

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

На правах рукописи

Шевчук Владислав Алексеевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В
АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор отделения
электроэнергетики и электротехники
Однокопылов Георгий Иванович

Томск - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1. АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... | 10 |
| 1.1. Проблема надёжности электрических машин..... | 10 |
| 1.2. Отказы электрических машин в алмазодобывающей промышленности..... | 13 |
| 1.3. Основные положения технической диагностики..... | 17 |
| 1.4. Диагностика электрических машин в алмазодобывающей промышленности..... | 21 |
| 1.5. Система технического обслуживания и ремонта электрических машин..... | 25 |
| 1.6. Постановка задач исследования..... | 28 |
| 2. АНАЛИЗ ВЫЖИВАЕМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... | 30 |
| 2.1. Массив исходных данных по эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока алмазодобывающего комплекса..... | 30 |
| 2.2. Алгоритм анализа выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности..... | 34 |
| 2.3. Анализ выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности..... | 35 |
| 2.4. Выводы..... | 41 |
| 3. СИСТЕМАТИЗИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... | 42 |

| | |
|---|-----|
| 3.1. Обоснование выбора системного подхода для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности..... | 42 |
| 3.2. Разработка дерева целей для задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин режущего органа проходческого комбайна АМ-75..... | 47 |
| 3.3. Выводы..... | 55 |
| 4. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ШАХТНОГО ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА..... | 57 |
| 4.1. Основные характеристики вентильного и вентильно-индукторного электродвигателей..... | 57 |
| 4.2. Построение деревьев отказа асинхронного, вентильного и вентильно-индукторного электродвигателей..... | 59 |
| 4.3. Расчет интенсивности отказов..... | 61 |
| 4.4. Выводы..... | 74 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 75 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ..... | 77 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 78 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 81 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Статистические данные по наработке электрических машин эксплуатируемых в алмазодобывающем комплексе АК "АЛРОСА". | 93 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Экспертные оценки согласно дереву целей обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75..... | 120 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты внедрения..... | 122 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Алмазодобывающая промышленность России в основном находится в Республике Саха (Якутия), где сосредоточено 88% всех ресурсов страны. В г. Мирный добыча происходит шахтным методом в двух подземных рудниках АК «АЛРОСА» в агрессивных природных условиях Крайнего Севера. Горное оборудование подвергается повышенной запылённости, влажности, резким перепадам температур, вибрации и другим факторам. Поэтому возможен внезапный выход из строя электрических машин (ЭМ), являющихся основой горного оборудования, что способствует невосполнимым экономическим потерям, ставит под угрозу безопасность персонала и способно привести к техногенной катастрофе. Юридической основой обеспечения промышленной безопасности служит Постановление Правительства РФ от 28.03.2001 № 241 О мерах обеспечения на территории РФ промышленной безопасности опасных производственных объектов (с изменениями от 1 февраля 2005 г. и 22 апреля 2009 г.). Прогнозирование и обеспечение необходимого уровня эксплуатационной надёжности ЭМ, а также снижение рисков техногенных катастроф является первостепенной задачей для алмазодобывающего комплекса и постоянно нуждается в применении современных решений.

Значительный теоретический и экспериментальный вклад в решение проблем надёжности ЭМ принадлежит О.Д. Гольдбергу, Э.К. Стрельбицкому, Ю.П. Похолкову, О.П. Муравлёву, Б.Н. Ванееву, А.А. Пястолову, И.П. Копылову и другим.

Диссертационная работа направлена на поиск возможностей прогнозирования отказов ЭМ и оборудования и совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

Объектом исследования являются ЭМ переменного тока, эксплуатируемые в условиях горнорудной промышленности.

Предметами исследования являются методы прогнозирования эксплуатационной надёжности ЭМ.

Цель работы. Обеспечение и прогнозирование эксплуатационной надёжности ЭМ переменного тока, и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Собрать и проанализировать данные об отказах горного оборудования, эксплуатируемого в условиях рудников АК «АЛРОСА» методами анализа выживаемости. Выявить оборудование и узлы ЭМ наиболее подверженных отказам. Определить критические интервалы времени, при которых вероятность выхода из строя наиболее велика.

2. Разработать методику прогнозирования эксплуатационной надёжности на основе полученных данных и анализа выживаемости, которая позволит анализировать полные и цензурированные данные.

3. Разработать дерево целей (систему), где главной целью является обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности и определить полный спектр мероприятий по её достижению. Определить критерий системы, который оказывает наибольшее влияние на достижение главной цели.

4. Разработать дерево отказов для асинхронного (АД), вентильного (ВД) и вентильно-индукторного (ВИД) электродвигателей и определить, с помощью имеющихся данных об отказах, интенсивности отказов их элементов и методом сравнительного анализа определить тип двигателя, эксплуатация которого наиболее эффективна в условиях алмазодобывающей промышленности.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. «Кривая выживаемости» для ЭМ переменного тока, эксплуатируемых в условиях подземных рудников, получена с помощью собранного статистического материала об отказах и метода множительных оценок Каплана-Мейера. Предназначена для прогнозирования отказов ЭМ и оборудования и совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

2. Методика прогнозирования эксплуатационной надёжности ЭМ переменного тока на основе множительных оценок Каплана-Мейера, позволяющая определить критические интервалы времени, при которых отказ наиболее вероятен.

3. Структурная модель задачи обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности, которая с помощью метода анализа иерархий позволяет определить наиболее эффективные пути решения задачи.

4. Обоснование выбора эффективного электродвигателя по показателю интенсивности отказов для электропривода (ЭП) режущего органа промышленного комбайна АМ-75.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью поставленных задач; корректным применением математических методов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: математическая статистика, метод анализа выживаемости, метод множительных оценок Каплана-Мейера, метод анализа иерархий, метод экспертных оценок, метод дерева целей, метод дерева отказов, теория надёжности ЭМ, теория ЭМ. В работе было использовано следующее программное обеспечение: MS Word, MS Excel, Statistica.

Научная новизна:

1. Методом анализа выживаемости и с помощью собранных эксплуатационных данных об отказах ЭМ получены оценки выживаемости электрооборудования, эксплуатируемого на промышленных площадках АК «АЛРОСА». Данные зависимости позволяют определить интервалы времени, при которых отказ наиболее вероятен, а также выявить оборудование наиболее подверженное отказам.

2. Предложен метод прогнозирования эксплуатационной надёжности ЭМ переменного тока, эксплуатируемых в алмазодобывающей промышленности, основанный на методе анализа выживаемости. Метод позволяет анализировать полные и цензурированные статистические данные и построить «кривую выживаемости», которая позволяет определить критическое время оборудования и его узлов.

3. Разработана структурная модель обеспечения эксплуатационной надёжности режущего органа проходческого комбайна АМ-75, эксплуатируемого в условиях

подземного рудника АК «АЛРОСА», где элементами модели является мероприятия по поддержанию эксплуатационной надёжности ЭМ. На основе метода анализа иерархий модель позволяет определить спектр мероприятий для достижения необходимого уровня эксплуатационной надёжности и выявить элементы, имеющие наиболее сильное влияние на эксплуатационную надёжность.

4. Проведён сравнительный анализ асинхронного, вентильного и вентильно-индукторного двигателей для обоснования и улучшения показателей эксплуатационной надёжности ЭП режущего органа промышленного комбайна АМ-75.

Практическая ценность работы:

1. Разработан учебный модуль «Обеспечение и прогнозирование эксплуатационной надёжности ЭМ методами системного анализа» для дисциплины «Испытания и техническая диагностика ЭМ и аппаратов» направления ООП 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника».

2. Предложена методика прогнозирования эксплуатационной надёжности ЭМ переменного тока на основе множительных оценок Каплана-Мейера, позволяющая получить оценки выживаемости и определить интервалы времени, при которых вероятность отказа наиболее высока [1, 2]. Получены оценки выживаемости ЭМ переменного тока, эксплуатируемых в условиях подземных рудников АК «АЛРОСА», позволяющие прогнозировать вероятность отказов ЭМ и усовершенствовать систему технического обслуживания и ремонта [3].

3. Решена задача обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 методом анализа иерархии [4-9], которая совместно с полученными экспертными оценками позволяет определить наиболее эффективное решение задачи при наличии альтернатив.

4. Обосновано применение ВИД в составе ЭП режущего органа проходческого комбайна АМ-75 [10, 11].

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с паспортом специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты в диссертации содержатся исследования согласно пункту

5, который позволил разработать подход, обеспечивающий надёжность функционирования ЭМ в процессе эксплуатации и в составе рабочих комплексов.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы использованы на АК «АЛРОСА» в г. Мирный в виде: методики прогнозирования эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока, дерева целей задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин, обоснования применения вентильно-индукторного электродвигателя в составе электропривода режущего органа проходческого комбайна АМ-75; а также в учебном процессе Инженерной школы энергетики НИ ТПУ при подготовке магистрантов по направлению 13.04.02 (Электроэнергетика и электротехника) по дисциплине «Испытания и техническая диагностика электрических машин и аппаратов».

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах научной работы: обзор и анализ литературы по тематике работы, постановка задач исследования, сбор исходного материала, его анализ и интерпретация результатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на конференциях и форумах: Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию Политехнического института (филиал) СВФФ им. М.К. Аммосова в г. Мирном "Наука и инновационные разработки - Северу", 10-12 марта 2014 г., Мирный, Россия; VII Международная студенческая электронная научная конференция "Студенческий научный форум - 2015", 15 февраля-31 марта 2015 г., Саратов, Россия; Молодёжь и научно-технический прогресс в современном мире, 13-14 октября 2015 г., Москва, Россия; IV Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», 10-14 октября 2016 г., Томск, Россия; V Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», 9-13 октября 2017 г., Томск, Россия; VI Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития технических наук», 11 июля 2019 г., г. Челябинск; VI Международная научно-

практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике», 11 августа 2019 г., г. Ростов-на-Дону.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, среди которых 2 статьи опубликованы в журнале, рекомендованном ВАК РФ и в 3 статьях, опубликованных в изданиях Scopus и Web of Science.

Структура и объём работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы из 119 наименований. Объём диссертации составляет 123 с., включая 14 рис., 21 табл., приложений на 30 с.

1. АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Проблема надёжности электрических машин

Для промышленности, вроде алмазодобывающей, важной задачей является повышения производительности труда. Одним из наиболее эффективных методов решения является дальнейший рост энерговооруженности, механизации и автоматизации производственных процессов, качества и надёжности электрических машин (ЭМ). Надёжность ЭМ - это комплекс свойств, определяющих его возможность эксплуатации. Надёжность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства, в частности ЭМ. При их широком применении в различных системах электроприводов и автоматического регулирования производства в значительной степени определяется надёжностью этих машин. Согласно ГОСТ 27.002-2015 и ISO 2394:2015 под термином «надёжность» понимают свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования, и определяется свойствами [12 - 26]:

- долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторой наработки;
- ремонтпригодность - свойство ЭМ, заключающееся в приспособленности к предупреждению, обнаружению, причин возникновения отказов, повреждений, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Обеспечение надёжности ЭМ является важной научной задачей современности. Выпуск ЭМ составляет миллионы изделий в год.

Актуальность проблемы надёжности ЭМ в течение последних десятилетий можно объясняется следующими причинами [27, 28]:

- агрессивные условия эксплуатации;
- исключением контроля человека над функционированием системы (автоматизация);
- интенсивностью режимов работы;
- повышением требований к качеству работы;
- увеличением экономической и технической цены отказа.

Значительный теоретический и экспериментальный вклад в решение проблем надёжности ЭМ принадлежит О.Д. Гольбергу, Э.К. Стрельбицкому, Ю.П. Похолкову, О.П. Муравлёву, Б.Н. Ванееву, А.А. Пястолову, И.П. Копылову и другим [29-36].

Для эффективного решения экономических задач, что особенно важно для алмазодобывающей промышленности, актуально обеспечение оптимального проектирования ЭМ, при котором формируется надёжность. Заданную для ЭМ надёжность необходимо подтвердить расчётами на этапе проектирования. Оптимальные значения показателей надёжности должны быть получены в результате технико-экономических расчётов. Надёжность ЭМ состоит из надёжностей таких элементов как: обмотки ротора, статора и подшипниковых устройств. Разработкой методик расчёта занимались О.Д. Гольдберг, Б.Н. Ванеев, Э.К. Стрельбицкий. При проектировании для обеспечения должного уровня надёжности необходимо учесть следующие факторы [15, 32, 34, 35]:

- применение защитных устройств;
- применение качественной и современной изоляции, пропиточных составов, обмоток;
- расчёт магнитных и электрических нагрузок для обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ.

Также для поддержания необходимого уровня экономической эффективности и безопасности персонала, следует принять во внимание следующие пути решения [15]:

- проведение технического обслуживания и текущего ремонта электрооборудования;
- применение средств технического диагностирования;
- применение резервированных ЭМ.

В настоящее время тенденция сокращения общей массы ЭМ приводит к более активному использованию активных частей, а также увеличению температуры обмотки статора, что сильно влияет на надёжность. ЭМ необходимо рассматривать на всех этапах производства, начиная с проектирования, только тогда полученные результаты можно считать объективными. Обеспечение надёжности ЭМ также решаются задачи [15, 23, 33-36]:

- разработка системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и соответствующих ей эксплуатационных документов;
- предупреждение брака и дефектов, выявление и устранение их причин, внедрение системы бездефектного труда, морального и материального стимулирования трудящихся за качество их личного труда, организация кружков (групп) качества;
- определение экономического эффекта от внедрения на заводе-изготовителе мероприятий по повышению качества и надёжности АД;
- разработка программы обеспечения надёжности (ПОН);
- внесение требований по надёжности в нормативно-техническую документацию (НТД);
- регулирование технологического процесса изготовления ЭМ и выявление технологического резерва для повышения надёжности ЭМ до заданного или более высокого уровня;
- поставка запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП);

- разработка оптимальной конструкции ЭМ с учетом повышения надежности, включая использование различного вида защит;
- определение показателей надежности опытных образцов или серийных изделий за определенный период производства;
- оценка качества ЭМ при их сертификации.

Технологическая дисциплина является важным критерием на этапе производстве ЭМ, от которого напрямую зависит эксплуатационная надёжность. На данном этапе следует выделить следующие недостатки: низкая квалификация рабочего персонала, замены сортности материалов, изношенность инструмента и оборудования, низкое качество контроля по операциям. Повышение технологической дисциплины можно достичь, проводя приемо-сдаточные испытания двигателей, осуществляя входной контроль физических свойств материалов и качество покупных комплектующих изделий, отбраковывая несоответствующие нормативно-технической документации [15-17, 36].

Исследование ЭН электрооборудования в алмазодобывающей промышленности позволит не только повысить уровень надёжности и безопасность рабочего персонала, но и [37]:

- выявить наиболее слабые узлы ЭМ;
- выявить закономерность изменения уровня надёжности ЭМ;
- определить слабые стороны проектирования, изготовления и эксплуатации того или иного электрооборудования;
- корректирование показателей надёжности ЭМ, установленных изготовителем.

1.2. Отказы электрических машин в алмазодобывающей промышленности

В алмазодобывающей промышленности широкое распространение получил электропривод на основе ЭМ переменного тока. Его применение объясняется простотой ремонта и низкой стоимостью. Однако, их эксплуатация в качестве привода горношахтного оборудовании тесно связана с влиянием внешних негативных факторов, которые связаны как с климатическими особенностями

Якутии, так и технологическими, обусловленными условиями эксплуатации. Основными такими воздействиями можно подчеркнуть [28]:

- колебания температуры:
в шахте – от 6 до 15 °С,
на поверхности – от -55 до 35 °С;
- колебания относительной влажности:
в шахте – от 80 до 98%,
на поверхности – от 22 до 100%;
- запылённость воздуха в шахте – от 70 до 695 мг/м³.

Согласно ГОСТ 27.002-2015 и ISO 2394:2015 отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Основные виды отказов классифицируют по [13, 14, 38]:

- характеру изменения параметров объекта:
- постепенный отказ - отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта;
- внезапный отказ - отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние.

Постепенный отказ сопровождается изменением одного или нескольких параметров в течение некоторого времени, что позволяет прогнозировать данный тип отказов, в отличие от внезапного. Поэтому есть возможность предупредить наступление отказа или принять меры по устранению его нежелательных последствий. Связи с отказами других объектов [25, 39]:

- независимый отказ - отказ, не обусловленный другими отказами;
- зависимый - отказ, обусловленный другими отказами.

Причине возникновения отказа:

- конструктивный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;

- производственный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;
- эксплуатационный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации;
- деградационный отказ - отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Систематизирование отказов по причинам их возникновения необходимо для определения этапов разработки и существования объекта, при которых необходимо провести мероприятия по устранению причин отказов. В конце жизненного цикла объекта, в связи с естественными процессами старения и изнашивания, происходят деградационные отказы. Во время планируемого полного срока службы система технического обслуживания и ремонта сводит вероятность отказов такого рода к минимуму [13, 25].

Устойчивости неработоспособности [13]:

- самоустраняющийся отказ – отказ, приводящий к кратковременной утрате работоспособности;
- перемежающийся отказ - многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Способу обнаружения:

- явный отказ – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения;
- скрытый отказ - отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Характеру возникновения:

- полные отказы – переход объекта в неработоспособное состояние;
- частичные отказы – переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Надёжность ЭМ в алмазодобывающей промышленности была рассмотрена в работах [28, 40-43], в которых было выявлено, что 68% отказов являются эксплуатационными.

Нагрузка на электрические машины чаще всего носит резкопеременный, случайный характер, имеют место частые и затяжные пуски (реверсы). Снижение механической и электрической прочности ЭМ обмоток происходит из-за структурных изменений в следствие нагрева. Растрескивание изоляции сильно снижает её стойкость к вибрации и воздействию влаги. При отключении ЭМ начинает остывать, что вызывает выпадение конденсата с содержанием пыли. В последующем пыль проникает в микротрещины, вызывая таким образом пробой изоляции. Влага вызывает коррозию металлических частей ЭМ (в том числе подшипниковых узлов). Частицы пыли загрязняют смазку подшипника и в последующем вызывает абразивный износ и ухудшает тепловой режим. [15, 32].

Основными причинами выхода из строя ЭМ являются [15]:

- образование межвиткового замыкания в одной из обмоток статора;
- обрыв фаз;
- износ подшипников;
- обрыв в одной из трех обмоток двигателя;
- нарушение охлаждения;
- замыкание обмотки статора на корпус;
- заклинивание ротора;
- технологические перегрузки.

При обрыве в цепи обмотки статора магнитный поток будет отсутствовать, а ток будет протекать нулевой. Если обмотки соединены в звезду, то будет невозможно получение пускового момента. Замыкание обмотки статора приведёт к срабатыванию защиты от короткого замыкания и остановке рабочего механизма,

что с точки зрения безопасности недопустимо. Межвитковое замыкание приводит к нагреванию статора, которое вызывает перегрев электродвигателя и выход из строя. [15, 32, 41].

1.3. Основные положения технической диагностики

В алмазодобывающей промышленности эффективная эксплуатация электрооборудования является важнейшим условием для обеспечения надёжности их функционирования. Задача повышения времени эксплуатационного периода и своевременной оценки технического состояния тесно связана с внедрением технической диагностики.

Техническое диагностирование — это аппарат мероприятий, который позволяет изучать и устанавливать признаки неисправности (работоспособности) оборудования, устанавливать методы и средства, при помощи которых дается заключение (ставится диагноз) о наличии (отсутствии) неисправности (дефекта) или согласно ГОСТ 20911-89 под технической диагностикой понимается «Область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов». Техническая диагностика характеризуется двумя направлениями (рисунок 1) [44-46]:

- теория контролеспособности – свойство объекта, характеризующее его пригодность к проведению диагностирования заданными средствами контроля. Изучает методы получения диагностической информации. Обеспечивается со стадии разработки объекта.
- теория распознавания – отвечает за алгоритмы распознавания, основываясь на диагностических моделях.

Для описания состояния объекта используют ряд диагностических параметров: параметры рабочих процессов (ток, напряжение и пр.); параметры сопутствующих процессов (температура, вибрация и пр.); геометрические величины (зазор, биение и пр.). Для диагностики электрооборудования диагностические параметры подразделяют на три типа: параметры информационного вида, представляющие объектную характеристику (тип объекта,

время ввода в эксплуатацию, период эксплуатации, технические характеристики объекта); параметры, представляющие текущую техническую характеристику узлов объекта (параметры рабочих процессов); параметры, представляющие собой производные нескольких параметров (динамические характеристики) [47].



Рисунок 1 - Структурная схема технической диагностики

Диагностические параметры должны обладать следующими свойствами [47, 48]:

- широтой изменения – это диапазон изменения диагностического параметра, соответствующий заданной величине изменения функционального параметра;
- информативностью - это свойство диагностического параметра, которое при недостаточности или избыточности может снизить эффективность самого процесса диагностики (достоверность диагноза);
- однозначностью - определяется монотонно возрастающей или убывающей зависимостью его от функционального параметра в диапазоне от начального до предельного изменения функционального параметра;
- периодичностью регистрации - определяется, исходя из требований технической эксплуатации и инструкций завода-изготовителя, и зависит от скорости возможного образования и развития дефекта;
- чувствительностью – это степень изменения диагностического параметра при варьировании функционального параметра;

- стабильностью - устанавливает возможную величину отклонения диагностического параметра от своего среднего значения при многократных измерениях в неизменных условиях.

Современную диагностику электрооборудования по назначению можно разделить на три основных направления [49]:

- диагностика неисправностей — это определение вида и величины дефекта после регистрации факта появления неисправности. Является частью работ по обслуживанию или ремонту оборудования и выполняется по результатам контроля его параметров;
- параметрическая диагностика — это контроль нормируемых параметров оборудования, обнаружение и идентификация их опасных изменений. Используется для аварийной защиты и управления оборудованием, а диагностическая информация содержится в совокупности отклонений величин этих параметров от номинальных значений;
- превентивная диагностика — это обнаружение всех потенциально опасных дефектов на ранней стадии развития, наблюдение за их развитием и на этой основе долгосрочный прогноз состояния оборудования.

Для достижения более точных результатов диагностического исследования применяют все три направления. Таким образом, к результатам диагностики можно отнести [45, 49]:

- выявление вида дефекта, его масштабы, место расположения, причин появления, что служит основой для принятия решения о последующей эксплуатации оборудования или о полной замене оборудования;
- определение состояния диагностируемого оборудования (оценка состояния оборудования);
- прогноз о сроках последующей эксплуатации — оценка остаточного ресурса работы электрооборудования.

Методы диагностики электрооборудования подразделяют на две группы: методы разрушающего и неразрушающего контроля. Методы неразрушающего

контроля (МНК) — методы контроля материалов (изделий), не требующие разрушения образцов материала (изделия). Соответственно, методы разрушающего контроля — методы контроля материалов (изделий), требующие разрушения образцов материала (изделия). Ниже представлены основные МНК, согласно ГОСТ 18353–79, наиболее часто применяемые для электротехнического оборудования [50-59]:

- магнитный - неразрушающий контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля;
- вихретоковый - неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем;
- радиоволновой - неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля;
- тепловой - неразрушающий контроль, основанный на регистрации температурных полей объекта контроля;
- оптический - неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля;
- радиационный - вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом;
- акустический - неразрушающий контроль, основанный на применении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля;
- капиллярный - основанный на капиллярном проникании индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя;

- течеискания - основан на обнаружении пробного вещества в смеси веществ, проникающих через течи, путем ионизации веществ с последующим разделением ионов по отношению их массы к заряду под действием электрического и магнитного полей.

1.4. Диагностика электрических машин в алмазодобывающей промышленности

В алмазодобывающей промышленности широкое распространение получил электропривод на основе электрических машин переменного тока. Его применение объясняется простотой ремонта и низкой стоимостью. Однако, их эксплуатация в качестве привода горно-шахтного оборудования тесно связана с влиянием внешних негативных факторов, которые связаны как с климатическими особенностями Якутии, так и технологическими, обусловленными условиями эксплуатации [28]. Выявление дефекта оборудования на ранней стадии крайне необходимо, поскольку внезапный выход двигателя из строя на производстве приводит к серьезным последствиям, угрожающим безопасности персонала. Функцию своевременного обнаружения дефектов выполняет периодическая диагностика.

Система технической диагностики должна включать в себя регулярный мониторинг технического состояния электродвигателей, поиск дефектов, повреждений, определение степени опасности дефектов и оценку остаточного ресурса оборудования. Остро стоит вопрос о необходимости проведения диагностических исследований электродвигателя во время его эксплуатации.

Как было описано ранее, методы разрушающего и неразрушающего контроля при помощи специальных датчиков позволяют осуществлять измерения диагностических параметров, оценивать их для выдачи информации в исполнительные или индикаторные устройства. В системах функционального диагностирования (СФД) объект диагностирования всегда находится в рабочем состоянии, на него поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его алгоритмом функционирования. СФД может быть использована для проверки правильности функционирования объекта и выявления дефектов. При

использовании СФД в условиях эксплуатации электромеханических преобразователей энергии имеют следующие особенности [60]:

- зоны, в которых возможно появление эксплуатационных дефектов;
- работы по диагностированию могут проводиться в различных погодных и климатических условиях.

К СФД, предъявляются следующие общие требования [60]:

- высокую достоверность результатов контроля;
- сохранять работоспособность при воздействии на них промышленных радиопомех;
- обеспечивать контроль качества ЭМ по заданным параметрам;
- обеспечивать измерения или контроль диагностических параметров на режимах работы машины;
- обладать надежностью не ниже надежности известных современных систем диагностирования;
- возможность автоматизации контроля, а также управление процессами с использованием сигналов, выдаваемых средствами СФД;
- согласованность времени, затрачиваемого на контроль, со временем работы технологического оборудования.

К датчикам, применяемым в СФД, предъявляются следующие основные требования [60, 61]:

- метрологические характеристики датчиков должны соответствовать требованиям;
- датчик, устанавливаемый на объект, не должен изменять его параметры в процессе диагностирования более чем на 5 %;
- датчики должны быть устойчивыми к внешним воздействиям (механическим, климатическим, воздействию пыли и воды).

Для определения неисправностей СФД используют информативные сигналы такие как: вибрация, температура, энергетические потери и другие. Такого рода сигналы несут в себе информацию о состоянии ЭМ. Так, в изменении тока статора

ЭМ переменного тока отражается около 16 % всех возможных дефектов, температуры перегрева – до 20 %, вибрации - до 80 %. Поэтому в алмазодобывающей промышленности широко распространены вибро- и термодиагностика [62, 63].

На данный момент анализ вибрации машин является наиболее распространённым методом диагностики. Его достоинством является возможность определить зарождающийся на ранней стадии, что позволяет заблаговременно планировать сроки ремонта оборудования. Параметры вибрации характеризуют состояние объекта, что позволяет прогнозировать неисправности ЭМ. Анализ вибрации является основой СФД, несмотря на то что режимы работы оборудования могут быть самыми разными. Целью анализа является оценка и прогнозирование состояния ЭМ во время его эксплуатации и без остановки. Задачи [28, 49, 64, 65]:

- установление пороговых значений диагностических параметров, соответствующих качественным изменениям параметров состояния электрической машины;
- описание объекта диагностики минимальной совокупностью параметров состояния;
- выявление погрешностей в изготовлении и сборке ЭМ;
- выявление наиболее чувствительных к состояниям электрической машины диагностических параметров;
- установление количественной связи между параметрами состояния и диагностическими параметрами;
- определение пределов изменения параметров состояния и диагностических параметров.

В контрольных точках ЭМ происходит замер уровня вибрации, то есть действия колебательных сил, воздействующих на систему с разными передаточными характеристиками от каждого из источников колебательных сил до каждой точки контроля вибрации. Измерению подлежат как действующие (среднеквадратичные) значения, так и пик-фактор. В общем виде колебательные

силы есть сумма периодических, случайных и ударных составляющих, а передаточные характеристики - амплитудно-частотными и фазочастотными компонентами. максимальный объем диагностической информации, содержащейся в структуре колебательных сил, можно получить, лишь разделив сигнал на составляющие (периодические, случайные и ударные) и анализируя каждую из них отдельно, с учетом передаточных характеристик колебательной системы. Суть заключается в анализе вибрационных параметров в различных точках электродвигателя. К вибрационным параметрам относятся виброперемещение, виброускорение и виброскорость. [49, 62, 63, 65, 66].

Известно, что любой объект излучает инфракрасные волны разной интенсивности. Измерить температуру различного промышленного оборудования обычными термометрами не всегда представляется возможным. Температура один из наиболее широко используемых критериев СФД. Температура корпусов двигателей измеряется непосредственно на поверхности, так как обычно соответствует их внутренней температуре. Нормальные включения/выключения токовой нагрузки и изменения окружающей температуры способствуют повторному нагреву (расширению) и охлаждению (сужению) проводников. Со временем это приводит к ослаблению контактов, которые имеют более высокое электрическое сопротивление, в результате чего происходят потери мощности на нагрев. Грязь, угольная пыль и коррозия в контактах также вызывают повышенное сопротивление [8, 64, 66]. Измерение температуры производится в основном бесконтактным способом с помощью специального оборудования. Ими являются: пирометры, тепловизоры, инфракрасные термометры, контактные термометры и другие.

Для термодиагностики асинхронных двигателей тепловизор является самым лучшим решением, т.к. удачно сочетает в себе функционал инфракрасного термометра и компактность пирометра. Позволяет мгновенно показывать горячие и холодные точки объекта на дисплее в виде тепловизионного изображения с использованием цветовой градации. Для выполнения измерений необходимо навести и сфокусировать прибор на объекте, при этом производится

автоматическое выравнивание диапазона температур для создания четкого изображения. Термодиагностика позволяет выявить следующие дефекты: дефект межвитковой изоляции, дефект подшипников, потеря соединений контактов или их окисление, дефекты обмотки, несбалансированная нагрузка [8].

1.5. Система технического обслуживания и ремонта электрических машин

Для эффективного поддержания технического состояния ЭМ необходимо четкое выполнение программы системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Согласно ГОСТ 18322-2016, система ТОиР – это совокупность взаимосвязанных средств, документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления (качества либо эксплуатационных характеристик) объектов, входящих в эту систему. Ремонт – это комплекс технологических операций и организационных действий по восстановлению работоспособности, исправности и ресурса объекта и/или его составных частей. Согласно Положению о планово-предупредительном ремонте энергетического оборудования основной задачей системы ТОиР является предотвращение быстрого износа изделий, исключение их отказов, повышение долговечности, поддержание в постоянной готовности к использованию по назначению, обеспечение производительной и безопасной работы. Достоинствами ТОиР являются [8, 67]:

- снижение вероятности внезапного выхода из строя и затрат на простой оборудования;
- возможность прогнозирования остаточного ресурса оборудования;
- возможность планирования графиков обслуживания и ремонта на большой срок.

Недостатками ТОиР являются [44, 68]:

- планы-графики профилактических работ не устанавливают приоритета вывода в ремонт различных видов электрооборудования;
- система ПНР не исключает возможности применения диагностики, но не решает задачи о том, как должны учитываться ее результаты;

- при составлении планов-графиков не предусматривается их оптимизация с позиции рационального управления эксплуатацией и более полного расходования ресурса каждой электрической машины;
- при проведении профилактических работ через полученные статистическим путем усредненные периоды, даже при наличии поправочных коэффициентов на условия и режимы эксплуатации, без точного определения технического состояния нельзя гарантировать, что в межремонтный период не будут возникать отказы отдельных сборочных единиц оборудования;
- в структуре ремонтных циклов не учитывается фактическое время работы электрооборудования.

Реализация системы ТОиР происходит следующим образом [44, 66]:

- проведение с заданной периодичностью ремонтов оборудования, сроки выполнения и материально-техническое обеспечение которых планируется заранее;
- проведение операций ТО и контроля технического состояния, направленных на предупреждение отказов оборудования и поддержание его исправности и работоспособности в интервалах между ремонтами;
- ремонты выполняются качественно, в запланированном объеме, с максимальной механизацией тяжелых трудоемких работ;
- при ремонте широко применяется агрегатно-узловой метод и метод ремонта крупных объектов по сетевому графику;
- обеспечивается организация поставок агрегатов, узлов и деталей от заводоизготовителей. Только детали несложной конфигурации изготавливаются в собственных цехах;
- систематически по специальному плану проводятся работы по повышению долговечности, снижению показателей аварийного выхода энергооборудования из строя.

Среди большого количества систем ТОиР, следующие пользуются более высоким спросом [8, 12, 44, 60]:

- аварийно-восстановительная (неплановая) система. При данной системе ремонт (восстановление) объекта при внезапном выходе из строя без плановых ремонтов. Такой тип, как правило входит в состав системы планово-предупредительного ремонта. Стоимость аварийного ремонта почти в 10 раз больше, чем планово-предупредительного.
- планово-предупредительная система (ППР). Является самой распространённой системой ТОиР. Подразумевает плановость и профилактическую направленность, то есть заблаговременное определение состава ТОиР на основе информации о ресурсах объекта. Также обеспечивается выполнение обслуживания до наступления отказа. График обслуживания, как правило, составляется изготовителем. ППР - это совокупность работ, направленных на обеспечение работоспособности оборудования и поддержание его работоспособности. ППР включает в себя капитальный ремонт (КР), текущий ремонт (ТР), средний ремонт (СР) и техническое обслуживание (ТО).
- техническое обслуживание – это комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании. Текущий ремонт – это комплекс ремонтных работ, проводимых между двумя очередными капитальными ремонтами и состоящий в замене или восстановлении отдельных частей. ТР производится без полной разборки оборудования, но он требует кратковременного останова и вывода из работы оборудования со снятием напряжения. Средний ремонт (СР) - плановый ремонт, выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса объекта с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния объекта в объеме, предусмотренном в документации. При СР производится разборка, чистка отдельных деталей, а также ремонт элементов, подвергнутых износу. Капитальный ремонт (КР) – плановый ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному ресурса объекта с заменой или восстановлением

любых его частей, включая базовые. При КР производится измерение технических параметров, внутренний осмотр оборудования и устранение неисправностей, при их обнаружении. Выполняется в конце срока межремонтного периода, устанавливаемого для каждого вида оборудования. В большей степени КР выполняются специализированными организациями, либо изготовителем [8, 67, 68].

На сегодняшний день основной задачей системы ТОиР является повышение надёжности и снижение эксплуатационных расходов. Её применение уже сейчас позволяет [69, 70]:

- снизить затраты на обслуживание (75%);
- снизить количество обслуживания (50%);
- снизить число отказов (70%).

1.6. Постановка задач исследования

Проблема поддержания необходимого уровня эксплуатационной надёжности электрооборудования в алмазодобывающей промышленности будет актуально ещё долгое время и требует постоянной разработки новых путей её решения. Так, недостаточная надёжность электрооборудования приводит к внезапным выходам из строя и, соответственно, простоем оборудования, что несёт за собой экономические убытки и подвергает опасности рабочий персонал, что недопустимо. На основе вышесказанного следует отметить, что не решены следующие задачи.

Необходимо выполнить анализ эксплуатационных данных горного оборудования, эксплуатируемого в условиях рудников АК «АЛРОСА» методами анализа выживаемости для определения оборудования и узлов его ЭМ наиболее подверженных отказам. Разработать методику прогнозирования эксплуатационной надёжности на основе анализа выживаемости, которая позволит анализировать полные и цензурированные данные. Разработать дерево целей, где главной целью является обеспечение эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности и определить полный спектр мероприятий

по её достижению. Определить критерий системы, который оказывает наибольшее влияние на достижение главной цели. Обосновать выбор эффективного ЭМ для алмазодобывающей промышленности.

2. АНАЛИЗ ВЫЖИВАЕМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

2.1. Массив исходных данных по эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока алмазодобывающего комплекса

Для оценки выживаемости ЭМ переменного тока в алмазодобывающей промышленности необходимо составить массив исходных данных. Массив составлен из данных, полученных из журналов и отчётов о ремонте горного оборудования, эксплуатируемого на рудниках «Интернациональный», «Мир» и обогатительной фабрике №3 г. Мирного, накопленных с 2012 г. по 2017 г. и представляет собой значения наработок. Нарботкой называется продолжительность или объем работы машины. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, пусков и т.д.). Сбор информации происходит обслуживающим персоналом и представляет собой наработку до отказа.

Для описания средних времен жизни и сравнения, например, нового метода ремонта со старым, можно было бы использовать стандартные параметрические и непараметрические методы, но в анализируемых данных есть важная особенность. При завершении наблюдения ещё оставались электрические машины (ЭМ), которые продолжали эксплуатацию или информации о их эксплуатации по некоторым причинам нет, такие данные называют цензурированными.

На практике неоднократно происходят случаи, когда при диагностике выявляются дефекты того или иного узла, например, износ наружного кольца подшипника. Однако несмотря на то, что данный дефект и не вызывает остановку ЭМ, продолжать её работу не рекомендуется по причине вероятности внезапного выхода из строя и безопасности персонала. В связи с этим организуется мероприятие по замене подшипника, а полученная наработка является цензурированной по отношению к дефекту подшипника [43]. Однако, следует считать отказом событие, при котором невозможно подшипникам доработать до отказа. В таком случае результаты анализа будут занижены, что создает запас по

эксплуатационной надёжности. Следует принять во внимание, что в работе используется массив данных с известным временем окончания исследования, при котором некоторые машины продолжали работу. Такие данные являются цензурированными.

Цензурированные данные – это данные, не содержащие в себе информацию о необходимом событии. Пусть i - номер наблюдаемого объекта, T_i — время жизни объекта i (непрерывная или дискретная случайная величина), U_i — переменная цензурирования. Тогда цензурированное время жизни объекта i равно $X_i = \min(T_i, U_i)$. Цензурирование различают двух типов [71 - 75]:

- I тип (фиксированное цензурирование), при котором заранее задаётся время наблюдения. Выборка из n объектов наблюдается в течение фиксированного времени τ . Число смертей случайно, но общая продолжительность исследования фиксирована. Каждый объект имеет максимально возможный период наблюдения τ_i , $i = 1, \dots, n$. Вероятность того, что объект будет работоспособен в конце исследования, равна $S(\tau_i)$.
- II тип (случайное цензурирование), при котором задаётся доля отказов, но время не фиксируется. Выборка из n объектов наблюдается столько, сколько необходимо, чтобы событие ("отказ") испытали d объектов. Число d фиксировано заранее и его можно использовать в качестве параметра. Однако время исследования не может быть точно известно заранее.

В зависимости от направления различают следующие виды цензурирования:

- Правое, при котором известны начало и конец наблюдения. Конец наблюдения происходит по причине отказов, технического обслуживания и прочее. Наблюдаются $X_i = \min(T_i, U_i)$ для каждого i и индикатор отказа δ_i ($\delta_i = 1$, если $T_i \leq U_i$, и $\delta_i = 0$, если $T_i > U_i$).
- Левое, при котором время начала наблюдения неизвестно, вследствие чего время от начала эксплуатации ЭМ до начала наблюдения не будет учтена. Наблюдаются $Y_i = \max(T_i, U_i)$ для каждого i и индикатор отказа δ_i ($\delta_i = 1$, если $T_i \leq U_i$, и $\delta_i = 0$, если $T_i > U_i$).

В частых случаях цензурирование может возникнуть в разные периоды времени по причине планового технического обслуживания, поэтому по кратности цензурирование бывает [43, 76]:

- Однократное, если цензурирование наступило в один момент;
- Многократное, если оно наступило в разные периоды.

Сформирован массив исходных данных, состоящий из отказов оборудования, представленного в таблице 2.1, куда входят как полные, так и цензурированные данные (приложение 1).

Таблица 2.1

| Марка | Изготовитель | Номинальный ток, А | Номинальное напряжение, В | Мощность, кВт | Номинальная частота вращения, об/мин | Тип установки |
|----------------------|--------------|--------------------|---------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | Режущий орган комбайна АМ-75 |
| DSK250 H6 | Польша | 136 | 1140 | 200 | 1500 | Загребные лапы комбайна АМ-75 |
| d2PRWX280 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | Режущий орган комбайна АМ-105 |
| d2PRWX280 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | Загребные лапы комбайна АМ-105 |
| dAML 250 LX2-4 AX | Германия | 136 | 1140 | 90 | 1500 | Вентилятор |
| A250 M6 | Россия | 108 | 660 | 55 | 1000 | Насос |
| A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | Насос |
| BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | Насос |
| РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | Насос |
| BAO2- 280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | Насос |
| СДМ-15-49- 6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | Грохот |
| SK 160 L\4 BRE250 | Россия | 28 | 660 | 15 | 1470 | Мельница |
| МЕЕН-140- EV | Германия | 3,3 | 380 | 9 | 1000 | Площадочный вибратор |

2.2. Алгоритм анализа выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности

Изначально методы анализа выживаемости активно применялись в медицинской и биологической сферах, а также социальных науках и экономике, но затем нашли своё применение и в машиностроении в виде анализа надёжности. Однако в России методы анализа выживаемости до сих пор не получили широкого распространения. Анализ выживаемости представляет собой исследование длительностей от начала до конца наблюдения, в которых объект перестаёт отвечать заданным требованиям, например, происходит отказ. В рамках данной работы выживаемость — это доля наблюдаемых объектов, доработавших до определённого времени [43, 71 - 75].

Рассмотрим функцию выживаемости. Пусть T - непрерывная случайная величина с плотностью распределения $f(t)$ и функцией распределения $F(t) = P\{T \leq t\}$, тогда вероятность того, что исследуемое событие не наступило к моменту времени t (2.1) [75, 76]:

$$S(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx. \quad (2.1)$$

Анализ выживаемости следует выполнить с помощью метода множительных оценок Каплана-Мейера. Отличительной особенностью метода множительных оценок Каплана-Мейера от традиционных — возможность обработки цензурированных данных и отсутствие необходимости группировать данные. Функцию выживаемости для выборки с цензурированными данными можно представить в виде формулы множительной оценки Каплана-Мейера (2.2) [71-74, 76, 77]:

$$S(t) = \prod \left(1 - \frac{d_t}{n_t}\right), \quad (2.2)$$

где d_t - число отказов в момент времени t ; n_t - число наблюдавшихся к моменту t . При цензурировании $d_t = 0$, а значит $1 - \frac{d_t}{n_t} = 1$, что позволяет перемножать все моменты времени.

Оценку точности приближения дает стандартная ошибка выживаемости; ее можно рассчитать по формуле Гринвуда (2.3) [73, 76, 77]:

$$SE(S_i) = S(t) * \sqrt{\sum \frac{d_t}{n_t(n_t - d_t)}} \quad (2.3)$$

Доверительный интервал для выживаемости (2.4) [76]:

$$S(t) - SE(S_i) * z_\alpha < S(t) < S(t) + SE(S_i) * z_\alpha \quad (2.4)$$

где Φ_α — двустороннее критическое значение для стандартного нормального распределения, α — уровень значимости, $SE(S_i)$ — стандартная ошибка для этой доли. Так как определяется 95% доверительный интервал, то $\alpha = 0,05$ и соответствующее значение $z_\alpha = 1,96$ [2, 78-80].

2.3. Анализ выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности

График функции (2.2) называется кривой выживаемости. Пологий график говорит о высокой выживаемости, а крутой – о низкой. Построение кривой выживаемости даёт возможность сравнить распределение в двух и более группах. Рассмотрим графики функции выживаемости, полученные из массива данных.

На рисунке 1 представлен график сравнения выживаемости электрических машин переменного тока, эксплуатируемых на рудниках «Интернациональный», «Мир» и обогатительной фабрике №3. Следует обратить внимание на кривую выживаемости рудника «Мир», которая является самой короткой из представленных. Присутствует резкий спад кривой после 6000 часов с вероятностью дожития до 10000 часов – 48%. Вероятность дожития до 30000 часов составляет 11%. Что касается других объектов, то относительное сходство кривых выживаемости рудников «Интернациональный» и «Мир» объясняется одинаковыми подземными условиями эксплуатации и эксплуатируемыми машинами. Однако их большая разница в длине говорит о необходимости проведения дополнительных мероприятий по техническому обслуживанию. С помощью метода

множительных оценок Каплана-Мейера можно определить какое эксплуатируемое оборудование и в какое время нуждается в проведении дополнительного технического обслуживания.

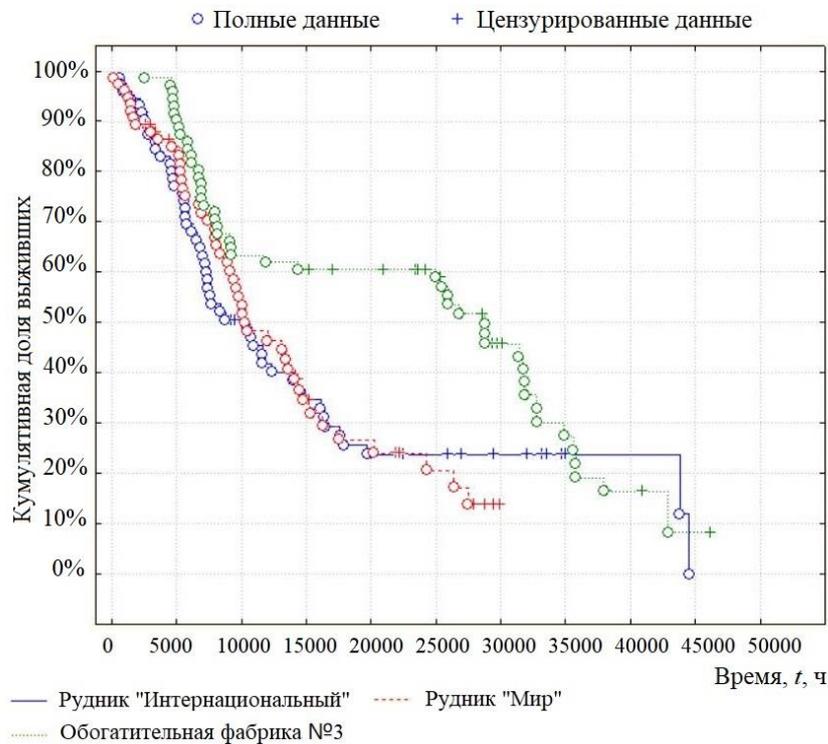


Рисунок 2 - График сравнение выживаемости электрических машин между промышленными объектами г. Мирного

Исходя из рисунков 3 и 4, наименьшим уровнем выживаемости обладают электрические машины промышленного комбайна АМ-75. В этом случае критическое время является с 5000 часов до 10000 часов с вероятностью дожития 45% и с 13000 часов до 15000 часов с вероятностью дожития 11%. Об электрических машинах комбайна АМ-105 следует сказать, что первые 10000 часов эксплуатации можно назвать критическими. Две эти группы объединяет достаточно резкий спад выживаемости в начале периода эксплуатации, что предполагает, как начальную приработку электродвигателей. Но на кривой выживаемости электрических машин комбайна АМ-75 мы наблюдаем достаточно резкий спад практически до самого конца. Дополнительные мероприятия рекомендуется проводить после 10000 часов, так как именно в этот момент мы можем наблюдать нормализацию кривой выживаемости

электрических машин комбайна АМ-105. Работа промышленных комбайнов на руднике является одной из ключевых и в следствии агрессивной окружающей среды большая часть отказов приходится на них.

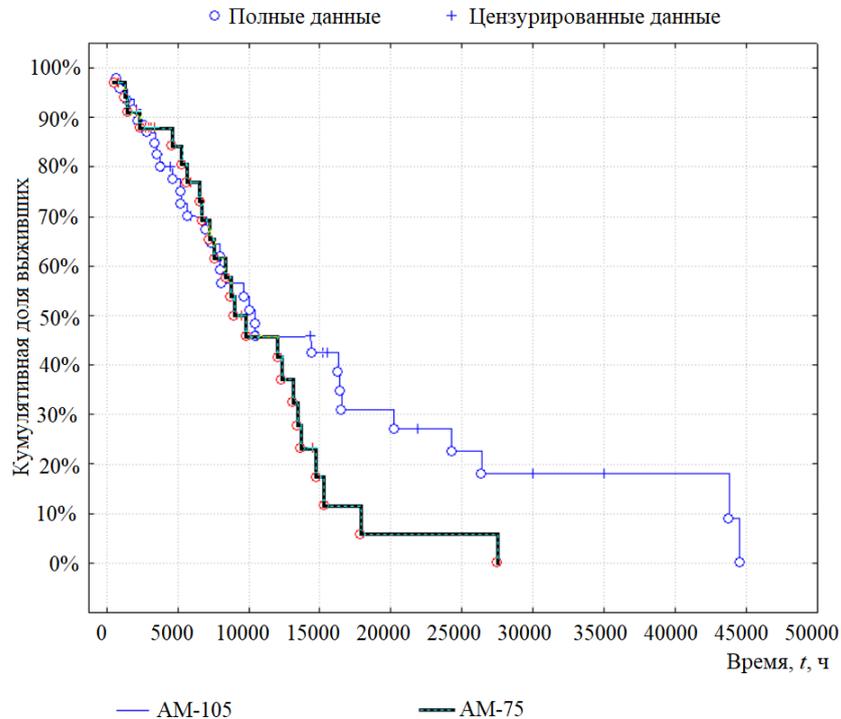


Рисунок 3 - График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока, эксплуатируемых на проходческих комбайнах АМ-75 и АМ-105 на руднике «Мир»

Что касается вентиляторных установок (рисунок 4), то их критическое время наступает после 5000 часов с вероятностью дожития 65%. У насосных агрегатов критическое время наступает после 5200 часов до 12000 часов с вероятностью дожития 50%.

Кривая выживаемости электропривода режущего органа комбайна АМ-75 (рисунок 5) достаточно крутая и находится левее, что говорит о низкой выживаемости. Вероятность дожития до 13000 часов составляет 40%. Критичными являются часы с 6000 до 9000 часов с вероятностью дожития 42% и с 13000 до 15000 часов с вероятностью дожития 1%.

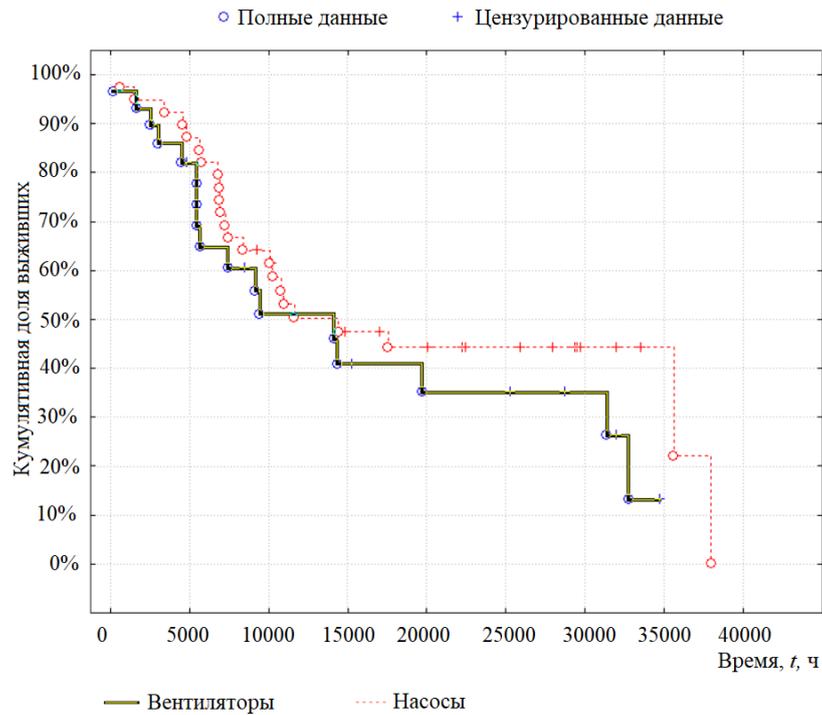


Рисунок 4 - График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока, эксплуатируемых на вентиляторах и насосах на руднике «Мир»

Согласно карте распространения многолетнемерзлых пород г. Мирный находится в области, где вечная мерзлота достигает до -400 м. Глубина подземного рудника «Мир» составляет за 44 года эксплуатации составила 520 метров, однако больше количество горизонтов расположено до отметки в -400 м (горизонты -210, -310, -410). Учитывая, что нормативных документов по разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты нет и необходимые расчёты по надёжности оборудования производятся на основании производственного опыта, то справедливо предположить о дополнительных нагрузках на электропривод режущего органа комбайна со стороны почвы. Недостаточный уровень выживаемости электропривода режущего органа комбайна связан с вечной мерзлотой почвы, которая оказывает дополнительные нагрузки [81].

С помощью метода множительных оценок Каплана-Мейера, имея в распоряжении необходимые данные об отказах, можно определить

критическое время для каждого узла. Это поможет создать более эффективный график планового-предупредительного ремонта данного электродвигателя.

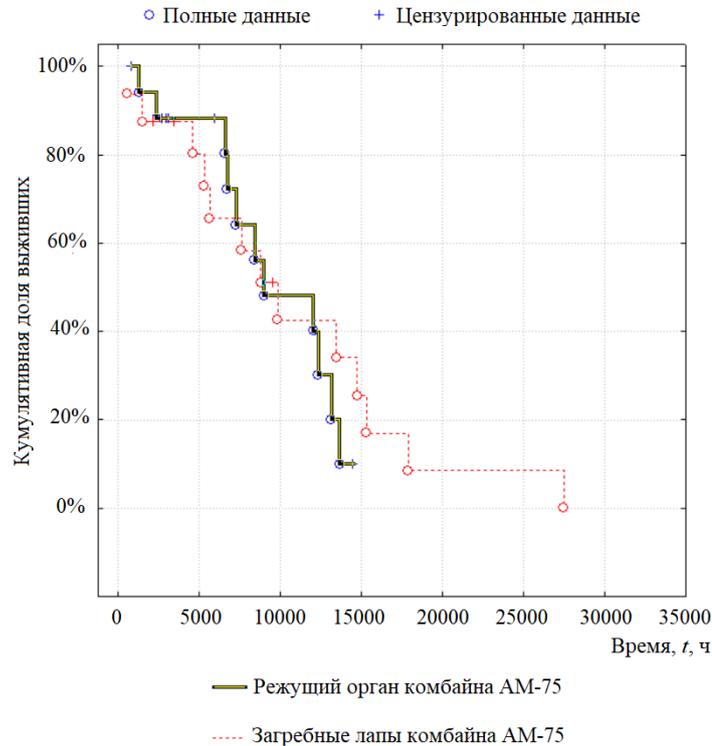


Рисунок 5 - График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока отдельных узлов промышленного комбайна АМ-75

Согласно рисунку 6, наиболее подвержены дефектам элементы подшипникового узла. На кривой выживаемости наблюдается достаточно быстрый спад на протяжении всей эксплуатации с вероятностью дожития до 15000 часов 15%. Критический период наступает с 5000 часов до 10000 часов. Также стоит обратить внимание на кривую выживаемости элементов ротора, из которого следует, что основное количество отказов происходят в первые 5000 часов. Вероятность дожития до 5000 часов равна 52%. Как видно из кривой выживаемости элементов статора, большой спад привёл к вероятности дожития до 10000 часов равной 22%.

Таким образом, стоит отметить, что электрические машины привода режущего органа комбайна АМ-75 спустя 5000 часов нуждаются в дополнительном техническом обслуживании.

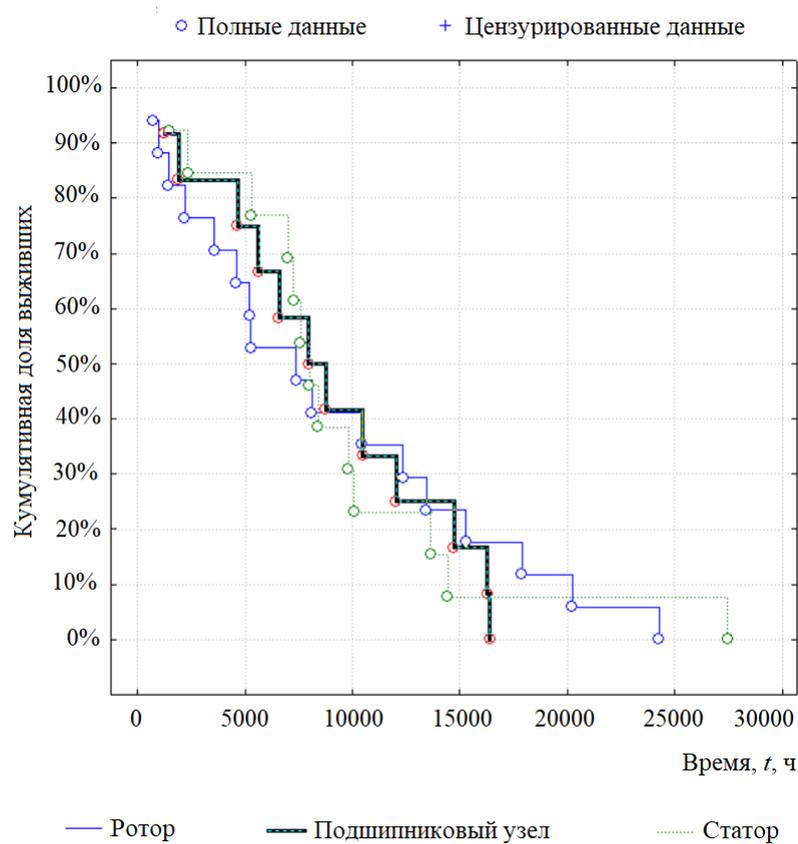


Рисунок 6 - График сравнения выживаемости узлов электродвигателя привода режущего органа промышленного комбайна АМ-75

В таблице 2.2 выделим критическое время проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов [1, 2]. Определение критического времени позволит прогнозировать отказы электрических машин и повысить эффективность графиков планово-предупредительного ремонта.

Таблица 2.2

| Оборудование | Элемент оборудования | Критический интервал времени, часы |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Проходческий комбайн АМ-75 | Режущий орган | 6500 - 9000 12000 - 14000 |
| | Загребные лапы | 4000 - 10000 13000 - 17500 |
| Электрическая машина режущего органа | Ротор | 0 - 7500 |
| | Подшипниковый узел | 0 - 15000 |
| | Обмотки статора | 5000 - 10000 14000 - 14500 |

2.4. Выводы

Впервые предложен подход оценивания выживаемости электрических машин переменного тока методом множительных оценок Каплана-Мейера на основании полученных эксплуатационных данных в период с 2012 г. по 2017 г. Метод нацелен на обработку как полных, так и цензурированных данных без необходимости разбиения на интервалы времени.

В ходе исследования были получены следующие результаты. Из представленных трёх производственных объектов (рудник «Мир», рудник «Интернациональный» и обогатительная фабрика №3) наиболее подвержено отказам оборудование на руднике «Мир» о чём говорит резкий спад с самого начала периода эксплуатации с вероятностью доработки до 20000 часов - 25%. В качестве исследуемых объектов на руднике «Мир» были рассмотрены вентиляторные установки, насосы и проходческие комбайны марок АМ-75 и АМ-105. В результате было выявлено, что самым низким уровнем выживаемости обладает проходческий комбайн марки АМ-75. Это заметно по интенсивному спаду кривой выживаемости спустя 5000 часов на графике по сравнению с остальным оборудованием с вероятностью доработки до 15000 часов - 11%. Далее были проанализированы отказы рабочих органов проходческого комбайна АМ-75. Анализ показал, что режущий орган комбайна имеет меньший уровень выживаемости, где вероятность доработки до 14000 часов - 11%. Наиболее подверженный дефектам узел ЭМ режущего органа комбайна АМ-75, им является подшипниковый узел. Его критическим временем является период с 5000 до 17000 часов с вероятностью доработки до 15000 - 18%.

Исходя из полученных результатов, была составлена таблица критических интервалов времени проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов (таблица 2.2).

3. СИСТЕМАТИЗИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

3.1. Обоснование выбора системного подхода для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности

Задача обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин является сложной, так как для разных этапов жизненного цикла оборудования характерны разные методы её решения. Одним из решений является поэтапная систематизация данной задачи, охватывающая весь жизненный цикл ЭМ. В алмазодобывающей промышленности задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагается рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимого уровня надёжности. Существует несколько вариантов представления задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин для алмазодобывающей промышленности — это:

- иерархическая структура, состоящая из мероприятий по техническому обслуживанию, ремонту и диагностике;
- дерево отказов, элементами которого являются отказы ЭМ того или иного горного оборудования.

В данном случае использование системного анализа позволяет решить поставленную задачу вследствие наличия большого количества переплетающихся между собой связей элементов систем, а также определить полный комплекс мероприятий, необходимых для её решения.

Системный анализ - процесс изучения проблемы с целью определения критериев и подцелей, которые позволяют достичь их эффективным способом. Системный анализ нашёл своё применение среди исследования искусственных систем (социальных, технических, экономических и др.), то есть в системах, где важную роль играет человек. Однако наиболее широкое распространение получил в области управления, связанным с принятием и

обоснованием решений в проектировании, создании и управлении многокомпонентными искусственными системами [1, 4, 82-84].

В системном анализе должны соблюдаться следующие правила [82]:

- при принятии решений необходима чёткая формулировка конечных целей;
- анализировать альтернативные способы решения задачи;
- задача должна быть рассмотрена как единая система с возможностью определения последствий частных решений;
- подцели отдельных подразделений не должны противоречить подцелям других.

Методы системного анализа сочетают в себе экспертные знания и формальные методы [82]. Экспертные знания позволяют находить альтернативные пути решения задачи, что позволяет совершенствовать модель принятия решений, однако это может привести и к трудноразрешимым противоречиям. Методы системного анализа делят группы [84]:

- комплексные методы;
- формализованные методы;
- экспертные методы, которые применяют знания экспертов.

Экспертные методы позволяют обеспечить возможность долгосрочного прогнозирования, поскольку отсутствуют дополнительные требования к исходной информации в сравнении с математической моделью, что является главным достоинством при решении задачи обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности перед остальными группами методов [85]. В связи с большим парком машин в алмазодобывающей промышленности, начиная от конвейеров и заканчивая большими мельницами измельчения и промышленными комбайнами, необходим такой подход системного анализа, процесс которого возможно автоматизировать или представить в виде программного обеспечения [86, 87].

К широко применяемым экспертным методам относят: методы экспертных оценок, методы типа "дерева целей", морфологические метод,

методы "мозговой атаки", метод типа "Дельфи", метод типа "сценариев" и другие [84, 85]. Рассмотрим достоинства и недостатки представленных методов применительно к решению проблемы обеспечения эксплуатационной надёжности (таблица 3.1).

Таблица 3.1

| Название | Описание | Достоинства | Недостатки |
|------------------------|---|---|--|
| Метод «Мозговой атаки» | Применяется для поиска новых решений, их широкое обсуждения и критики. Осуществляется группой экспертов. Метод нацелен на генерацию большого количества решений, в отличие от остальных методов. | Простота; Привлечение нестандартных решений. | Невозможность программной реализации; Необходимы сотрудники, обученные работе в команде. |
| Метод типа «сценариев» | В данном контексте сценарий - это анализ проблемы, который представляет собой результаты технико-экономического анализа, возможное её решение и является способом первичного ранжирования задачи. | Позволяет получить наглядную картину результатов; Углубленный анализ взаимодействия между критериями развития ситуации. | Не позволяет получить информацию о возможных отклонениях; Трудоёмкость обработки и получения большого количества оценок. |

Продолжение таблицы 3.1

| Название | Описание | Достоинства | Недостатки |
|----------------------------|---|--|--|
| Метод экспертных оценок | Представляет собой различные формы опроса экспертов с дальнейшей оценкой задачи и выбором наиболее предпочтительного варианта. | Позволяет получить количественные оценки при отсутствии статистической информации. | Качество оценок зависит от уровня знаний эксперта. |
| Метод типа "Дельфи" | Смысл метода: при помощи опросов группы независимых экспертов найти определённо верное решение. Основные особенности: заочность и многоуровневость. | Вырабатывает независимое мышление; Объективно изучает вопрос с разных сторон. | Долгий; Сложная организация. |
| Методы типа "дерева целей" | Исследуемая задача разделяется на более мелкие подцели и формируется иерархическая структура, называемая деревом. | Повышает эффективность принимаемых решений. | Долгий; Требуется больших усилий. |
| Морфологические методы | Основная идея: перебор всех возможных вариантов решения задачи путем составления таблиц с | Наглядность, полученных результатов; Возможность программной реализации. | Необходимы серьёзные статистические данные. |

Продолжение таблицы 3.1

| Название | Описание | Достоинства | Недостатки |
|----------|---|-------------|------------|
| | перечислением основных элементов задачи и их комбинация. Таким образом есть вероятность, что найдётся решение, которое ранее не было рассмотрено. | | |

Несмотря на достоинства каждого из методов, их отдельное применение к задаче обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности затруднительно и не позволяет получить прямого ответа. В исследовании данной задачи лучшим решением является применение метода анализа иерархий (МАИ), который комбинирует в себе достоинства вышеперечисленных методов и, таким образом, устраняет большинство недостатков [9].

МАИ — это математический инструмент системного анализа для принятия решений в задачах, не имеющих определённо верного решения, и позволяет эксперту, основываясь на личном опыте, знаниях и понимании проблемы, решить её [82]. Смысл метода заключается в получении парных матриц с последующим сравнением по критериям различных групп по смыслу. Эти критерии составляют связанные между собой уровни иерархии, которые могут группироваться в несвязные множества, и таким образом структурировать сложные задачи. В МАИ входят следующие этапы указанного процесса [87-89]:

- формирование структуры проблемы со связями ее критериев;
- моделирование критериальных оценок с экспертными предпочтениями;
- синтез правила решения с установленными предпочтениями на альтернативных множествах.

Преимуществами МАИ являются [82, 86, 88, 89]:

- при сравнении экспертом факторов по парам позволяет концентрироваться на конкретной проблеме и исключает необходимость в постоянной проверке групп однородных факторов;
- в случаях, когда необходимо скорректировать факторы, при использовании МАИ пересчитываются только новые значения или же удаляются строки и столбцы, соответствующие изъятым факторам;
- МАИ использует вербально-числовую шкалу Саати, которая позволяет оценивать факторы, выражаемые в разных размерностях;
- МАИ позволяет проверять результаты экспертов на согласованность, что является удобством при автоматизации процесса.

К недостаткам МАИ следует отнести [3, 5, 90, 91]:

- МАИ не позволяет проверить оценку эксперта на согласованность, если критериев больше 15. В таких случаях необходимо дальнейшее разделение на подгруппы;
- оценки являются субъективными, поскольку эксперт опирается исключительно на собственные знания и опыт.

3.2. Разработка дерева целей для задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин режущего органа проходческого комбайна АМ-75

Иерархия — это тип системы, при которой его элементы могут группироваться в множества, несвязанные между собой. Однако элементы одних групп находятся под влиянием других и так далее [87].

Задача обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа комбайна в алмазодобывающей промышленности является достаточно сложной и обширной. Для её успешного выполнения необходимо не только учитывать ряд мероприятий, которые оказывают как прямое, так и косвенное влияние, но и подобрать экспертов, имеющих достаточный уровень знаний, для выставления адекватных оценок при парных сравнениях. В практике не редки случаи, когда количество элементов и их связей настолько

велико, что затрудняет анализ. В таких случаях необходимо разделение системы на подсистемы.

На рисунке 7 в виде дерева целей представлены критерии, наиболее влияющие на обеспечение заданного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75. Первый уровень является уровнем общей цели и представляет собой основную задачу. В нашем случае это обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности. На втором уровне были расположены критерии, влияющие на прирост уровня эксплуатационной надёжности. На третьем уровне и четвёртом уровне были классифицированы мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности, где 1.1.1.1. — Ремонт по техническому состоянию; 1.1.1.2. — Фирменный метод ТО и ремонта; 1.1.2.1. — ТО по событию; 1.1.2.2. — ТО по регламенту; 1.1.2.3. — ТО по состоянию; 1.1.3.1. — Соблюдение эксплуатационных режимов; 1.1.3.2. — Энергосберегающие мероприятия; 1.1.3.3. — Модернизация оборудования; 1.1.4.1. — Средства и сооружения для выполнения ТО и ремонта; 1.2.1.1. — Тестовое диагностирование; 1.2.1.2. — Рабочее диагностирование; 1.2.1.3. — Экспресс-диагностирование; 1.3.1.1. — Параметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.2. — Непараметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.3. — Определение работоспособного интервала времени с заданной вероятностью; 1.3.1.4. — Определение вероятности работоспособности в определенный интервал времени.

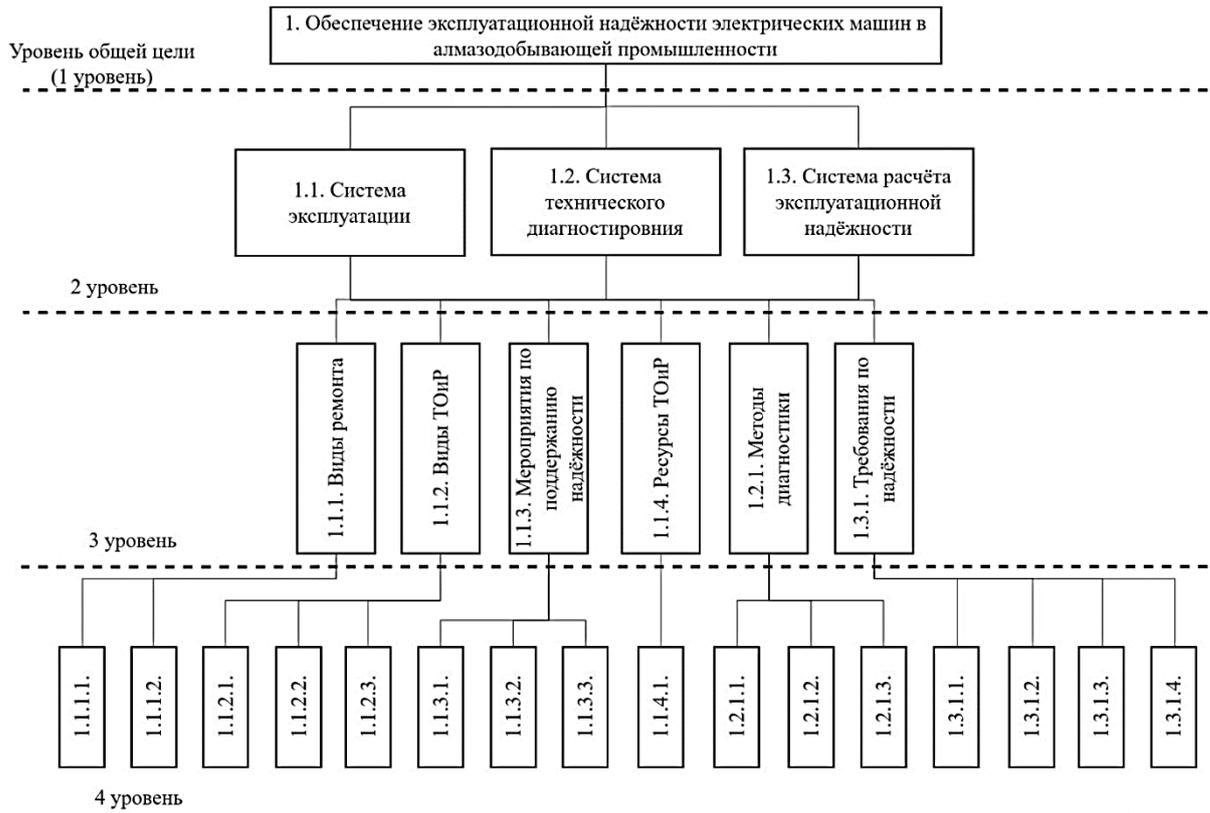


Рисунок 7 - Дерево целей для задачи по обеспечению эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75.

На примере расчёта критериев 2 уровня относительно главной цели рассмотрим работу механизма МАИ [4, 82]. После построения дерева целей экспертами заполняется матрица парных сравнений порядка n (n - количество критериев). Для данной работы экспертные оценки были получены от инженеров алмазодобывающего комплекса в г. Мирный (Якутия). Такая матрица является квадратной, обратно симметричной с единицами на главной диагонали. Сравнение происходит между критериями в строчках с критериями в столбцах по правилам (3.1) [88, 92, 93]:

$$x_{ij} = x; x_{ji} = 1/x; x_{ij} = x_{ji} = 1 \quad (3.1)$$

где x - оценка эксперта по 9-балльной шкале, где 1 означает равную важность, а 9 - полное превосходство одного критерия над другим (таблица 3.2).

Таблица 3.2

| Суждение | Расшифровка |
|----------|----------------------------|
| 1 | Равная важность |
| 2 | Компромиссное решение |
| 3 | Умеренное превосходство |
| 4 | Компромиссное решение |
| 5 | Существенное превосходство |
| 6 | Компромиссное решение |
| 7 | Значительное превосходство |
| 8 | Компромиссное решение |
| 9 | Полное превосходство |

Если рассматривается n критериев, то всего возможно наличие $\frac{n^2-n}{2}$ значащих сочетаний [87, 94-96]. Например, при сравнении пары критериев 1.1. и 1.3. эксперт посчитал, что первый умеренно превосходит второй, что соответствует цифре 3 в таблице 3.2. Это значит, что паре критериев 1.3. и 1.1. автоматически соответствует значение $1/3$. Далее по формуле (3.2) находим геометрическую сумму каждой строки и по (3.3) их сумму:

$$a_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}} \quad (3.2)$$

$$\sum a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n \quad (3.3)$$

Компонентами нормализованного вектора приоритетов являются отношения геометрической суммы строк на общую сумму и рассчитывается по формуле (3.4):

$$V_i = a_i / \sum a_i \quad (3.4)$$

$$V_1 = 0,25; V_2 = 0,65; V_3 = 0,1.$$

В алгоритм МАИ заложен расчёт индекса согласованности (ИС), который необходим для проверки оценок эксперта на согласованность [82, 93]. Для

начала нужно произвести расчёт максимального собственного значения матрицы λ_{max} по (3.5). Чем ближе значение λ_{max} к порядку матрицы n , тем выше будет её значение согласованности ($\lambda_{max} \geq n$) [97].

$$\lambda_{max} = V_1 * R_1 + V_2 * R_2 + \dots + V_n * R_n \quad (3.5)$$

где R_n - сумма элементов n - столбца.

Расчёт ИС производится по следующей формуле (3.6):

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.6)$$

Значение ИС необходимо сравнить с величинами средней согласованности (СС), которые были получены в работе [82] для матриц порядка от 1 до 15 (таблица 3.3). Отношение ИС к СС называется отношением согласованности (ОС) (3.7).

Таблица 3.3

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| СС | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,48 | 1,56 | 1,57 | 1,59 |

$$ОС = \frac{ИС}{СС} \quad (3.7)$$

Значения величин ОС и $ИС \leq 0,1$ говорит о том, что матрица согласована. Однако в системах с большим количеством критериев допускается величина $ОС \leq 0,2$ [82, 91, 97, 98].

Таблица 3.4

| | 1.1. | 1.2. | 1.3. | a_i | $\sum a_i$ | λ_{max} | ИС | ОС |
|------|------|------|------|-------|------------|-----------------|------|------|
| 1.1. | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 4 | 3,02 | 0,01 | 0,02 |
| 1.2. | 3 | 1 | 6 | 2,62 | | | | |
| 1.3. | 1/3 | 1/6 | 1 | 0,38 | | | | |

Для определения наиболее важного критерия в достижении главной цели воспользуемся расчётом коэффициента относительной важности (КОВ). Для его расчёта используют методы нормирования, ранжирования, групповой экспертизы и другие [82]. В нашем случае воспользуемся методом

ранжирования. Для этого необходимо в каждой строке матрицы (таблица 3.4) найти максимальное значение и вычесть его из каждого элемента строки. Итогом станет ранжированная матрица (таблица 3.5).

Таблица 3.5

| | 1.1. | 1.2. | 1.3. | a_i | $\sum a_i$ | КОВ (w_j) |
|------|------|------|------|-------|------------|---------------|
| 1.1. | 1 | 1/3 | 3 | 4,67 | 14,17 | 0,329 |
| 1.2. | 3 | 1 | 6 | 8 | | 0,565 |
| 1.3. | 1/3 | 1/6 | 1 | 1,5 | | 0,106 |

КОВ критериев (3.9) есть отношение суммы элементов строки ранжированной матрицы (3.8) и общей суммы (3.3).

$$a_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3.8)$$

$$W_j = \frac{a_i}{\sum a_i} \quad (3.9)$$

Согласно таблице 3.5 наиболее сильно влияющим критерием 2 уровня является «Система технического диагностирования» с КОВ равным 0,565. Меньшее влияние оказывают «Система эксплуатации» (КОВ равен 0,329) и «Система расчёта эксплуатационной надёжности» (КОВ равен 0,106). ИС и ОС меньше 0,1, что выполняет условие согласованности. 2 уровень представляет собой разбиение главной цели на критерии, которые отображают эффективность обслуживания и эксплуатации электрических машин режущего органа комбайна. Наибольшее влияния критерия диагностики в данном случае очевидно, поскольку своевременная диагностика и ремонт ЭМ позволяют избежать внезапного выхода из строя.

По такому же алгоритму необходимо провести расчёты для 3 уровня. Однако стоит заметить, что так как вышестоящих критериев три, то и парное сравнение необходимо провести относительно каждого из трёх критериев.

В таблицах 3.6-3.8 из критериев 3 уровня рассчитаны векторы КОВ. Для получения общего вектора КОВ необходимо матрицу из трёх векторов умножить на вектор КОВ 2 уровня.

Таблица 3.6

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | КОВ (W_j) | λ_{\max} | ИС | ОС |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|------------------|------|------|
| 1.1.1. | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1/2 | 0,22 | 6,4 | 0,09 | 0,07 |
| 1.1.2. | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1/2 | 0,206 | | | |
| 1.1.3. | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 3 | 1/2 | 0,27 | | | |
| 1.1.4. | 1/4 | 1/4 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/3 | 0,052 | | | |
| 1.2.1. | 1 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 | 0,152 | | | |
| 1.3.1. | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0,1 | | | |

Таблица 3.7

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | КОВ (W_j) | λ_{\max} | ИС | ОС |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|------------------|------|------|
| 1.1.1. | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 | 9 | 0,268 | 6,4 | 0,08 | 0,07 |
| 1.1.2. | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 7 | 7 | 0,211 | | | |
| 1.1.3. | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 0,176 | | | |
| 1.1.4. | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 0,163 | | | |
| 1.2.1. | 1/7 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 0,141 | | | |
| 1.3.1. | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 | 0,042 | | | |

Таблица 3.8

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | КОВ Relative importance factor (W_j) | λ_{\max} | ИС | ОС |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|------------------|-----|------|
| 1.1.1. | 1 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 2 | 6 | 0,187 | 6,5 | 0,1 | 0,08 |
| 1.1.2. | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 4 | 8 | 0,197 | | | |
| 1.1.3. | 5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 9 | 0,192 | | | |
| 1.1.4. | 3 | 1/3 | 1/4 | 1 | 3 | 7 | 0,195 | | | |
| 1.2.1. | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1 | 6 | 0,198 | | | |
| 1.3.1. | 1/6 | 1/8 | 1/9 | 1/7 | 1/6 | 1 | 0,031 | | | |

$$\begin{array}{ccccccc}
 0,22 & 0,172 & 0,187 & & 0,189 & 1.1.1. \\
 0,206 & 0,277 & 0,197 & & 0,245 & 1.1.2. \\
 0,27 & 0,268 & 0,192 & \times 0,329 & 0,26 & 1.1.3. \\
 0,052 & 0,037 & 0,195 & \times 0,465 = & 0,058 & 1.1.4. \\
 0,152 & 0,123 & 0,198 & \times 0,206 & 0,14 & 1.2.1. \\
 0,1 & 0,124 & 0,031 & & 0,106 & 1.3.1.
 \end{array} \quad (3.10)$$

Согласно общему вектору (3.10), из критериев 3 уровня наиболее сильное влияние на главную цель имеют мероприятия по поддержанию надёжности (критерий 1.1.3.) с КОВ равным 0,26 (рисунок 8). Стоит отметить, что критерий 1.1.2. «Виды ТОиР» также имеет достаточно высокий показатель

КОВ ($W_j = 0,245$), что подтверждает сказанное выше о своевременном обслуживании. 3 уровень дерева целей является промежуточным, в котором были структурированы критерии 4 уровня, что в дальнейшем позволит произвести оценку только тех критериев, которые имеют непосредственное отношение к весомому критерию 3 уровня. Согласно дереву целей пункт 1.1.3. разделяется на критерии: «Соблюдение эксплуатационных режимов»; «Энергосберегающие мероприятия» и «Модернизация оборудования».

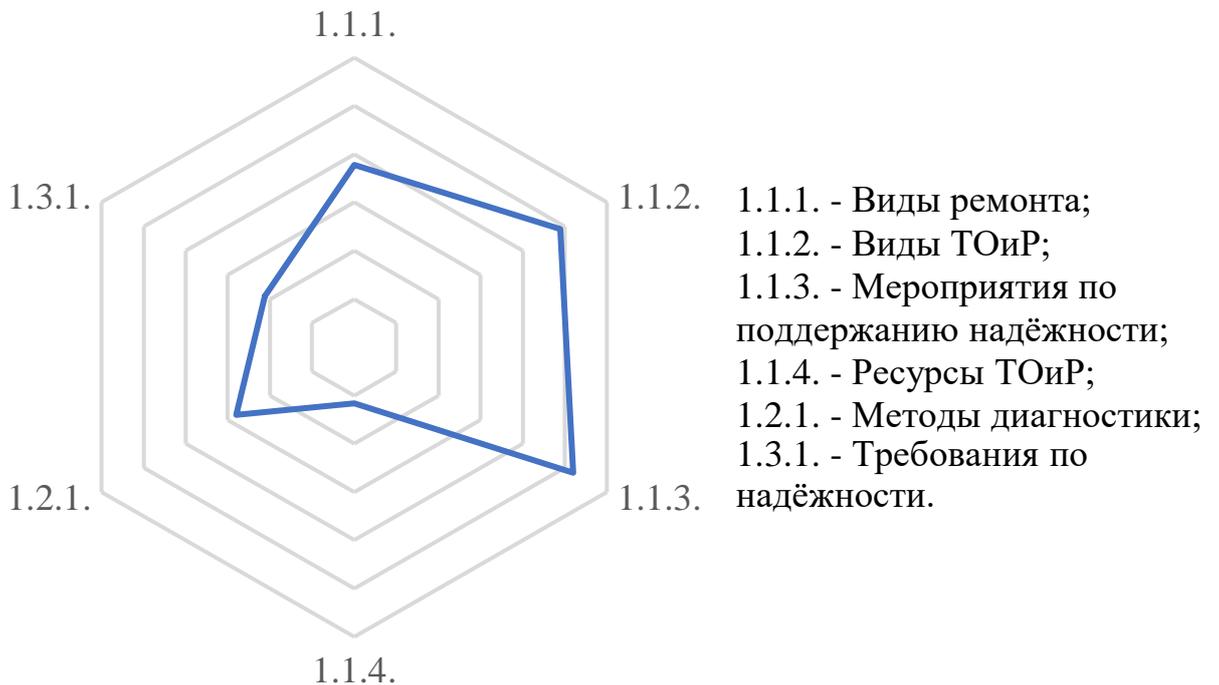


Рисунок 8 - Диаграмма значимости критериев 3 уровня

Таблица 3.9

| | 1.1.3.1. | 1.1.3.2. | 1.1.3.3. | КОВ (W_j) | λ_{\max} | ИС | ОС |
|----------|----------|----------|----------|---------------|------------------|------|------|
| 1.1.3.1. | 1 | 7 | 2 | 0,336 | 3,05 | 0,03 | 0,05 |
| 1.1.3.2. | 1/7 | 1 | 1/7 | 0,068 | | | |
| 1.1.3.3. | 1/2 | 7 | 1 | 0,596 | | | |

Согласно полученному вектору (таблица 3.9), критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель [3, 5].

3.3. Выводы

С помощью метода анализа иерархий систематизирована задача обеспечения эксплуатационной надёжности, а на основе данных, полученных от экспертов, можно выявить наиболее эффективное решение при наличии нескольких альтернатив. Получены следующие результаты.

1. Согласно вектору критериев относительной важности 2 уровня наиболее весомым критерием является «Система технического диагностирования» с КОВ равным 0,565, далее идёт «Система эксплуатации» (КОВ равен 0,329) и «Система расчёта эксплуатационной надёжности» (КОВ равен 0,106).
2. Для определения наиболее весомого критерия 3 уровня из трёх векторов каждого критерия 2 уровня был получен общий вектор КОВ, согласно которому наиболее весомым критерием, с КОВ равным 0,26, является «Мероприятия по поддержанию надёжности».
3. Критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации, элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности (80 - 98%) происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости (70 - 695 мг/м³) происходит загрязнение изоляции, что приводит к её пробоям, также забивается смазка подшипникового узла, что вызывает быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости приводит к образованию слоя пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы.
4. При расчёте все оценки экспертов подвергнуты проверке суждений на согласованность, которая во всех случаях показала значения индекса согласованности ниже 0,1 и показателей отношения согласованности ниже 0,1, что позволяет сделать правдоподобные выводы.

Результаты, полученные в работе, показывают, что в случае с проходческим комбайном АМ-75 необходимо не только усовершенствование

системы технического обслуживания и ремонта, но и модернизация самих узлов наиболее подверженных факторам внешней среды.

4. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ШАХТНОГО ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

4.1. Основные характеристики вентильного и вентильно-индукторного электродвигателей

Вентильный электродвигатель (ВД) — это двигатель, в котором переключение фаз обмотки статора осуществляет полупроводниковый коммутатор. Полупроводниковый коммутатор управляется сигналами датчика положения ротора. Датчик положения ротора служит для позиционной обратной связи в зависимости от положения магнитной оси ротора по отношению к эквивалентной магнитной оси статора и бывает нескольких типов: оптоэлектрический, магнитоиндукционный, магнитоэлектрический. Полупроводниковый коммутатор, датчик и коллектор в двигателе постоянного тока выполняют одинаковые функции. Сильный интерес к ВД с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов объясняется [98-102]: простотой конструкции, способностью работать в жёстких условиях эксплуатации, отсутствием скользящего контакта электромеханической части, широким диапазоном частот вращения. ВД обладает хорошими регулировочными характеристиками, высокими динамическими и энергетическими показателями, и возможностью управления от цифровых вычислительных машин [103-111].

Для ВД выдвигают следующие требования по надёжности [100, 102, 112]:

- средний срок сохраняемости - 9-20 лет;
- наработка до отказа - 5000-20000 ч;
- назначенный срок службы - 14-20 лет.

Анализ отказов ВД позволяет определить наиболее слабые стороны двигателя и эффективные методы обеспечения надёжности.

Вентильно-индукторные двигатели обладают уникальными свойствами, принципиально отличающими их от других электрических машин, которые обеспечивает его повышенную живучесть. Основные преимущества вентильно-индукторного электропривода, определенные в результате многолетнего опыта разработок и исследований, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом [113-114]. Одной из конструктивных особенностей ВД и ВИД является отсутствием возможности функционирования при отсутствии полупроводникового преобразователя и электронной системы управления, что не является недостатком, так как данные типы двигателей хорошо адаптированы к работе с электронной цифровой техникой, что в ряде случаев упрощает электронные блоки управления и делает их компактнее и дешевле по сравнению с АД [115].

Помимо основных преимуществ таких как низкая стоимость и надёжность, электропривод в составе с ВИД обладает следующими важными требованиями: [112-117]:

- быстродействие;
- высокая перегрузочная способность двигателя пусковым режиме порядка 4-х кратной номинальной величины вращающего момента и выше при соответствующем выборе-элементной базы преобразователя;
- ротор двигателя не содержит обмоток, а потери в стали ротора незначительны, поэтому от него не требуется отвод тепла;
- высокая точность и плавность движения на всех частотах вращения;
- сохранение высокого КПД, близкого к номинальному значению. По сравнению с частотно-регулируемым АД индукторный двигатель имеет более высокий КПД (на 3-5 %) при таких же массогабаритных показателях, т.к. для его управления не требуется широтно-импульсная модуляция напряжения (ШИМ) на частоте в 2500 Гц.
- диапазон частот вращения от 0,1 до 10000 об/мин;

- хорошие массогабаритные показатели при высоких энергетических характеристиках;
- простота конструкции магнитопроводов статора, ротора и катушечных обмоток двигателя, не имеющих пересекающихся лобовых частей.

4.2. Построение деревьев отказа асинхронного, вентильного и вентильно-индукторного электродвигателей

Метод «дерево отказов» — это дедуктивный метод определения условий и факторов, способных привести к определенному нежелательному (головному) событию и представляет логически организованную графическую конструкцию, в которой демонстрируется взаимодействие элементов системы, отказ которых по отдельности или в сочетании может способствовать отказу системы в целом [85]. Главная цель метода – графическое представление условий и критериев системы (электродвигателя), которые способны привести к отказу. Дерево отказов наглядно демонстрирует слабые места системы и может являться наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений [87].

Построение дерева отказов, как правило, начинается с выбора главного события, которое имеет большое значение для результата анализа. Главное событие должно быть выбрано конкретно и недвусмысленно [118]. В данном случае головным событием является отказ электродвигателя, которое происходит в связи с отказом одного из основных элементов. Головное событие может быть вызвано тремя видами отказов [84, 118]:

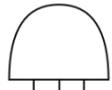
- иницирующими - неправильными действиями персонала (человеческий фактор);
- первичными - естественные процессы износа и старения;
- вторичными, возникающими при нарушении проектных и нормативных требований, технических условий и так далее.

Однако такое разделение является условным, поскольку человеческий фактор является основной причиной возникновения отказов. Например,

процессы старения и износа элементов не были своевременно обнаружены в результате плохой диагностики или некачественного ремонта.

В структуру дерева отказов входят события, которые приводят к головному событию (внешние воздействия, отказы элементов, человеческий фактор и прочие), и объединяются с помощью логических знаков (таблица 4.1). При построении дерева отказов выполняются следующие операции: значения вероятностей отказов на входах элемента «ИЛИ» складываются, а значения вероятностей отказов входах элемента «И» перемножаются [85, 118].

Таблица 4.1

| Логический знак | | Пояснение |
|---|----------------|---|
| Графическое изображение | Название | |
|  | Или | Вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий. |
|  | И | Вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий. |
|  | Приоритетное И | Вышестоящее событие наступает, если предыдущие события происходят в нужном порядке слева направо. |

Деревья отказов асинхронного, вентильного и вентильно-индукторных двигателей представлено на рис. 9, 10, 11, в котором представлены неисправности шести основных элементов. Деревья отказов элементов представлены в приложениях, где события, взятые в круг — это исходные события - предпосылки.

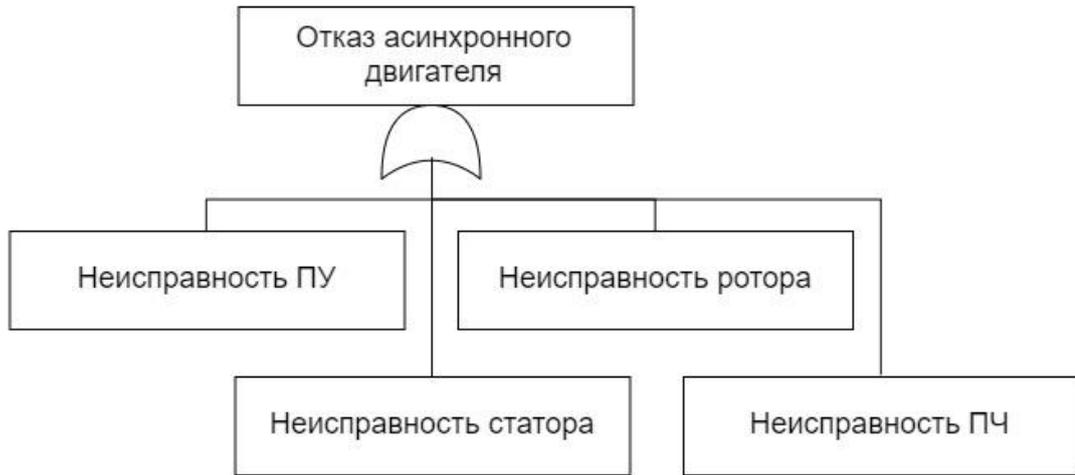


Рисунок 9. Дерево отказов асинхронного двигателя

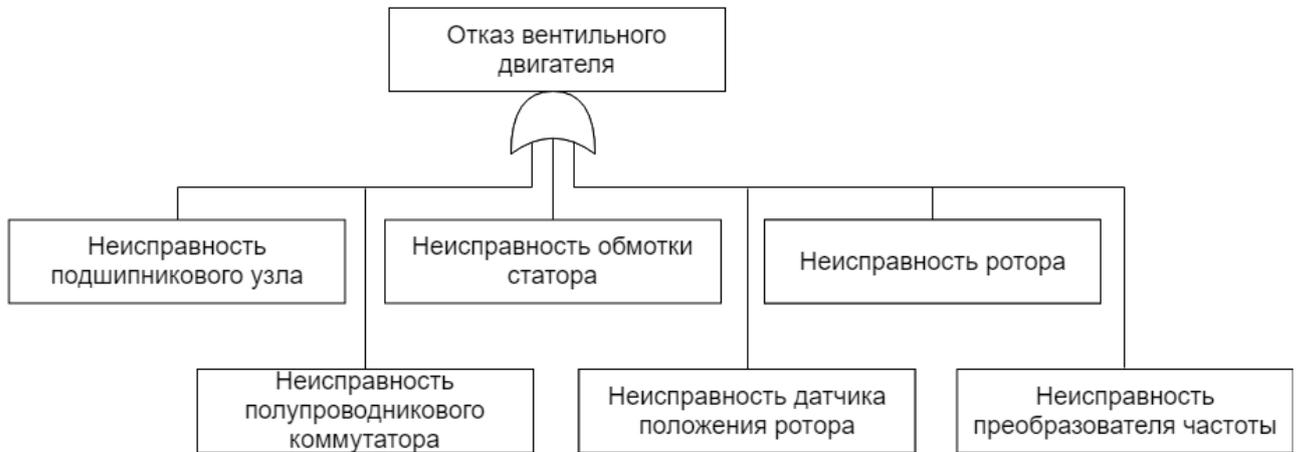


Рисунок 10. Дерево отказов вентильного двигателя

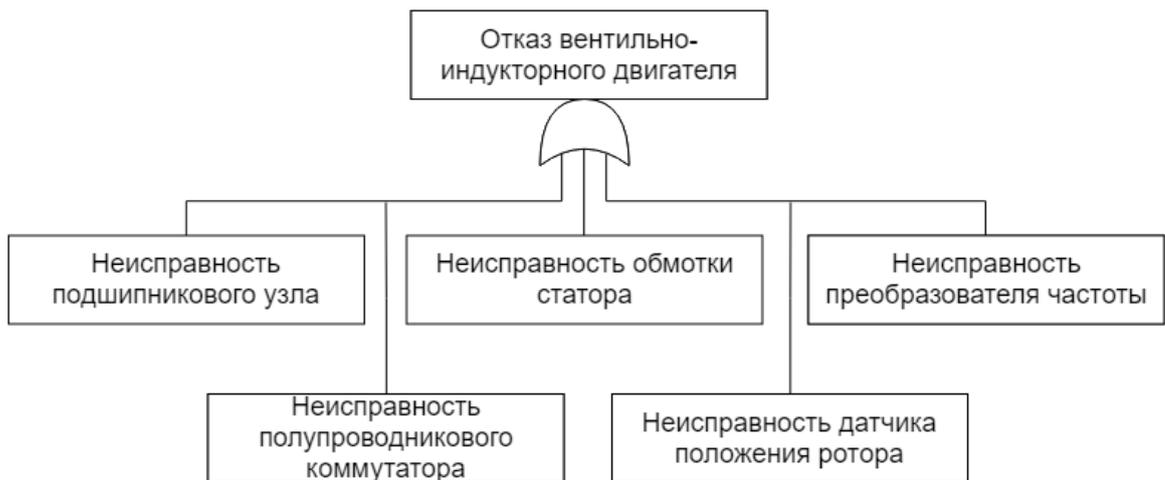


Рисунок 11. Дерево отказов вентильно-индукторного двигателя

4.3. Расчет интенсивности отказов

В настоящее время интенсивность отказов (λ) является основной характеристикой вероятности безотказной работы, приводимой в технических

документах. Интенсивность отказов — это условная плотность вероятности возникновения отказа, которая определяется как отношение количества отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени, и определяется формулой (4.1) [38, 115, 116]:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t} \quad (4.1)$$

где $N_{\text{ср}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$ — среднее число изделий, исправно работающих в интервале времени Δt ; N_i, N_{i+1} — число изделий, исправно работающих в начале и конце интервала Δt .

Согласно деревьям отказов, интенсивность отказа электродвигателей определяется по следующим формулам (4.2-4.4) из чего следует, что каждая составная часть вносит свой вклад в общую интенсивность отказов электродвигателя [115-119]:

- асинхронный двигатель:

$$\lambda_{\text{АД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{Р}} + \lambda_{\text{С}} \quad (4.2)$$

где $\lambda_{\text{ПУ}}$ - интенсивность отказов подшипникового узла; $\lambda_{\text{Р}}$ - интенсивность отказов ротора; $\lambda_{\text{С}}$ - интенсивность отказов статора.

- вентильный двигатель:

$$\lambda_{\text{ВД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{Р}} + \lambda_{\text{С}} + \lambda_{\text{ПК}} + \lambda_{\text{ДПР}} + \lambda_{\text{ПЧ}} \quad (4.3)$$

где $\lambda_{\text{ПУ}}$ - интенсивность отказов подшипникового узла; $\lambda_{\text{Р}}$ - интенсивность отказов ротора; $\lambda_{\text{С}}$ - интенсивность отказов статора; $\lambda_{\text{ПК}}$ - интенсивность отказов полупроводникового коммутатора; $\lambda_{\text{ДПР}}$ - интенсивность отказов датчика положения ротора; $\lambda_{\text{ПЧ}}$ - интенсивность отказов преобразователя частоты.

- вентильно-индукторный двигатель:

$$\lambda_{\text{ВИД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{С}} + \lambda_{\text{ПК}} + \lambda_{\text{ДПР}} + \lambda_{\text{ПЧ}} \quad (4.4)$$

где $\lambda_{\text{пу}}$ - интенсивность отказов подшипникового узла; $\lambda_{\text{с}}$ - интенсивность отказов статора; $\lambda_{\text{пк}}$ - интенсивность отказов полупроводникового коммутатора; $\lambda_{\text{дпр}}$ - интенсивность отказов датчика положения ротора; $\lambda_{\text{пч}}$ - интенсивность отказов преобразователя частоты.

В данной работе для асинхронного двигателя интенсивности отказов элементов получены из журналов и отчётов о ремонте асинхронных двигателей, эксплуатируемых в условиях алмазодобывающего рудника в г. Мирный. Расчётные показатели интенсивности отказов асинхронного двигателя рассчитаны по формулам (4.1, 4.5, 4.6) и сведены в таблицу 4.2.

Вероятность безотказной работы (ВБР) — это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа [16- 20]:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (4.5)$$

где N_0 — исходное число работоспособных объектов; $n(t)$ — число отказавших объектов за время t .

Частота отказов - отношение количества отказавших изделий в единицу времени к первоначальному количеству испытываемых изделий:

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} \quad (4.6)$$

где $n(\Delta t)$ — количество отказавших изделий в интервале времени Δt ; $n(t)$ — число отказавших объектов за время t .

Таблица 4.2

| Часы | Подшипниковый узел | | | |
|--|--------------------|--------|--------|--------|
| | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 16 500 |
| Общее количество изделий, N_0 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Количество отказов, $n(t)$ | 4 | 8 | 10 | 12 |
| Вероятность безотказной работы, $P(t)$ | 0,66 | 0,33 | 0,16 | 0 |

Продолжение таблицы 4.2

| Часы | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 16 500 |
|---|-------|--------|--------|--------|
| Частота отказов, $a(t) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 6,6 | 6,6 | 3,3 | 11 |
| Среднее число работоспособных изделий в интервале N_{cp} | 10 | 6 | 3 | 1 |
| Интенсивность отказов, $\lambda(t) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 8 | 13,3 | 13,3 | 133 |
| Ротор | | | | |
| Часы | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 24 500 |
| Общее количество изделий, N_0 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Количество отказов, $n(t)$ | 4 | 8 | 10 | 12 |
| Вероятность безотказной работы, $P(t)$ | 0,53 | 0,41 | 0,23 | 0 |
| Частота отказов, $a(t) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 9,4 | 2,35 | 3,5 | 2,5 |
| Среднее число работоспособных изделий в интервале N_{cp} | 13 | 8 | 6 | 2 |
| Интенсивность отказов, $\lambda(t) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 12,3 | 5 | 11 | 21,1 |
| Статор | | | | |
| Часы | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 28 000 |
| Общее количество изделий, N_0 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Количество отказов, $n(t)$ | 4 | 8 | 10 | 12 |
| Вероятность безотказной работы, $P(t)$ | 0,53 | 0,41 | 0,23 | 0 |
| Частота отказов, $a(t) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 4,6 | 10,8 | 3 | 59,2 |

Продолжение таблицы 4.2

| Часы | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 28 000 |
|--|-------|--------|--------|--------|
| Среднее число работоспособных изделий в интервале, N_{cp} | 12 | 7 | 2 | 1 |
| Интенсивность отказов, $\lambda(t) * 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ | 5,2 | 21,5 | 20 | 15,4 |

При сравнении результатов, полученных методом множительных оценок Каплана-Мейера и методом анализа дерева отказов, ошибка составила менее 1% (таблица 4.3).

Таблица 4.3

| | 5 000 | | 10 000 | | 15 000 | |
|---------------------------|-------|------|--------|------|--------|------|
| Подшипниковый узел | 0,66 | 0,66 | 0,33 | 0,33 | 0,16 | 0,16 |
| Ротор | 0,53 | 0,53 | 0,41 | 0,41 | 0,23 | 0,23 |
| Статор | 0,53 | 0,53 | 0,41 | 0,41 | 0,23 | 0,23 |

В реальных условиях эксплуатация может происходить в жёстких условиях, далёких от нормальных, в связи с чем возникает задача определения интенсивности отказов, соответствующей эксплуатационным факторам. Такая интенсивность носит название эксплуатационная и рассчитывается по формуле (4.7) [114]:

$$\lambda_э = \lambda_0 \prod_{i=1}^m K_i \quad (4.7)$$

где λ_0 - справочное значение интенсивности отказов элемента; m - количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов; K_i - поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора.

Для элементов вентильного и вентильно-индукторного двигателей характерны следующие формулы (4.8-4.11) эксплуатационной интенсивности отказов [114, 119]:

- диод, транзистор:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{р}} K_{\text{ф}} K_{\text{с}} K_{\text{э}} K_{\text{пр}} \quad (4.8)$$

- резистор:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{р}} K_{\text{R}} K_{\text{э}} K_{\text{пр}} \quad (4.9)$$

- согласующий трансформатор:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{t}} K_{\text{э}} K_{\text{пр}} \quad (4.10)$$

- конденсатор:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{р}} K_{\text{с}} K_{\text{э}} K_{\text{пр}} \quad (4.11)$$

где $\lambda_{\text{б}}$ - справочное значение интенсивности отказов элемента; $K_{\text{р}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от электрической нагрузки и температуры окружающей среды ил корпуса; $K_{\text{ф}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от функционального назначения прибора; $K_{\text{с}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины рабочего напряжения относительно максимально допустимого; $K_{\text{э}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий коэффициент жесткости условий эксплуатации; K_{R} - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины номинального сопротивления; $K_{\text{с}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины номинальной емкости; K_{t} - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от максимально допустимых температур.

В таблице 4.4 сведены значения поправочных коэффициентов [119].

Таблица 4.4

| Элемент | | Коэффициент | | λ_6 | K_p | K_ϕ | K_s | K_ε | K_R | K_C | K_t | $K_{пр}$ |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 | λ_6 |
| | | | $\cdot 10^{-6},$ | ч^{-1} | | | | | | | | |
| Полупроводниковый коммутатор | | Диод | 0,025 | 0,356 | 0,6 | 1 | 4 | - | - | - | - | 0,45 |
| | | Транзистор | 0,044 | 0,474 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | - | 0,35 |
| Датчик положения ротора | Датчик Холла | Транзистор | 0,044 | 0,474 | 1,5 | 3 | 5 | - | - | - | - | 0,35 |
| | | Магнит | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Фотоэлектрический датчик | Фотодиод | 0,185 | - | - | - | 4 | - | - | - | 1 | 0,7 |
| | | Индуктивный датчик | Дроссель | 0,02 | 0,5 | - | - | 18 | - | - | - | - |
| | | | Магнит | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Преобразователь частоты | Выпрямитель | Резистор | 0,05 | 0,81 | - | - | 5 | 1 | - | - | - | - |
| | | Конденсатор | 0,029 | 0,527 | - | - | 5 | - | 1,59 | - | - | 0,3 |
| | | Диод | 0,091 | 0,356 | 1,5 | 1 | 4 | - | - | - | - | 0,2 |
| | | Транзистор | 0,044 | 0,474 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | - | 0,35 |
| | | Трансформатор | 0,002 | - | - | - | 5 | - | - | - | 1 | 0,2 |
| | Инвертор | Диод | 0,091 | 0,355 | 0,6 | 1 | 4 | - | - | - | - | 0,2 |

Продолжение таблицы 4.4

| Элемент | | Коэффициент | | λ_6 | K_p | K_ϕ | K_s | K_ε | K_R | K_C | K_t | $K_{пр}$ |
|---------------------|-------------|---------------|--|---------------------------------|-------|----------|-------|-----------------|-------|-------|-------|----------|
| | | | | $* 10^{-6},$ ч^{-1} | | | | | | | | |
| | | Транзистор | | 0,044 | 0,473 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | 0,35 |
| Датчик тока | | Резистор | | 0,05 | 0,81 | - | - | 5 | 1 | - | - | - |
| | | Магнит | | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Компаратор | Резистор | | 0,05 | 0,81 | - | - | 5 | 1 | - | - | - |
| | | Транзистор | | 0,044 | 0,474 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | 0,35 |
| Магнитный подшипник | | Магнит | | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Выпрямитель | Резистор | | 0,05 | 0,81 | - | - | 5 | 1 | - | - | - |
| | | Конденсатор | | 0,029 | 0,527 | - | - | 5 | - | 1,59 | - | 0,3 |
| | | Диод | | 0,091 | 0,355 | 1,5 | 1 | 4 | - | - | - | 0,2 |
| | | Транзистор | | 0,044 | 0,474 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | 0,35 |
| | | Трансформатор | | 0,0019 | - | - | - | 5 | - | - | 1 | 0,2 |
| | Усилитель | Резистор | | 0,05 | 0,81 | - | - | 5 | 1 | - | - | - |
| | | Транзистор | | 0,044 | 0,474 | 0,7 | 3 | 5 | - | - | - | 0,35 |

В таблице 4.5-4.9 представлены результаты расчётов эксплуатационной интенсивности отказов элементов вентильного и вентильно-индукторного двигателей. На рисунках 13, 14 представлены графики сравнения эксплуатационной интенсивности отказов ВД и ВИД с применением магнитных подшипников и без них.

Таблица 4.5

| Элемент | | Коэффициент | | Кол- во эleme нтов, n | $\prod_{i=1}^m K_i$ | λ_3 $* 10^{-6}$, τ^{-1} | $\lambda_3 * n$ $* 10^{-6}$, τ^{-1} |
|--|-------------------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| Полупроводниковый коммутатор | | Диод | | 6 | 0,384 | 0,010 | 0,06 |
| | | Транзистор | | 6 | 1,741 | 0,077 | 0,460 |
| Датчик положения ротора | Датчик Холла | Транзистор | | 1 | 3,731 | 0,164 | 0,164 |
| | | Магнит | | 1 | - | 0,001 | 0,001 |
| | Фотоэлектрический датчик | Фотодиод | | 1 | 2,800 | 0,518 | 0,518 |
| | | Индуктивный датчик | Дроссель | | 1 | 1,800 | 0,036 |
| | Магнит | | 1 | - | 0,001 | 0,001 | |
| | Преобразователь частоты | Выпрямитель | Резистор | | 1 | 4,050 | 0,203 |
| Конденсатор | | | 1 | 1,257 | 0,036 | 0,036 | |
| Диод | | | 6 | 0,426 | 0,039 | 0,233 | |
| Транзистор | | | 1 | 1,741 | 0,077 | 0,077 | |
| Трансформатор | | | 1 | 1,000 | 0,002 | 0,002 | |
| Инвертор | | Диод | | 6 | 0,170 | 0,016 | 0,093 |
| | | Транзистор | | 6 | 1,741 | 0,077 | 0,460 |
| Датчик тока | | Резистор | | | 3 | 4,050 | 0,203 |
| | Магнит | | | 3 | - | 0,001 | 0,003 |
| | Компаратор | Резистор | | 9 | 4,050 | 0,203 | 1,827 |
| | | Транзистор | | 6 | 1,741 | 0,077 | 0,462 |
| Подшипниковый узел | | | | 2 | - | 125 | 250 |
| Обмотка статора | | | | 1 | - | 0,03 | 0,03 |
| Ротор | | Магнит | | 12 | - | 0,001 | 0,012 |

Таблица 4.6

| Температура окружающей среды | Интенсивность отказов, 10^{-6} ч^{-1} | | | | |
|---------------------------------|---|--------|--------|--------|---------------|
| | 25 °C | 35 °C | 45 °C | 55 °C | Среднее |
| ВД с датчиком Холла | 254,72 | 255,44 | 256,55 | 258,34 | 256,26 |
| ВД с фотоэлектрическим датчиком | 255,07 | 255,81 | 256,92 | 258,65 | 256,61 |
| ВД с индуктивным датчиком | 254,59 | 255,27 | 256,33 | 258,03 | 256,05 |
| ВД с бездатчиковым управлением | 254,55 | 255,23 | 256,29 | 257,97 | 256,01 |

Таблица 4.7

| Температура окружающей среды | Интенсивность отказов, 10^{-6} ч^{-1} | | | | |
|----------------------------------|---|--------|--------|--------|---------------|
| | 25 °C | 35 °C | 45 °C | 55 °C | Среднее |
| ВИД с датчиком Холла | 254,71 | 255,42 | 256,54 | 258,33 | 256,25 |
| ВИД с фотоэлектрическим датчиком | 255,06 | 255,80 | 256,90 | 258,64 | 256,60 |
| ВИД с индуктивным датчиком | 254,58 | 255,26 | 256,31 | 258,02 | 256,04 |
| ВИД с бездатчиковым управлением | 254,54 | 255,22 | 256,28 | 257,96 | 256,00 |

Таблица 4.8

| Температура окружающей среды | Интенсивность отказов, 10^{-6} ч^{-1} | | | | |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|--------------|
| | 25 °C | 35 °C | 45 °C | 55 °C | Среднее |
| ВД с датчиком Холла | 9,85 | 11,17 | 13,23 | 16,43 | 12,67 |
| ВД с фотоэлектрическим датчиком | 10,20 | 11,55 | 13,60 | 16,74 | 13,02 |
| ВД с индуктивным датчиком | 9,72 | 11,01 | 13,01 | 16,12 | 12,46 |
| ВД с бездатчиковым управлением | 9,68 | 10,97 | 13,01 | 16,06 | 12,43 |

Таблица 4.9

| Температура окружающей среды | Интенсивность отказов, 10^{-6} ч^{-1} | | | | |
|----------------------------------|---|-------|-------|-------|--------------|
| | 25 °C | 35 °C | 45 °C | 55 °C | Среднее |
| ВИД с датчиком Холла | 9,83 | 11,16 | 13,22 | 16,42 | 12,66 |
| ВИД с фотоэлектрическим датчиком | 10,19 | 11,54 | 13,58 | 16,73 | 13,01 |
| ВИД с индуктивным датчиком | 9,71 | 10,99 | 12,99 | 16,11 | 12,45 |
| ВИД с бездатчиковым управлением | 9,67 | 10,96 | 12,99 | 16,05 | 12,42 |

В таблице 4.10 выделены средние интенсивности отказов элементов АД.

Таблица 4.10

| Элемент АД | Интенсивность отказов, 10^{-6} ч^{-1} |
|-------------------------|---|
| Ротор | 123,5 |
| Статор | 621 |
| Подшипниковый узел | 420 |
| Преобразователь частоты | 1,104 |
| Асинхронный двигатель | 1165,6 |

Согласно полученным значениям эксплуатационной интенсивности отказов и их графикам (рисунок 13, 14) асинхронного, вентильного и вентильно-индукторного электродвигателей, наиболее эффективным решением является эксплуатация вентильно-индукторного двигателя с бездатчиковым управлением с применением магнитных подшипников [11]. Его применение позволит в несколько раз сократить простой горного оборудования в связи с внезапными отказами электродвигателя.

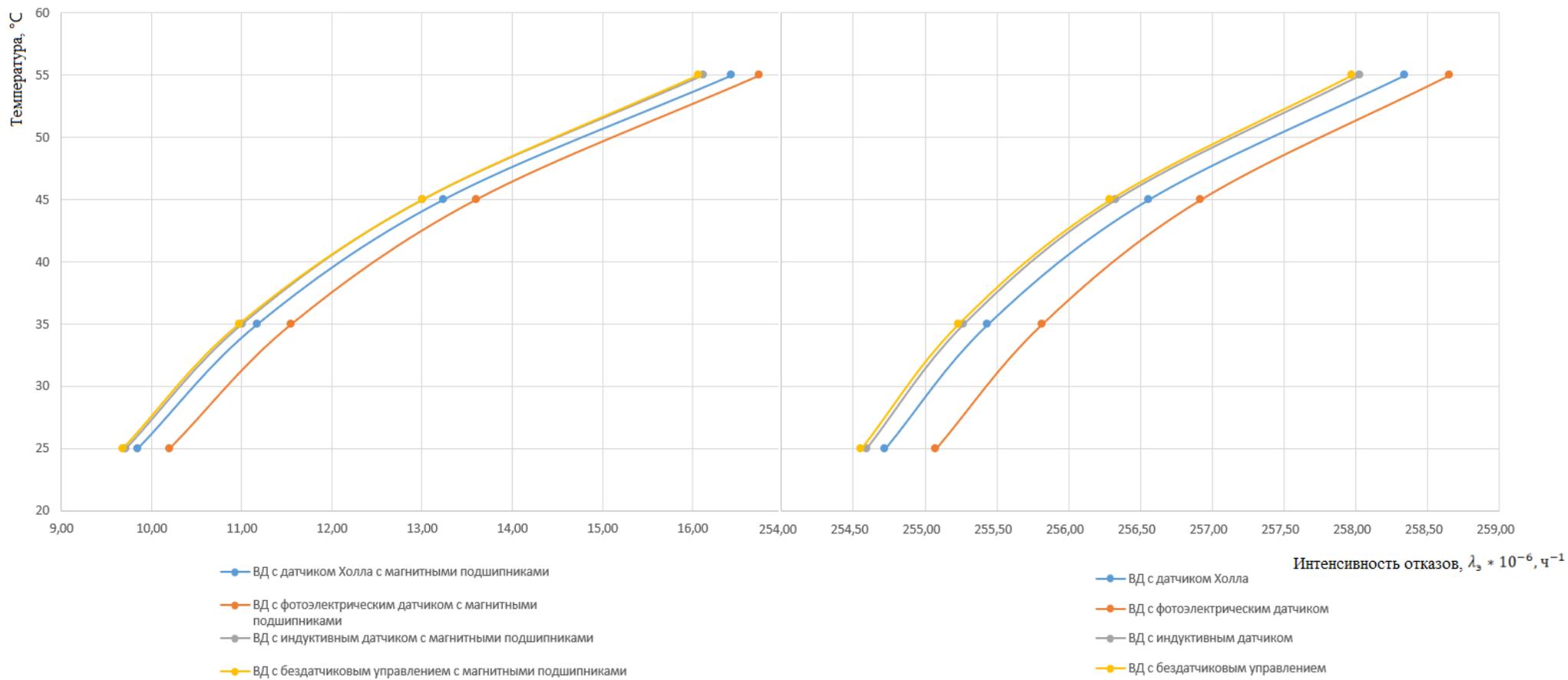


Рисунок 13. Графики эксплуатационной интенсивности отказов вентильного двигателя (ВД)

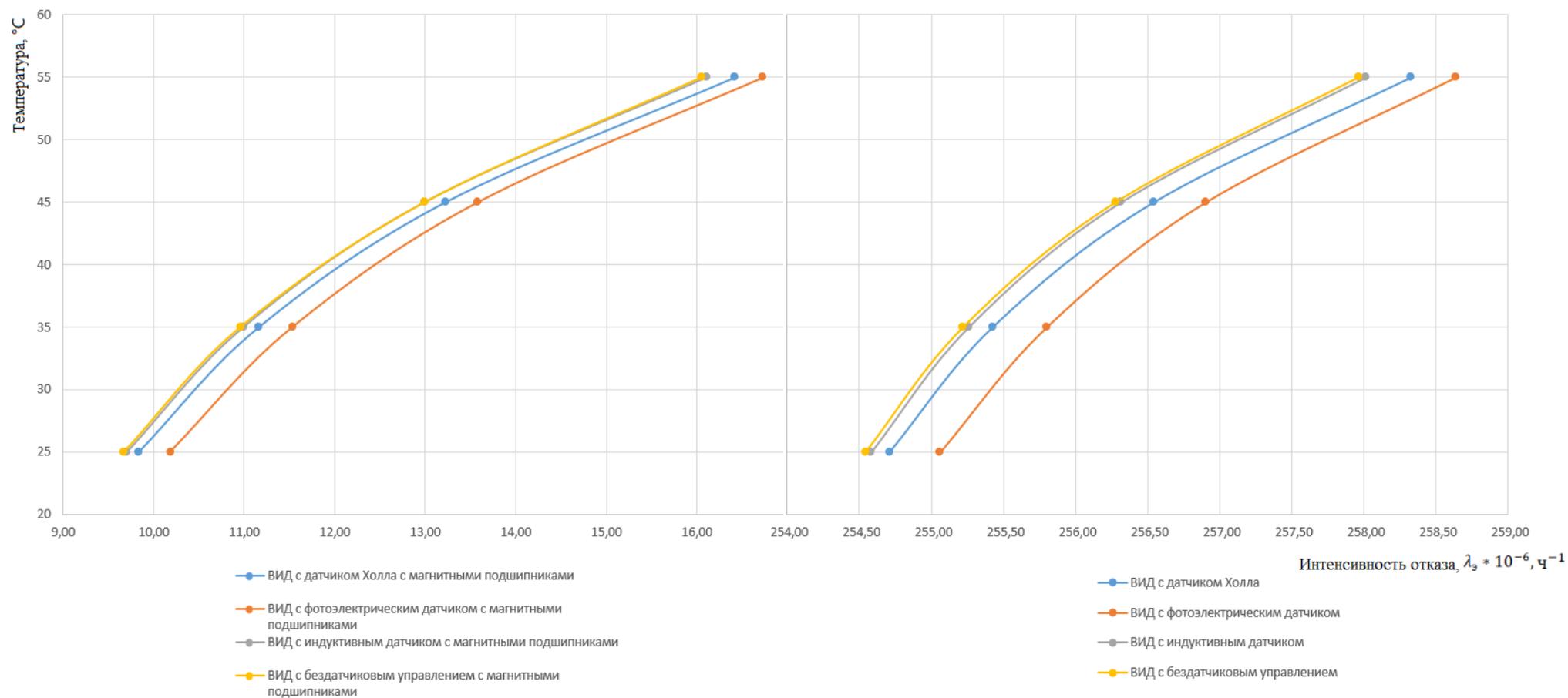


Рисунок 14. Графики эксплуатационной интенсивности отказов вентильно-индукторного двигателя (ВИД)

4.4. Выводы

Впервые разработаны деревья отказов для асинхронного, вентильного и вентильно-индукторной электрических машин, что позволяет в явном виде определять уязвимые элементы двигателей и модернизировать их. Деревья отказов обладают наглядностью, что делает их удобным и надёжным инструментом в работе.

Определены показатели интенсивности отказов для асинхронного, вентильного и вентильно-индукторного электрических машин. Наименьшим показателем обладает вентильно-индукторный электродвигатель с бездатчиковым управлением с применением магнитных подшипников. ($12,42 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$). В данном случае интенсивность отказов бездатчикового управление на 2% ниже интенсивности отказов датчика Холла ($12,66 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$); на 4,7% ниже фотоэлектрического датчика ($13,01 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$) и на 0,2% ниже индуктивного датчика ($12,45 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$). При сравнении с вентильно-индукторным двигателем с подшипниками качения, то двигатель с магнитными подшипниками с датчиком Холла имеет меньшую интенсивность отказа на 95,1%; с фотоэлектрическим датчиком меньше на 95%; с индуктивным датчиком меньше на 95,2% и при бездатчиковом управлении меньше на 95,2%. Поскольку разница показателей интенсивности отказов вентильного и вентильно-индукторного двигателей составляет 0,1% в пользу вентильно-индукторного двигателя, то вышеперечисленные процентные соотношения справедливы и для вентильного двигателя.

Показатели интенсивности отказов таких машин ниже, чем у используемых на данный момент асинхронных двигателей, на 78% (при использовании подшипников качения) и 99% (при использовании магнитных подшипников), что говорит о более высокой эффективности эксплуатации в условиях горнорудной добычи. Низкая интенсивность отказа вентильного и вентильно-индукторного электрических машин объясняется отсутствием подвижных частей, в том числе подшипников качения ($250 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), которые в сравнении с магнитными подшипниками ($5 - 8 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), имеют интенсивность отказа выше на 96,8% - 98%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности ещё долгое время будет являться актуальной задачей поскольку от неё зависят такие важные факторы для алмазодобывающей отрасли как экономический эффект и безопасность рабочего персонала. Необходимо постоянное усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта с учётом современных методов и технологий. Материалы, представленные в диссертационной работе, позволяют решить задачи, направленные на прогнозирование времени, при котором наиболее вероятен отказ электрической машины, с помощью информации, полученной во время эксплуатации; сокращение времени простоя оборудования; определение мероприятий для наиболее эффективного решения задачи обеспечения эксплуатационной надёжности. Проведённые в работе исследования можно представить следующими результатами.

1. Методом анализа выживаемости определено оборудование и узлы электрических машин наиболее подверженные отказам. В ходе исследования были получены следующие результаты. Из представленных производственных объектов (рудник «Мир», рудник «Интернациональный» и обогатительная фабрика №3) наиболее подвержено отказам оборудование на руднике «Мир» (вероятность дожития до 30000 часов - 11%). В качестве исследуемых объектов на руднике «Мир» были рассмотрены проходческие комбайны АМ-75 и АМ-105. В результате было выявлено, что самой низкой вероятностью безотказной работы обладает проходческий комбайн марки АМ-75 (вероятность дожития до 15000 часов - 11%). Далее были проанализированы отказы рабочих элементов проходческого комбайна АМ-75. Анализ показал, что режущий орган комбайна имеет наименьшую оценку выживаемости (вероятность дожития до 10000 часов - 10%). Используемый метод анализа также помог определить наиболее подверженный дефектам узел ЭМ режущего органа комбайна АМ-75, им является подшипниковый узел (вероятность дожития до 15000 - 18%).

2. Впервые предложен подход оценивания выживаемости электрических машин переменного тока методом множительных оценок Каплана-Мейера на основании полученных данных об отказах электрических машин, эксплуатируемых в условиях алмазодобывающего комплекса АК «АЛРОСА». Из графиков выживаемости получены интервалы критического времени электрических машин и их узлов, при котором отказ наиболее вероятен.

3. В работе впервые выполнен подробный анализ иерархий для задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин режущего органа проходческого комбайна АМ-75, эксплуатируемого в алмазодобывающей промышленности. Анализ показал, что со значением коэффициента относительной важности равным 0,596 критерий «Модернизация оборудования» наиболее сильно влияет на главную цель.

4. Разработаны деревья отказов для асинхронного, вентильного и вентильно-индукторных электрических машин, которые с помощью информации об отказах позволяют выявить слабые стороны машин. С помощью деревьев отказов определены показатели интенсивности отказов и можно утверждать, что вентильно-индукторный электродвигатель с бездатчиковым управлением и применением магнитных подшипников являются наиболее эффективным решением (интенсивность отказа равна $12,42 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$) для горного оборудования алмазодобывающей промышленности. Показатели интенсивности отказов данной машины ниже на 99% в сравнении с используемым на данный момент асинхронным двигателем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД - асинхронный двигатель.

АК «АЛРОСА» - акционерная компания «АЛРОСА».

ВБР - вероятность безотказной работы.

ВД - вентильный двигатель.

ВИД - вентильно-индукторный двигатель.

ЗИП - поставка запасных частей, инструмента и принадлежностей.

ИС - индекс согласованности.

КОВ - коэффициент относительной важности.

КР - капитальный ремонт.

МНК - методы неразрушающего контроля.

НТД - нормативно-техническая документация.

ОД - объект диагностирования.

ОКР - опытно-конструкторские работы.

ОС - отношение согласованности.

ПОН - программа обеспечения надёжности.

ППР - планово-предупредительный ремонт.

СР - средний ремонт.

СС - средняя согласованность.

СФД - система функционального диагностирования.

ТО - техническое обслуживание.

ТОиР - система технического обслуживания и ремонта.

ТР - текущий ремонт.

ТУ - технические условия.

ЭМ - электрическая машина.

ЭН - эксплуатационная надёжность.

ЭП - электропривод.

Statistica - математический программный пакет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

T_i - время жизни объекта.

U_i - переменная цензурирования.

$X_i = \min (T_i, U_i)$ - цензурированное время жизни объекта.

$S(\tau_i)$ - вероятность того, что объект будет работоспособен в конце исследования.

τ_i - максимально возможный период наблюдения.

$f(t)$ - плотность распределения.

$F(t)$ - функция распределения.

$S(t)$ - вероятность того, что исследуемое событие не наступило к моменту времени t .

d_t - число отказов в момент времени t .

n_t - число наблюдавшихся к моменту t .

Φ_α - двустороннее критическое значение для стандартного нормального распределения.

α - уровень значимости.

$SE(S_i)$ - стандартная ошибка для этой доли.

x_{ij}, x_{ji} - оценка эксперта по 9-балльной шкале.

a_i - геометрическая сумма.

V_i - компонент нормализованного вектора.

λ_{max} - максимальное собственное значение матрицы.

R_n - сумма элементов n - столбца.

W_j - коэффициент относительной важности.

$\lambda(t)$ - интенсивность отказа.

N_{cp} - среднее число изделий, исправно работающих в интервале времени Δt .

N_i, N_{i+1} - число изделий, исправно работающих в начале и конце интервала Δt .

λ_{AD} - интенсивность отказов асинхронного двигателя.

$\lambda_{ВД}$ - интенсивность отказов вентильного двигателя.

$\lambda_{ВИД}$ - интенсивность отказов вентильно-индукторного двигателя.

$\lambda_{ПУ}$ - интенсивность отказов подшипникового узла.

λ_P - интенсивность отказов ротора.

λ_C - интенсивность отказов статора.

$\lambda_{\text{ПУ}}$ - интенсивность отказов подшипникового узла.

λ_P - интенсивность отказов ротора.

λ_C - интенсивность отказов статора.

$\lambda_{\text{ПК}}$ - интенсивность отказов полупроводникового коммутатора.

$\lambda_{\text{ДПР}}$ - интенсивность отказов датчика положения ротора.

$\lambda_{\text{ПЧ}}$ - интенсивность отказов преобразователя частоты.

$P(t)$ - вероятность безотказной работы.

N_0 - исходное число работоспособных объектов.

$n(t)$ - число отказавших объектов за время t .

$a(t)$ - частота отказов.

$n(\Delta t)$ - количество отказавших изделий в интервале времени Δt .

$n(t)$ - число отказавших объектов за время t .

$\lambda_э$ - эксплуатационная интенсивность отказов.

λ_0 - справочное значение интенсивности отказов элемента.

m - количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов.

K_i - поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора.

$\lambda_б$ - справочное значение интенсивности отказов элемента.

K_p - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от электрической нагрузки и температуры окружающей среды ил корпуса.

K_ϕ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от функционального назначения прибора.

K_S - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины рабочего напряжения относительно максимально допустимого.

$K_э$ - поправочный коэффициент, учитывающий коэффициент жесткости условий эксплуатации.

K_R - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины номинального сопротивления.

K_C - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от величины номинальной емкости.

K_t - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость от максимально допустимых температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчук В.А. Анализ вероятности безотказной работы электрических машин в алмазодобывающей промышленности / В.А. Шевчук, О.П. Муравлев // Горное оборудование и электромеханика. - 2018. - №4. - С. 39-45.
2. Shevchuk V.A. Survival analysis of A.C. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova // MATEC Web Conferences. - 2017. - Vol. 141.
3. Шевчук В.А. Исследование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в горнорудной промышленности / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, В.А. Шевчук // Доклады ТУСУР. - 2019. - № 3. - С. 12-20.
4. Shevchuk V.A. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova, V.P. Shevchuk // MATEC Web Conferences. - 2016. - Vol. 91.
5. Shevchuk V.A. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry / G.I. Odnokopylov, V.A. Shevchuk, Y.N. Dementyev // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. - 2019. - Vol. 330. - №5. - P. 131-140.
6. Шевчук В.А. Удалённая диагностика асинхронного двигателя на основе спектрального анализа потребляемого тока с использованием промышленной сети RS485 Modbus RTU / В.А. Шевчук, А.С. Семенов // Сборник докладов VI-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном. - 2015. - С. 176-180.
7. Шевчук В.А. Using SCADA-systems in mining industry // Сборник трудов VII Международной студенческой электронной научной конференции "Студенческий научный форум-2015". - 2015.

8. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В.А. Шевчук, А.С. Семенов // Международный студенческий научный вестник. - 2015. - № 3-4. - С. 419-423.
9. Шевчук В.А. Обоснование выбора системного подхода для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Сборник научных трудов по итогам VI международной научно-практической конференции «Перспективы развития технических наук» в г. Челябинск. - 2019. - С. 18-25.
10. Шевчук В.А. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания / В.А. Шевчук, А.С. Семёнов, Г.А. Матул, Р.Р. Хазиёв, Н.С. Черенков // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-6. С. 1210-1215.
11. Шевчук В.А. Обоснование применения вентильно-индукторного электродвигателя для электрических машин для шахтного горнорудного производства // Сборник научных трудов по итогам VI международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике» в г. Ростов-на-Дону. - 2019. - С. 15-20.
12. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надёжность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. - М.: Высшая школа, 1988. - 232 с.
13. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2016. - 24 с.
14. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures, 4 (2015).
15. Обеспечение надёжности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев. - Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. - 324 с.
16. Тимошенко С.П. Основы теории надёжности / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. - М.: Юрайт, 2015. - 445 с.
17. Авдудевский В.С. Надёжность и эффективность в технике. В 10 т. Т. 2 / В.С. Авдудевский. - М.: Машиностроение, 1987. - 3076 с.

18. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко. - М.: Наука, 1965. - 524 с.
19. Барлоу Р. Математическая теория надёжности / Р. Барлоу. - М.: Советское радио, 1969. - 488 с.
20. Колмогоров А.Н. Теория вероятности и математической статистики. В 3 т. Т. 1. / А.Н. Колмогоров. - М.: Наука, 1986. - 585 с.
21. Козлов Б.А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов. - М.: Советское радио, 1975. - 472 с.
22. Марков А.А. Исчисление вероятностей / А.А. Марков. - М.: Госиздат, 1924. - 588 с.
23. Сотсков Б.М. Основы теории расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б.М. Сотсков. - М.: Мир, 1970. - 270 с.
24. ГОСТ 13377-75. Надёжность в технике. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1975. - 21 с.
25. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1990. - 32 с.
26. ГОСТ Р ИСО 9000-2008. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. - М.: Стандартиформ, 2009. - 31 с.
27. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин: учебное пособие / Кузнецов Н.Л. - М.: МЭИ, 2006. - 432 с.
28. Шевчук В.П. Обеспечение работоспособности электрических машин переменного тока в горнодобывающей промышленности: Автореф... дис. канд. техн. наук. - Томск, 2004. - 24 с.
29. Муравлев О.П. Теория точности электрических машин и ее развитие в Томском политехническом университете // Известия Томского политехнического университета. - 2005. - Т.308. - № 4. - С. 236-242.
30. Гольдберг О.Д. Качество и надёжность асинхронных двигателей / Гольдберг О.Д. - М.: Энергия, 1968. - 202 с.

31. Стрельбицкий Э.К. Исследование надежности и качества электрических машин: Автореф... дис. докт. техн. наук. - Томск, 1967. - 44 с.
32. Похолков Ю.П. Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей: Автореф... дис. докт. техн. наук. - М., 1978. - 39 с.
33. Пястолов А.А. Научные основы эксплуатации электросилового оборудования / А.А. Пястолов. - М.: Колос, 1968. - 224 с.
34. Копылов И.П. Электрические машины учебник для академического бакалавриата: в 2 т.: / И. П. Копылов. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Юрайт, 2016. - 268 с.
35. Гольдберг О.Д. Инженерное проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Л.Н. Макаров, С.П. Хелемская. - М.: Бастет, 2016. - 526 с.
36. Антонов М.В. Технология производства электрических машин / М.В. Антонов. - М.: Энегроатомиздат, 1993. - 592 с.
37. Шпет Н.А. Прогнозирование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов: Автореф... дис. канд. техн. наук. - Томск, 2015. - 21 с.
38. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 702 с.
39. EOQC Glossary. - Bern: EOQC. 1988. - 24 p.
40. Гусев В.В. Показатели безотказности электрических машин при эксплуатации алмазодобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. - 2010. - Т. 316. - № 4. - С. 178-183.
41. Муравлёв О.П., Гусев В.В., Шевчук В.П. Стадия эксплуатации электрических машин в алмазодобывающем комплексе как объективный процесс оценки показателей надежности машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2010. - № 3-4/1. - С. 27-37.
42. Муравлёв О.П., Шевчук В.П., Гусев В.В. Информационное обеспечение для оценки эксплуатационной надежности электрических машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2008. - № 7-8/1. - С. 183-191.

43. Гусев В.В. Мониторинг и диагностика электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности: Автореф... дис. канд. техн. наук. Томск, 2010. Томский политех. ун-т.
44. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник / А.И. Ящура. - М.: Энас, 2012. - 356 с.
45. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 1991. - 34 с.
46. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.
47. Чичев С.И. Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций / С.И. Чичев, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. - М.: Спектр, 2011. - 139 с.
48. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Гушков. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. - 64 с.
49. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова. - Санкт-Петербург: СЕВЗАПУЧЦЕНТР, 2013. - 152 с.
50. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. - М.: Стандартиформ, 2016. - 12 с.
51. ГОСТ Р 55612-2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 12 с.
52. ГОСТ Р 55611-2013. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 12 с.
53. ГОСТ 25313-82. Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 12 с.
54. ГОСТ Р 53698-2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2010. - 8 с.

55. ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2010. - 8 с.
56. ГОСТ Р 55776-2013. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2015. - 12 с.
57. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. - М.: Издательство стандартов, 1986. - 16 с.
58. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. - М.: Издательство стандартов, 1986. - 16 с.
59. ГОСТ 28517-90. Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2005. - 7 с.
60. Акимова Н.А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрихин. - М.: Академия, 2016. - 304 с.
61. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. - М.: Академия, 2010. - 288 с.
62. Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частей вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза / Н.А. Баркова, А.А. Борисов. - СПб.: СПбГМТУ, 2009. - 111 с.
63. Александров А.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А.А. Александров, А.В. Барков, Н.А. Баркова, В.А. Шафранский // Качество и надежность. - Л.: Судостроение, 1986. - 276 с.
64. Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных двигателей // Ползуновский Вестник. - 2012 - № 3/1. - С. 198-203.
65. Браташ О.В., Калинов А.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. - Минск: Белорусский национальный технический университет. - 2012. - С. 43-51.

66. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2013. - № 7. - С. 127-137.
67. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. - М.: Стандартинформ. - 2017. - 14 с.
68. Положение о планово-предупредительном ремонте энергетического оборудования предприятий системы Министерства черной металлургии СССР. - Харьков: ВНИИОЧермет, 1982. - 179 с.
69. Колпачков В.И., Ящура А.И. Производственная эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования. Справочник / В.И. Колпачков, А.И. Ящура. - М., 1999. - 811 с.
70. Азовцев Ю.А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях / Ю.А. Азовцев, Н.А. Баркова, В.А. Доронин // Бумага, картон, целлюлоза. - 1999, май.
71. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере / В.П. Боровиков. СПб.: Питер, 2003. - 688 с.
72. Liu X.. Survival Analysis. Models and Applications / X. Liu. - Higher Education Press, 2012. - 446 p.
73. Van den Hout A. Multi-State Survival Models for Interval-Censored Data / A. Van den Hout. - Boca Raton: CRC Press, 2016. - 257 p.
74. Moore D.F. Applied Survival Analysis Using R / D.F. Moore. - New York: Springer, 2016. - 234 p.
75. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. Учебник / А.А. Халафян. - М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. - 512 с.
76. Klein J.P.. Handbook of survival analysis // J.P. Klein, H.C. van Houwelingen, J.G. Ibrahim, T.H. Scheike. - CRC Press, 2014. - 632 p.
77. Wienke A. Frailty Models in Survival Analysis / A. Wienke. - Chapman and Hall/CRC, 2010. - 312 p.

78. Crowder M.J. Multivariate Survival Analysis and Competing Risks / M.J. Crowder. - Chapman and Hall/CRC, 2012. - 417 p.
79. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA: Учебное пособие для вузов / Боровиков В.П. - М.: Горячая линия - Телеком, 2013. - 288 с.
80. Халафян А.А. Промышленная статистика: Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А.А. Халафян. - М.: Либроком, 2013. - 384 с.
81. Самохин А.В. Разработка методики прогноза нагрузок на крепь вскрывающих выработок и их сопряжений для угольных шахт северо-востока СССР: Автореф... дис. канд. техн. наук. Якутск, 1984. Институт горного дела Севера.
82. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархии / Т. Саати. М.: Радио и связь, 1993. - 320 с.
83. Гусев В.В. Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе / В.В. Гусев, О.П. Муравлев, В.П. Шевчук // Известия Томского политехнического университета. - 2009. - Т. 314. - № 4. - С. 74-78.
84. Антонов А.В. Системный анализ / Антонов А.В. - М.: Высшая школа. - 2006. - 454 с.
85. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. - 396 с.
86. Intelligent collaborative support system for ANP-group decision making / G. Kou, X. Chao, Y. Peng, L. Xu, Y. Chen // Studies in Informatics and Control. 2017. Vol. 26, no. 2. P. 131-142.
87. Деордица Ю.С. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений / Ю.С. Деордица. - Луганск: ВНУ, 2005. - 64 с.
88. Emrouznejad A., Ho W. Fuzzy Analytic Hierarchy Process / A. Emrouznejad, W. Ho. - Boca Raton: CRC Press, 2018. - 407 p.

89. Saaty T.L., Vargas L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T.L. Saaty, L.G. Vargas. - Boston: Springer US, 2001. - 333 p.
90. Тутьгин А.Г., Коробов В.Б. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / А.Г. Тутьгин, В.Б. Коробов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. - 2010. - № 122. - С. 108-115.
91. Evans G.W. Multiple Criteria Decision Analysis for Industrial Engineering: Methodology and Applications / G.W. Evans. - Boca Raton: CRC Press, 2018. - 467 p.
92. Fei S. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP / S. Fei, L. Xiangdong, F. Yali // MATEC Web of Conferences. - 2018. - V. 207. - P. 1-4.
93. Макарова И.Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. - 2015. - №7. - С. 87-95.
94. Greco S. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys / S. Greco, M. Ehrgott, J.R. Figueira. - New York: Springer. - 2016. - 1346 p.
95. Intelligent collaborative support system for AHP-group decision making / G. Kou, X. Chao, Y. Peng, L. Xu, Y. Chen // Studies in Informatics and Control. - 2017. - V. 26 (2). - P. 131-142.
96. Research on comprehensive evaluation system of urban energy data based on AHP method / X.D. Ma, Q. Sun, J.M. Zhang, P. He // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - V. 382 (5). - P. 1-7.
97. Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method / I. Aşchilean, G. Badea, I. Giurca, G.S. Naghiu, F.G. Iloaie // Energy Procedia. - 2017. - V. 112. - P. 19-26.
98. Khazaii J. Advanced Decision Making for HVAC Engineers: Creating Energy Efficient Smart Buildings / J. Khazaii. - Switzerland: Springer International Publishing. - 2016. - 191 p.

99. Вентильный электропривод: шанс для российских производителей // Оборудование: рынок, предложение, цены. - 2004. - №1.
100. Корельский Д.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д.В. Корельский, Е.М. Потапенко, Е.В. Васильева // Научный журнал "Радиоэлектроника. Информатика. Управление". - 2001. - с. 155-159.
101. Адволоткин Н.П. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н.П. Адволоткин, В.Т. Гращенко, Н.И. Лебедев. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.
102. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: учебник вузов / В.В. Хрущев. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 368 с.
103. Odnokopylov G.I. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014. - Vol. 66. - №. 1. - P. 1-6.
104. Odnokopylov G.I. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - P. 1-7.
105. Odnokopylov G.I. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // Applied Mechanics and Materials. - 2015 - Vol. 698. - P. 24-29.
106. Odnokopylov G.I. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. - Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 - P. 1-5.
107. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. - Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015 - P. 1-6.

108. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes [Electronic resources] / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IFOST-2016: 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 01-03 Jun 2016 / Novosibirsk State Technical University. - 2016. - Vol. 2. - P. 140-144.

109. Odnokopylov G.I. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities [Electronic resources] / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. - 2017. - Vol. 328. - № 3. - P. 85-95.

110. Odnokopylov G.I. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading [Electronic resources] / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov, E.A. Butuzov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. - 2018. - Vol. 329. - № 12. - P. 122-135.

111. Odnokopylov G.I. Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shock-wave loading [Electronic resources] / G.I. Odnokopylov, O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, D.R. Galyautdinov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. - 2019. - Vol. 330. - № 4. - P. 110-125.

112. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока / И.Е. Овчинников, Н.И. Лебедев. - Л.: Наука, 1979. - 270 с.

113. Бертинов А.И. Специальные электрические машины: источники и преобразователи энергии: учебное пособие для вузов / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин. - М.: Энергоиздат, 1982. - 552 с.

114. Белецкий В.В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры / В.В. Белецкий. - М.: Энергия, 1977. - 104 с.

115. Копылова И.П., Клокова Б.К. Справочник по электрическим машинам / И.П. Копылова, Б.К. Клокова. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - Т.2. - 688 с.

116. Глазунов Л.П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Л.П. Глазунов, В.П. Грабовецкий, О.В. Щербаков. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 208 с.

117. Козлов Д.И., Аншаков Г.П. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д.И. Козлов, Г.П. Аншаков. - М.: Машиностроение, 1996. - 448.
118. Vesely W.E. Fault Tree Handbook / F.F. Goldberg, N.H. Roberts, D.F. Haas. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, D.C. 20555, January, 1981, с. 209.
119. Справочник «Надежность ЭРИ». - М.: МО РФ, 2006.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Статистические данные по наработке электрических машин эксплуатируемых в алмазодобывающем комплексе АК "АЛРОСА".

| № | Тип | Страна-изготовитель | Номинальный ток, А | Номинальное напряжение, В | Мощность, кВт | Частота вращения, об/мин | Время наработки, час | Объект | Тип установки | Тип дефекта | Цензурируемость |
|---|-------------|---------------------|--------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | МЕЕН-140-EV | Германия | 3,3 | 380 | 9 | 1000 | 14360 | Обогащительная фабрика №3 | Площадочный вибратор | Износ подшипника | 1 |
| 2 | МЕЕН-140-EV | Германия | 3,3 | 380 | 9 | 1000 | 15264 | Обогащительная фабрика №3 | Площадочный вибратор | - | 0 |
| 3 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 3000 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 4 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 3120 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 5 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 7983 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект обмотки статора | 1 |
| 6 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 8976 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | Не установлено | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|----------|------|------|----|------|-------|------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| 7 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 9638 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Не установлено | 1 |
| 8 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 12016 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | Износ подшипников | 1 |
| 9 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 12144 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 10 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 13654 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 11 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 14376 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 12 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 14496 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 13 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 15216 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 14 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 15528 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | - | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------|----------|------|------|-----|------|-------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| 15 | 2SG4 225S-4 | Германия | 24,5 | 1140 | 36 | 1500 | 16272 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |
| 16 | A250 M6 | Россия | 108 | 660 | 55 | 1000 | 10200 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 17 | A250 M6 | Россия | 108 | 660 | 55 | 1000 | 10950 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект обмотки статора | 1 |
| 18 | dAML 250 LX2-4 AX | Германия | 136 | 1140 | 90 | 1500 | 2664 | Рудник Мир | Вентилятор | - | 0 |
| 19 | dAML 250 LX2-4 AX | Германия | 136 | 1140 | 90 | 1500 | 3040 | Рудник Мир | Вентилятор | Не установлено | 1 |
| 20 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 8102 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Перегрев ротора | 1 |
| 21 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 10446 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Забита рубашка охлаждения | 1 |
| 22 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 10656 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 23 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 14432 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ-105 | Перегрев обмотки статора | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------------|----------|-----|------|-----|------|-------|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 24 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 21912 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ- 105 | - | 0 |
| 25 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 35016 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 105 | - | 0 |
| 26 | BAO2-280 У4 | Россия | 160 | 660 | 160 | 1500 | 4776 | Рудник Мир | Конвейер | - | 0 |
| 27 | BAO2-280 У4 | Россия | 160 | 660 | 160 | 1500 | 5475 | Рудник Мир | Конвейер | Не установлено | 1 |
| 28 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 1258 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Износ посадочного места подшипника | 1 |
| 29 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 1460 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 30 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 1652 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Дисбаланс ротора | 1 |
| 31 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 2136 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-75 | - | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------------|----------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| 32 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 2352 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 33 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 3168 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | - | 0 |
| 34 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 5304 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 35 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 5446 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Дефект вала | 1 |
| 36 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 5686 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Залит водой | 1 |
| 37 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 5976 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 75 | - | 0 |
| 38 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 6720 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Залит водой | 1 |
| 39 | BAO2- 280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 6954 | Рудник Мир | Насос | Перегрев обмотки статора | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------------|----------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| 40 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 7445 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | КЗ обмотки статора | 1 |
| 41 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 7578 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 42 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 7704 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД- 75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 43 | BAO2- 280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 8376 | Рудник Мир | Насос | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 44 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 8395 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 45 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 8496 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | - | 0 |
| 46 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 9168 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Дефект подшипника | 1 |
| 47 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 9442 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Дефект вала | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------------|----------|-----|------|-----|------|-------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| 48 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 9816 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 49 | BAO2- 280\2У25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 10076 | Рудник Мир | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 50 | BAO2-280 L2 У25 | Россия | 205 | 660 | 200 | 3000 | 10268 | Рудник Мир | Насос | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 51 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 11616 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Дефект ротора | 1 |
| 52 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 13128 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Не установлено | 1 |
| 53 | DSK250 H6 | Польша | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 13440 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-75 | Дефект ротора | 1 |
| 54 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 14135 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 55 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 14729 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-75 | Дефект подшипника | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|------------------|----------|-----|------|-----|------|-------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| 56 | DSK250 H6 | Польша | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 15286 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Обрыв редуктора | 1 |
| 57 | d2PRW X250/31-KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 17592 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-75 | КЗ обмотки статора | 1 |
| 58 | d2PRW X250/31-KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 17881 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Дефект вала | 1 |
| 59 | d2PRW X250/31-KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 27480 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 60 | BAO2-280 L2 Y25 | Россия | 205 | 660 | 200 | 3000 | 27936 | Рудник Мир | Насос | - | 0 |
| 61 | d2PRW X250/31-KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 28776 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД-75 | - | 0 |
| 62 | BAO2-280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 29496 | Рудник Мир | Насос | - | 0 |
| 63 | BAO2-280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 29496 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 64 | BAO2-280\2Y25 | Россия | 136 | 660 | 200 | 3000 | 32016 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|------------------|--------|-----|------|-----|------|-------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|---|
| 65 | АДН-250 У3 | Россия | 898 | 380 | 250 | 600 | 898 | Рудник Интернациональный | Дымосос | Дефект подшипника | 1 |
| 66 | АДМ250- 10У3 | Россия | 500 | 380 | 250 | 600 | 6205 | Рудник Интернациональный | Дымосос | Дефект подшипника | 1 |
| 67 | А4 355 L- 4У3 | Россия | 30 | 6000 | 250 | 1500 | 14088 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 68 | А4 355 L- 4У3 | Россия | 30 | 6000 | 250 | 1500 | 14864 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект статора | 1 |
| 69 | АДН-250 У3 | Россия | 898 | 380 | 250 | 600 | 25920 | Рудник Интернациональный | Дымосос | - | 0 |
| 70 | АДМ250- 10У3 | Россия | 500 | 380 | 250 | 600 | 27000 | Рудник Интернациональный | Дымосос | - | 0 |
| 71 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 168 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 105 | Дефект вала | 1 |
| 72 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 528 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Залит водой | 1 |
| 73 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 682 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 105 | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 74 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 970 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Заклинивани е вала | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---------------|-------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|---|
| 75 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 1440 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-105 | Дисбаланс ротора | 1 |
| 76 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2160 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 77 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2190 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект вала | 1 |
| 78 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2472 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 79 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2555 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД-105 | Не установлено | 1 |
| 80 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2555 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД-105 | - | 0 |
| 81 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2736 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 82 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2800 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект вала | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---------------|-------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|
| 83 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2832 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Не установлено | 1 |
| 84 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3432 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 85 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3434 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Залит водой | 1 |
| 86 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3554 | Рудник Мир | Режущий орган комбайна АМ- 105 | Заклинивани е вала | 1 |
| 87 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3770 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Не установлено | 1 |
| 88 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3984 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 89 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 4488 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 90 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 4500 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД- 105 | Дефект вала | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---------------|-------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 91 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 4596 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 92 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 4650 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дефект посадочного места подшипнико вого щита | 1 |
| 93 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5206 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дисбаланс ротора | 1 |
| 94 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5304 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 95 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5475 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД- 105 | Дефект наружного кольца подшипника | 1 |
| 96 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5632 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Разрушение подшипника | 1 |
| 97 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5667 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Не установлено | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|-------|-----|------|-----|------|------|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 98 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5976 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 105 | - | 0 |
| 99 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 6570 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ- 75 | Дефект наружного кольца подшипника | 1 |
| 100 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 6988 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | КЗ обмотки статора | 1 |
| | | | | | | | | | | | |
| 101 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 7368 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Обрыв редуктора | 1 |
| 102 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 8760 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | Коррозия посадочного места | 1 |
| 103 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 9528 | Рудник Мир | Дизельный генератор АД- 105 | - | 0 |
| 104 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 9552 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-75 | - | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|-------|-----|------|-----|------|-------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|
| 105 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 10060 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-105 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 106 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 10488 | Рудник Мир | Загрэбные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 107 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 14038 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Перегрев обмотки статора | 1 |
| 108 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 16132 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |
| 109 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 16392 | Рудник Интернациональный | Загрэбные лапы комбайна АМ-105 | Дефект наружного кольца подшипника | 1 |
| 110 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 16526 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Не установлено | 1 |
| 111 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 19710 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД-105 | Дисбаланс ротора | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|-----|------|-------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| 112 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 20219 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дефект вала | 1 |
| 113 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 24264 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Заклинивание вала | 1 |
| 114 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 26376 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Залит водой | 1 |
| 115 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 29976 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 116 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 34728 | Рудник Интернациональный | Дизельный генератор АД-105 | - | 0 |
| 117 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 44530 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект вала | 1 |
| 118 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 4590 | Обогатительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 119 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 6916 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 120 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 6916 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 121 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 17064 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | - | 0 |
| 122 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 29352 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 123 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 29664 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 124 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 29712 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 125 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 35620 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 126 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 37960 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|----------|------|------|-----|------|-------|-----------------------------|-------|---------------------------------|---|
| 127 | ДА304 | Россия | 74 | 6000 | 630 | 1500 | 4756 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 128 | ДА304 | Россия | 74 | 6000 | 630 | 1500 | 33168 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 129 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 600 | Рудник Интернациональный | Насос | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 130 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 1508 | Рудник Интернациональный | Насос | Выгорание стержней ротора | 1 |
| 131 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 3427 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 132 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 5648 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 133 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 5782 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 134 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 7276 | Рудник Интернациональный | Насос | Дефект ротора | 1 |
| 135 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 9264 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 136 | BAO7A | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 11632 | Рудник Интернациональный | Насос | Выгорание стержней ротора | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|----------|------|------|------|------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------|---|
| 137 | ВАО7А | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 20040 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 138 | ВАО7А | Молдавия | 87,6 | 6000 | 800 | 3000 | 25920 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 139 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 4812 | Рудник Интернациональный | Насос | Не установлено | 1 |
| 140 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 6810 | Рудник Интернациональный | Насос | КЗ обмотки статора | 1 |
| 141 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 7444 | Рудник Интернациональный | Насос | Заклинивани е вала | 1 |
| 142 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 10782 | Рудник Интернациональный | Насос | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 143 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 14432 | Рудник Интернациональный | Насос | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 144 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 14880 | Рудник Мир | Насос | - | 0 |
| 145 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 17568 | Рудник Мир | Насос | Дефект подшипника | 1 |
| 146 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 22248 | Рудник Мир | Насос | - | 0 |
| 147 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 22464 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |
| 148 | РИЦ | Германия | 117 | 6000 | 1000 | 3000 | 33552 | Рудник Интернациональный | Насос | - | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------------|--------|-----|------|------|------|-------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|
| 149 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 25320 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 150 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 31390 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 151 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 32016 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 152 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 32760 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 153 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 3672 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 154 | SK 160 L\4 BRE250 | Россия | 28 | 660 | 15 | 1470 | 4824 | Рудник Мир | Мельница | - | 0 |
| 155 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 7968 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |
| 156 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 43800 | Рудник Интернациональный | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |
| 157 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 10464 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------------------|----------|-----|------|------|------|-------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| 158 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 1896 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Дефект подшипника | 1 |
| 159 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 7248 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-75 | Сгорел статор | 1 |
| 160 | d2PRW X250/31- KL | Германия | 136 | 1140 | 200 | 1500 | 816 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-75 | - | 0 |
| 161 | 3SG4 315M-4 | Польша | 83 | 1140 | 132 | 1500 | 12336 | Рудник Интернациональный | Режущий орган комбайна АМ-75 | Забита рубашка охлаждения | 1 |
| 162 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 5256 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | Обрыв редуктора | 1 |
| 163 | d2PRWX28 0 | Китай | 180 | 1140 | 315 | 1500 | 2160 | Рудник Мир | Загребные лапы комбайна АМ-105 | - | 0 |
| 164 | СДМ-15- 49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 30175 | Обогатительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 165 | СДМ-15- 49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 35774 | Обогатительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|-----|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 166 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 23412 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 167 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 28765 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 168 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 6721 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |
| 169 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 8209 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 170 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 4719 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 171 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 38112 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 172 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 31847 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 173 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 28645 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |

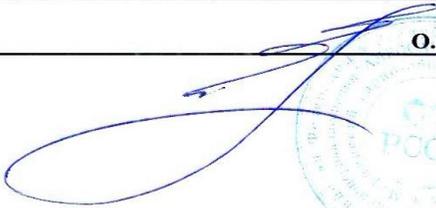
| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|-----|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 174 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 25935 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 175 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 4836 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |
| 176 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 5860 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 177 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 9243 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 178 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 30175 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 179 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 35774 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 180 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 23412 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 181 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 28765 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 182 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 6721 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |
| 183 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 8209 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 184 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 4719 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 185 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 38112 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 186 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 31847 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 187 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 28645 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 188 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 25935 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 189 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 4836 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 190 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 5860 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 191 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 9243 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 192 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 38087 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 193 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 31729 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 194 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 20987 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 195 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 28765 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 196 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 5311 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 197 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 11866 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 198 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 9154 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 199 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 40897 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 200 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 26796 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 201 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 23657 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 202 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 25423 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 203 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 2542 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 204 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 7962 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 205 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 6134 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 206 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 24221 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 207 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 42922 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 208 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 26976 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 209 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 24961 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 210 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 6911 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |
| 211 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 7971 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|--------|------|------|------|------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| 212 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 5011 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 213 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 46198 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | - | 0 |
| 214 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 32776 | Обогащительная фабрика №3 | Вентилятор | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 215 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 25312 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | - | 0 |
| 216 | СДМ-15-49-6У3 | Россия | 100 | 6000 | 1600 | 1000 | 34877 | Обогащительная фабрика №3 | Грохот | Пробой изоляции обмоток | 1 |
| 217 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 7124 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Повышенное увлажнение изоляции | 1 |
| 218 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 6193 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| 219 | A4-400X-6 | Россия | 47,6 | 6000 | 400 | 1000 | 5193 | Обогащительная фабрика №3 | Насос | Замыкание обмотки статора на корпус | 1 |
| Главный инженер РССУ Мирнинского ГОКа АК "АЛРОСА" (ПАО) | | | | | | | | | | | |
|  О.С. Медунецкий | | | | | | | | | | | |



**Экспертные оценки согласно дереву целей обеспечения
эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого
комбайна АМ-75**

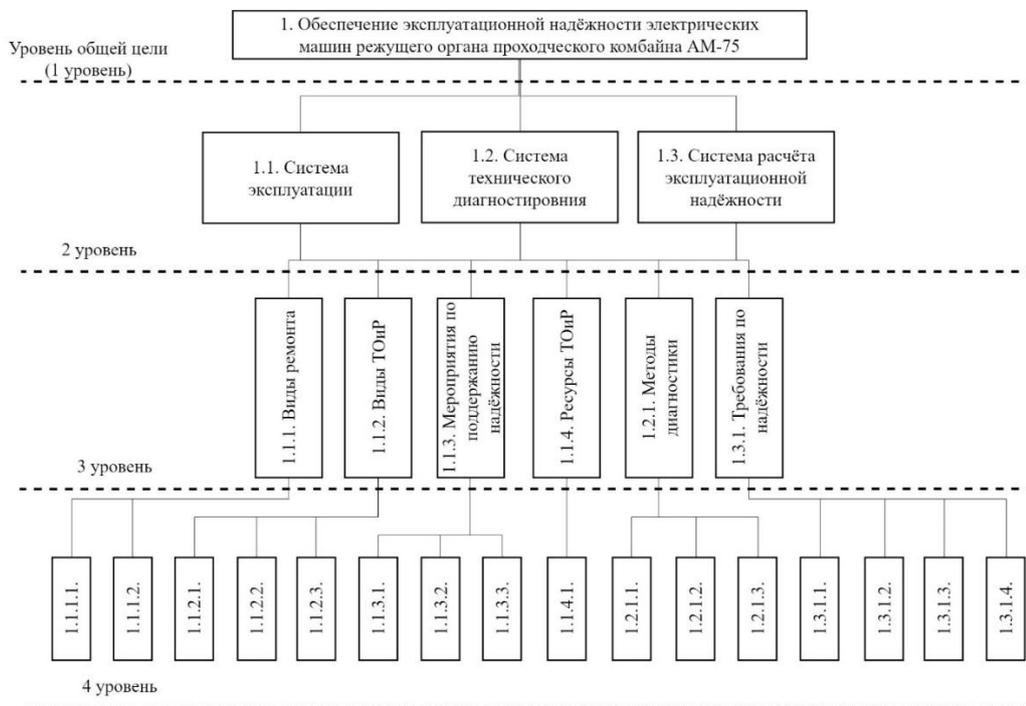


Рис. 1. Дерево целей для задачи по обеспечению эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75.

Таблица 1. Матрица парных сравнений критериев 2 уровня по отношению к главной цели.

| | | | |
|------|------|------|------|
| | 1.1. | 1.2. | 1.3. |
| 1.1. | 1 | 1/3 | 3 |
| 1.2. | 3 | 1 | 6 |
| 1.3. | 1/3 | 1/6 | 1 |

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев 3 уровня по отношению к критерию 1.1.

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. |
| 1.1.1. | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1/2 |
| 1.1.2. | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1/2 |

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|---|-----|-----|
| 1.1.3. | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 3 | 1/2 |
| 1.1.4. | 1/4 | 1/4 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| 1.2.1. | 1 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 |
| 1.3.1. | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |

Таблица 3. Матрица парных сравнений критериев 3 уровня по отношению к критерию 1.2.

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. |
| 1.1.1. | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 | 9 |
| 1.1.2. | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 7 | 7 |
| 1.1.3. | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| 1.1.4. | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 |
| 1.2.1. | 1/7 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 |
| 1.3.1. | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 |

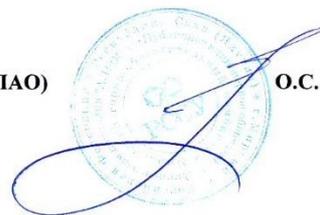
Таблица 4. Матрица парных сравнений критериев 3 уровня по отношению к критерию 1.3.

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. |
| 1.1.1. | 1 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 2 | 6 |
| 1.1.2. | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 4 | 8 |
| 1.1.3. | 5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 9 |
| 1.1.4. | 3 | 1/3 | 1/4 | 1 | 3 | 7 |
| 1.2.1. | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1 | 6 |
| 1.3.1. | 1/6 | 1/8 | 1/9 | 1/7 | 1/6 | 1 |

Таблица 5. Матрица парных сравнений критериев 4 уровня по отношению к критерию 1.1.3.

| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| | 1.1.3.1. | 1.1.3.2. | 1.1.3.3. |
| 1.1.3.1. | 1 | 7 | 2 |
| 1.1.3.2. | 1/7 | 1 | 1/7 |
| 1.1.3.3. | 1/2 | 7 | 1 |

Главный инженер РССУ
Мирнинского ГОКа АК "АЛРОСА" (ПАО)



О.С. Медунецкий

Акты внедрения



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИИЭ ТПУ, к. т. н., доцент
А.С. Матвеев
« » 2019 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы
Шевчука Владислава Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель: руководитель отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., доцент, Ивашутенко А.С. Члены комиссии: доцент отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., Столярова О.О., доцент отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., Баранов П.Р. Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Шевчука В.А. «Прогнозирование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - электромеханика и электрические аппараты, используются в учебном процессе Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики в методических материалах дисциплины: «Испытания и техническая диагностика электрических машин и аппаратов» магистрантами направления ООП 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника».

Председатель комиссии

А.С. Ивашутенко

Члены комиссии

О.О. Столярова

П.Р. Баранов



“АЛРОСА” акционерная компания **Акционерная компания “АЛРОСА”** **ALROSA**
 (аһаһас акционерная уопсастыба) (публичное акционерное общество) Public Joint Stock Company

Мирнинский горно-обогатительный комбинат АК «АЛРОСА» (ПАО)
Ремонтно-строительное специализированное управление

Ленинградский проспект, д. 2, Мирный, Мирнинский район,
 Республика Саха (Якутия), Российская Федерация, 678170
 Тел: +7 (41136) 99-000 доб. 4-96-03

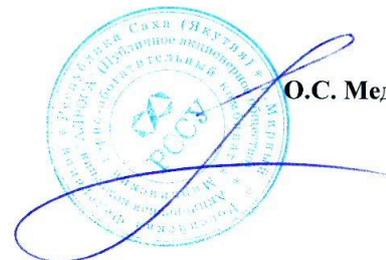
АКТ

внедрения результатов
 кандидатской диссертационной работы
 Шевчука Владислава Алексеевича

Ремонтно-строительным специализированным управлением Мирнинского горно-обогатительного комбината АК «АЛРОСА» (ПАО) использованы следующие рекомендации научных разработок диссертационной работы аспиранта Шевчука В.А. «Прогнозирование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности» по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. Методика прогнозирования эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока на основе множительных оценок Каплана-Мейера. Для электрических машин промышленного комбайна АМ-75 и его узлов метод позволил определить интервалы времени, при которых отказ наиболее вероятен: режущий орган — 6500-9000 ч., 12000-14000 ч.; загребные лапы — 4000-10000 ч., 13000-17500 ч. Элементы электрических машин режущего органа промышленного комбайна АМ-75: ротор — 0-7500 ч., подшипниковый узел — 0-15000 ч., статор — 5000-10000 ч., 14000-14500 ч.
2. Дерево отказов электрических машин промышленного комбайна АМ-75 для определения наиболее эффективных путей решения задач. Согласно полученным значениям коэффициентов относительной важности (КОВ), для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин режущего органа промышленного комбайна АМ-75 наиболее эффективным решением является модернизация оборудования (КОВ равен 0,596).
3. Обоснование применения вентильно-индукторной электрической машины в составе электропривода режущего органа промышленного комбайна АМ-75.

Главный инженер



О.С. Медунецкий