

На правах рукописи



Шевчук Владислав Алексеевич

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

Специальность 05.09.01 -
«Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Томск - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Муравлев Олег Павлович

доктор технических наук,
Однокопылов Георгий Иванович

Официальные оппоненты **Полищук Владимир Иосифович**, доктор технических наук, доцент, декан энергетического факультета Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.

Нос Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования технологических машин, старший научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск.

Защита состоится «25» декабря 2019 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Усова, 7, 8 корпус ТПУ, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан: «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.10, к.т.н., доцент



Кладиев С.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 [2, 4]. 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 [6].

3. Решена задача обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 методом анализа иерархии, которая совместно с полученными экспертными оценками позволяет определить наиболее эффективное решение задачи при наличии альтернатив [5, 10].

4. Обосновано применение ВИД в составе ЭП режущего органа проходческого комбайна АМ-75 [1, 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) СВФУ 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы исследования, определена цель работы и сформулированы задачи исследования, указана научная, а также практическая значимость.

В первой главе представлен обзор современного состояния теории надёжности электрических машин, их отказов и методов поддержания надёжности, в частности алмазодобывающей промышленности.

Определены задачи исследования, необходимые для достижения цели работы.

Во второй главе методом анализа выживаемости исследован эксплуатационный материал об отказах ЭМ, эксплуатируемых в условиях подземных рудников «Мир», «Интернациональный» и обогатительной фабрики №3, в интервале с 2012 г. по 2017 г. Данные содержат в себе как полную информацию о наблюдении, так и цензурированную [2, 4, 6]. Анализ выживаемости — это анализ длительностей от начала и до конца наблюдения, в которых объект перестаёт отвечать заданным требованиям. Функция выживаемости представляется выражается формулой множительной оценки Каплана-Мейера (1):

$$S(t) = \prod_{j=1}^t \left(\frac{n-j}{n-j+1} \right)^{\sigma(j)} * 100\%, \quad (1)$$

где n – общее количество событий (отказов); j – порядковый номер отдельного события; $\sigma(j) = 1$, если наблюдение полное, и 0, если цензурированное.

Оценку точности приближения дает стандартная ошибка выживаемости; ее можно рассчитать по формуле Гринвуда (2):

$$SE(S_i) = S(t) * \sqrt{\sum \frac{d_t}{n_t(n_t - d_t)}} \quad (2)$$

где d_t - число отказавших в момент времени t ; n_t - число наблюдавшихся к моменту времени t .

Доверительный интервал для выживаемости (3):

$$S(t) - SE(S_i) * z_\alpha < S(t) < S(t) + SE(S_i) * z_\alpha \quad (3)$$

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 $z_\alpha = 1,96$.

Далее на рисунке 1 рассмотрены кривые выживаемости проходческих комбайнов АМ-75 и АМ-105, где наименьшим уровнем выживаемости обладают ЭМ проходческого комбайна АМ-75. В этом случае критическим временем является время с 5000 часов до 10000 часов с вероятностью дожития 45% и с 13000 часов до 15000 часов с вероятностью дожития 11%. Об ЭМ комбайна АМ-105 следует сказать, что первые 10000 часов эксплуатации можно назвать критическими.

Кривая выживаемости ЭП режущего органа проходческого комбайна АМ-75 (рисунок 2, а) достаточно крутая и находится левее, что говорит о низкой выживаемости. Вероятность дожития до 13000 часов составляет 40%. Критическими являются часы с 6000 до 9000 часов с вероятностью дожития 48% и с 13000 до 15000 часов с вероятностью дожития 1%.

На рисунке 2, б представлено сравнение выживаемости узлов ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75. 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 эксплуатации. Также стоит обратить внимание на кривую выживаемости элементов вала, из которого следует, что основное количество отказов происходят в первые 5000 часов.

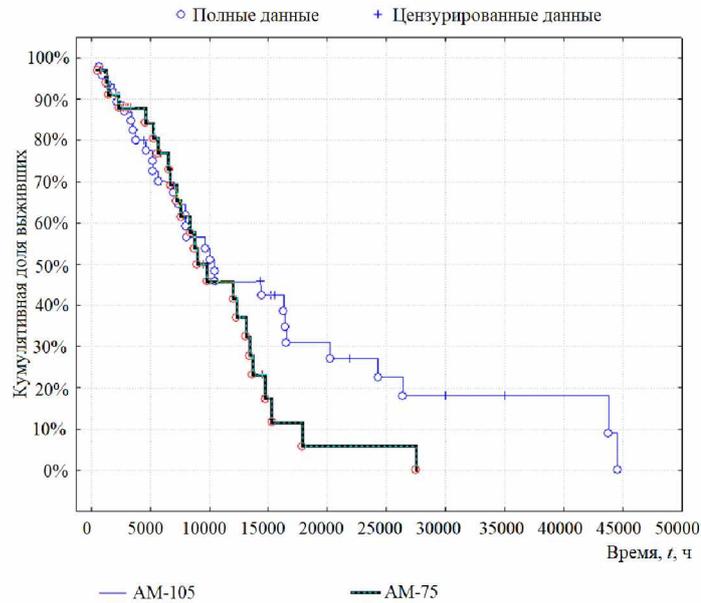


Рисунок 1 - График сравнения выживаемости ЭМ переменного тока, эксплуатируемых на проходческих комбайнах AM-75 и AM-105 на руднике «Мир».

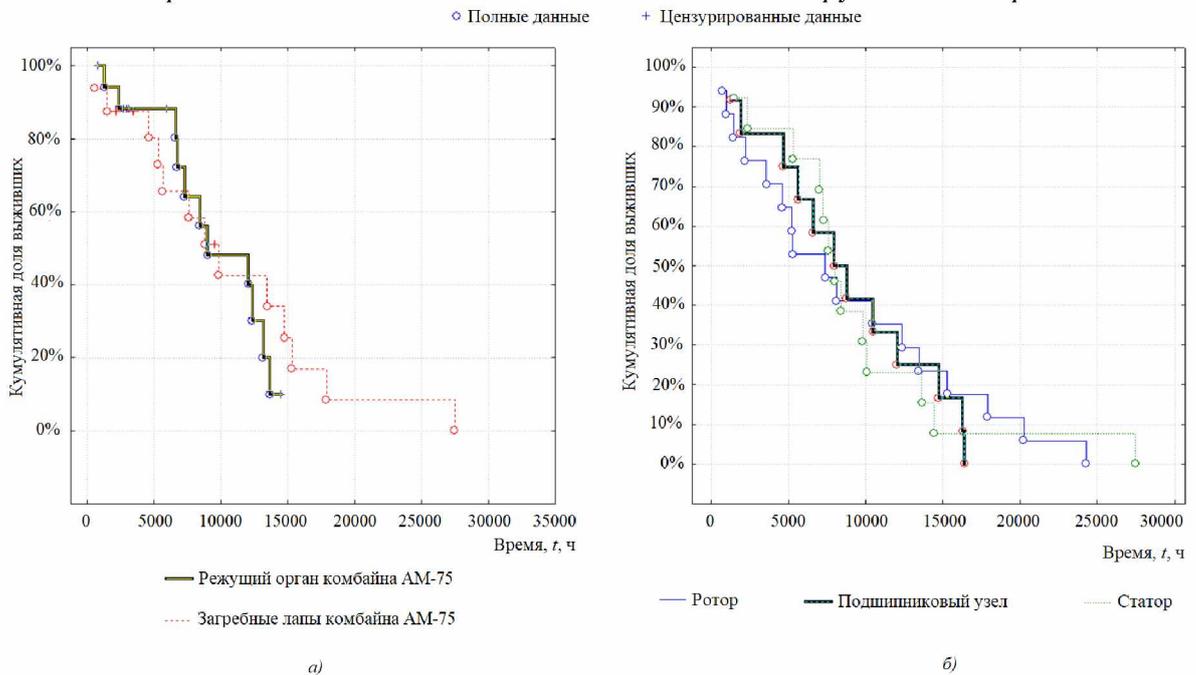


Рисунок 2 - Графики сравнения выживаемости ЭМ: а) отдельных узлов промышленного комбайна AM-75; б) режущего органа проходческого комбайна AM-75.

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 ЭМ привода режущего органа комбайна АМ-75 спустя 5000 часов нуждаются в дополнительном техническом обслуживании.

Кроме агрессивных внешних факторов окружающей среды, одним из важных факторов возникновения отказов проходческих комбайнов - многолетнемерзлые породы. Согласно карте распространения многолетнемерзлых пород, г. Мирный находится в области, где вечная мерзлота достигает отметки -400 м. Глубина подземного рудника «Мир» составляет 520 м, её горизонты находятся на отметках: -210 м, -310 м, -410 м. Дополнительные нагрузки со стороны почвы также объясняются отсутствием нормативных документов по разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты, поэтому расчёты по надёжности оборудования производятся на основании производственного опыта.

В таблице 1 выделим критические интервалы времени проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов. Определение критического времени позволяет прогнозировать отказы ЭМ и повысить эффективность графиков планово-предупредительного ремонта. Метод обладает простотой, что облегчает его реализацию в виде программного обеспечения.

Таблица 1

Оборудование	Элемент оборудования	Критический интервал времени, часы	Вероятность дожития до конца интервала, %
Проходческий комбайн АМ-75	Режущий орган	6 500 - 9 000	48
		12 000 - 10 000	10
	Загребные лапы	4 000 - 10 000	42
		14 000 - 17 500	9
ЭМ режущего органа	Ротор	0 - 7 500	40
	Подшипниковый узел	0 - 15 000	18
	Обмотки статора	5 000 - 10 000	23
		14 000 - 14 500	9

Методом анализа выживаемости определено оборудование и узлы электрических машин наиболее подверженные отказам. В ходе исследования были получены интервалы времени элементов ЭМ проходческого комбайна АМ-75, при

которых отказ наиболее вероятен. Выявлено, что самой низкой оценкой выживаемости обладает проходческий комбайн марки АМ-75 (вероятность дожития до 15000 часов - 11%). Анализ отказов рабочих элементов проходческого комбайна АМ-75 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%).

В третьей главе на основе системного анализа и метода анализа иерархий разработано дерево целей, где главной целью является обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 в алмазодобывающей промышленности (рисунок 3) [3, 7-9]. Системный анализ - процесс изучения проблемы с целью определения критериев и подцелей, которые позволяют достичь их эффективным способом. Методы системного анализа сочетают в себе экспертные знания и формальные методы. Экспертные знания позволяют находить альтернативные пути решения задачи, что позволяет совершенствовать модель принятия решений. Обосновано, что лучшим решением для исследования поставленной задачи является метод анализа иерархий [10]. 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. 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. Для данной работы инженерами алмазодобывающего комплекса в г. Мирный (Якутия) были получены экспертные оценки, которые представляют собой матрицы парных сравнений порядка n (n - количество критериев). Для данных оценок проведена проверка на согласованность, которая показала, что оценки являются согласованными. Такая матрица является квадратной, обратно

симметричной с единицами на главной диагонали. Сравнение происходит между критериями в строчках с критериями в столбцах по правилам (4):

$$x_{ij} = x; x_{ji} = 1/x; x_{ij} = x_{ji} = 1, \quad (4)$$

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

Для определения наиболее значимого элемента системы в достижении главной цели использован расчёт коэффициента относительной важности. Согласно проведённому анализу, из критериев 3 уровня наиболее сильное влияние на главную цель имеют мероприятия по поддержанию надёжности (критерий 1.1.3.) с коэффициентом относительной важности равным 0,26 (рисунке 4).

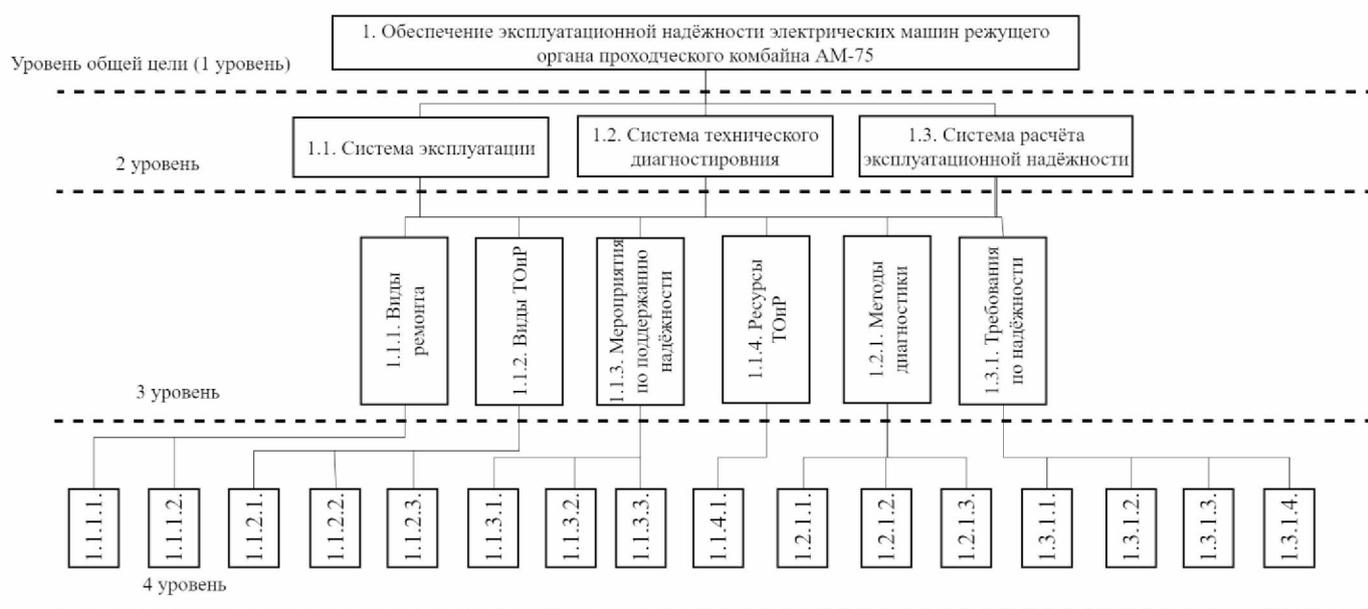


Рисунок 3 - Дерево целей для задачи обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности. 1.1.1.1. — ремонт по техническому состоянию; 1.1.1.2. — фирменный метод ТО и ремонта; 1.1.2.1. — ТО по событию; 1.1.2.2. — ТО по регламенту; 1.1.2.3. — ТО по состоянию; 1.1.3.1. — соблюдение 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.

Третий уровень дерева целей является промежуточным, в котором были структурированы критерии четвертого уровня, что в дальнейшем позволило произвести оценку только тех критериев, которые имеют непосредственное отношение к весомому критерию 3 уровня. Согласно дальнейшему анализу, 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 происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости загрязняется изоляция, что приводит к её пробоям, также забивается смазка подшипникового узла, что вызывает быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости образует слой пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы и дальнейшему отказу.

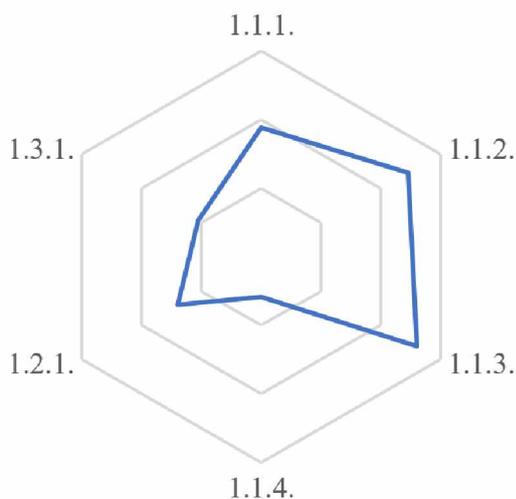


Рисунок 4 - Диаграмма значимости критериев 3 уровня, где 1.1.1. - Виды ремонта; 1.1.2. - Виды ТОиР; 1.1.3. - Мероприятия по поддержанию надёжности; 1.1.4. - Ресурсы ТОиР; 1.2.1. - Методы диагностики; 1.3.1. - Требования по надёжности.

Результаты анализа показывают, что в случае с ЭП режущего органа проходческого комбайна АМ-75 необходимо не только усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта, но и модернизация самих узлов наиболее подверженных факторам внешней среды. Поскольку метод анализа иерархий является универсальным, то его целесообразно применить и к другим типам производства.

В четвёртой главе представлены деревья отказов для АД, ВД и ВИД (рисунок 6 - 8) и с помощью показателей интенсивности отказов обосновано эффективное применение вентильно-индукторного двигателя с магнитными подшипниками [11]. Метод «дерево отказов» - метод определения исходных условий и событий, которые приводят к главному отказу (отказу ЭМ). Дерево отказов представляет собой графическую структуру, которая в явном виде показывает связь между элементами, чей отказ вызывает отказ системы целиком. Разработанное дерево отказов наглядно демонстрирует слабые стороны системы и может являться обоснованием в выборе принимаемых решений.

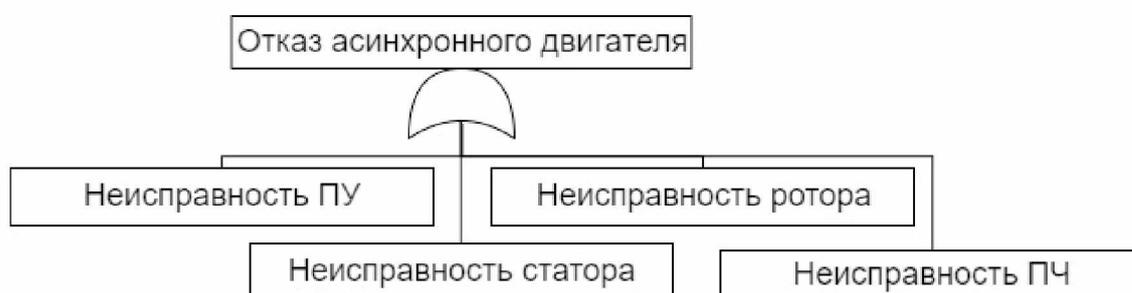


Рисунок 5 - Дерево отказов АД: ПУ - подшипниковый узел; ПЧ - преобразователь частоты.

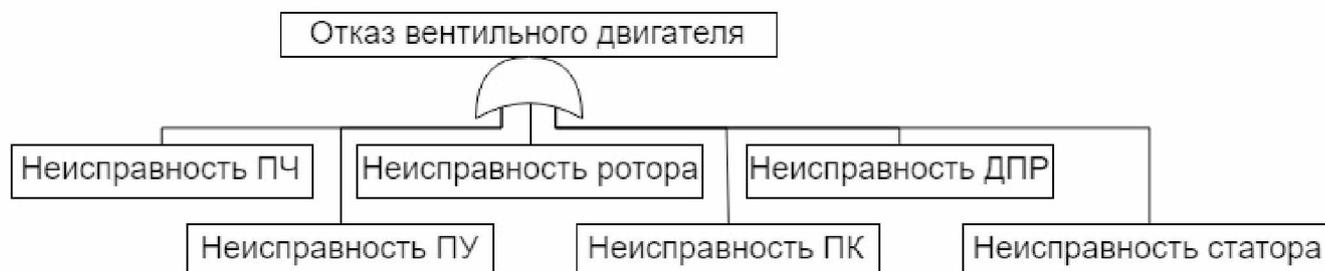


Рисунок 6 - Дерево отказов ВД: ПЧ - преобразователь частоты; ДПР - датчик положения ротора; ПУ - подшипниковый узел; ПК - полупроводниковый коммутатор.



Рисунок 7 - Дерево отказов ВИД: ПЧ - преобразователь частоты; ДПР - датчик положения ротора; ПУ - подшипниковый узел; ПК - полупроводниковый коммутатор.

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 (5):

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t} \quad (5)$$

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 формулам (6-8) из чего следует, что каждая составная часть вносит свой вклад в общую интенсивность отказов электродвигателя АД:

$$\lambda_{\text{АД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{Р}} + \lambda_{\text{С}} + \lambda_{\text{ПЧ}} \quad (6)$$

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

Интенсивность отказов электродвигателя ВД:

$$\lambda_{\text{ВД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{Р}} + \lambda_{\text{С}} + \lambda_{\text{ПК}} + \lambda_{\text{ДПР}} + \lambda_{\text{ПЧ}} \quad (7)$$

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.

Интенсивность отказов электродвигателя ВИД:

$$\lambda_{\text{ВИД}} = \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{С}} + \lambda_{\text{ПК}} + \lambda_{\text{ДПР}} + \lambda_{\text{ПЧ}} \quad (8)$$

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.

Расчётные показатели интенсивности отказов АД сведены в таблицу 2.

В таблице 3, 4 представлены результаты расчётов эксплуатационной интенсивности отказов элементов вентильного и вентильно-индукторного двигателей с различными видами датчиков положения ротора.

Таблица 2

Элемент АД	Интенсивность отказов, $\lambda(t) * 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
Ротор	123,5
Статор	621
Подшипниковый узел	420

Продолжение таблицы 2.

Элемент АД	Интенсивность отказов, $\lambda(t) * 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
Преобразователь частоты	1,104
Асинхронный двигатель	1165,6

Таблица 3

Тип ЭМ	Интенсивность отказов, $\lambda(t) * 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
ВИД с датчиком Холла	256,25
ВИД с индуктивным датчиком	256,04
ВИД с бездатчиковым управлением	256,00
ВД с датчиком Холла	256,26
ВД с индуктивным датчиком	256,05
ВД с бездатчиковым управлением	256,01

Таблица 4

Тип ЭМ	Интенсивность отказов, $\lambda(t) * 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
ВИД с датчиком Холла	12,66
ВИД с индуктивным датчиком	12,45
ВИД с бездатчиковым управлением	12,42
ВД с датчиком Холла	12,67
ВД с индуктивным датчиком	12,46
ВД с бездатчиковым управлением	12,43

Согласно полученным значениям эксплуатационной интенсивности отказов АД, ВД и ВИД наиболее эффективным решением является эксплуатация ВИД с бездатчиковым управлением с применением магнитных подшипников. Его применение позволит в несколько раз сократить простой горного оборудования в связи с внезапными отказами электродвигателя.

В заключении представлены основные результаты.

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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Издания из **перечня ВАК** для кандидатских диссертаций:

1. 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. Хазиев, Н.С. Черенков // *Фундаментальные исследования*. - 2014. - № 9-6. - С. 1210-1215.

2. 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.

Статьи в изданиях Scopus и Web of Science:

3. 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.

4. 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.

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.

Материалы конференций и другие публикации:

6. 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.

7. 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.

8. Шевчук В.А. Using SCADA-systems in mining industry // Сборник трудов VII Международной студенческой электронной научной конференции "Студенческий научный форум-2015". - 2015.

9. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В.А. Шевчук, А.С. Семенов // Международный студенческий научный вестник. - 2015. - № 3-4. - С. 419-423.

10. 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.

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.