в алмазодобывающей отрасли // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире. Материалы докладов I Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 25-26 марта 2009. – Якутск: Изд-во Якутского госуниверситета, 2010. – С. 109–114.

14. **Гусев В.В.** Принцип совершенствование системы организации технического обслуживания и ремонта электрических машин в алмазодобывающей промышленности // XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 411–412.

Личный вклад автора. Публикации [1, 2, 10, 13, 14] выполнены без соавторов. В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежит: предложения процесса формирования эксплуатационного массива данных [3, 11], схема натурного испытания [12], разработка метода оценки [5], методологические аспекты [2, 4], разработка математической модели [8], синтез основных расчетных модулей программного комплекса [7], проведение математического моделирования [9].