

*На правах рукописи*

ШЕВЧУК ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ

**Обеспечение работоспособности электрических машин  
в горнодобывающей промышленности**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2005

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета и Специализированном управлении «Алмазэлектромонтаж» УКСа АК «АЛРОСА»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Муравлев Олег Павлович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, старший  
научный сотрудник Селяев А.Н.  
- кандидат технических наук,  
доцент Педиков В.М.

Ведущая организация: НИИ «Якутнипроалмаз», г. Мирный РС (Якутия).

Защита диссертации состоится « 11 » мая 2005 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 в 331 аудитории 8 корпуса Томского политехнического университета (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» марта 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев

**Актуальность темы.** Эксплуатационная надежность электрических машин переменного тока определяет эффективность применения всех технических средств и влияет на важнейшие экономические показатели производства. Недостаточная надежность электрических машин переменного тока, наблюдаемая на практике, приводит к большим сверхнормативным расходам на преждевременные ремонты и внеплановые простои оборудования.

В настоящее время в горнодобывающей промышленности одной из наиболее важных характеристик работы электропривода мощных дробилок, мельниц, тяжелых конвейеров, вентиляторов является их надежность и неотъемлемая часть системы обеспечения надежности электрических машин, а так же количественная оценка ее показателей. Данная оценка осуществляется на основе информации, формируемой либо в процессе специально организованных испытаний, либо в процессе эксплуатации двигателей у потребителя, где записи наблюдений заносятся в однотипные журналы учета режимов работы и условия эксплуатации двигателей.

В основных направлениях экономического и социального развития России отмечена необходимость обеспечения и совершенствования качества и надежности промышленной продукции, повышения ее конкурентоспособности на международном рынке.

Особое значение эта проблема имеет для электротехнической промышленности, наиболее массовой продукцией, которой являются электрические машины переменного тока. Асинхронные и синхронные электроприводы составляют около 70% общего количества электроприводов, они потребляют более половины вырабатываемой в нашей стране электроэнергии. По существующим прогнозам асинхронные и синхронные двигатели еще несколько десятилетий останутся основными преобразователями электрической энергии в механическую.

Столь широкое применение электрических машин переменного тока, составляющих основу электропривода большинства технологических процессов, указывает на то, что технический прогресс в горнодобывающей отрасли в значительной степени зависит от качества используемых асинхронных и синхронных двигателей, и надежности их работы в эксплуатации. Такое положение обуславливает высокие требования, предъявляемые к показателям надежности электрических машин переменного тока. Таким образом, задача обеспечения надежности электрических машин переменного тока является актуальной не только для электротехнической промышленности, но и для всего народного хозяйства в целом.

Данная работа посвящена вопросам оценки эксплуатационной надежности крупных электрических машин (ЭМ) переменного тока, а также электрических машин переменного тока средней мощности используемых в горнодобывающей промышленности с применением методов вибродиагностики, которые используются для совершенствования обеспечения их работоспособности в сложных условиях эксплуатации.

**Целью работы** является применение вибродиагностики для обеспечения и поддержания работоспособности электрических машин переменного тока на предприятиях горнодобывающей промышленности в условиях эксплуатации.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались методы вибродиагностики, теории электрических машин, системного анализа, теории точности и математической статистики, теории вероятностей, теории колебаний, частотного анализа и математического моделирования. Статистические данные эксплуатационных испытаний, в том числе по определению вибрационных характеристик электрических машин переменного тока с целью оценки их надежности получены на предприятиях алмазодобывающей промышленности АК «АЛРОСА».

**Научная новизна работы.** В работе получены следующие основные научные результаты, которые выносятся на защиту:

1. Разработана модель вибродиагностики подшипниковых узлов электрических машин переменного тока и вращающихся элементов различных рабочих механизмов в горнодобывающей промышленности, которая позволяет оценить работоспособность этих машин и разработать мероприятия по совершенствованию эксплуатации;
2. Создана математическая модель экономической оценки повышения работоспособности электрических машин переменного тока по результатам вибродиагностики, позволяющая определить экономический эффект при переходе от планово-предупредительного ремонта к оценке текущего состояния на основании диагностики;
3. Разработана структурная модель диагностики рабочих элементов, составной частью которой является электрическая машина. На ее основе разработана методика оценки составных элементов, позволяющая определить численные значения коэффициентов относительной важности для всех уровней;
4. Предложено дерево причинно-следственных связей состояния электрических машин переменного тока, которое определяет набор элементов диагностики и взаимосвязей между ними.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что полученные при ее выполнении результаты, направлены на повышение уровня надежности электрических машин переменного тока, а также снижению материальных и трудовых затрат в процессе их эксплуатации. Созданы инженерные методики, алгоритмы и практические рекомендации способствуют обеспечению заданных показателей вибрации, которые позволяют повысить надежность электрических машин переменного тока.

1. Разработана методика диагностики и мониторинга подшипниковых узлов и вращающихся элементов рабочих механизмов, которая позволяет объективно оценить состояние электрических машин при их эксплуатации;

2. Предложены рекомендации по осуществлению ремонта электрических машин переменного тока на основе вибродиагностических данных, что является альтернативой планово-предупредительным ремонтам (ППР). При этом ожидается большой экономический эффект;

3. Проведен сбор статистических данных по вибродиагностике электрических машин переменного тока в условиях эксплуатации горнодобывающей отрасли, которые являются основой для экономических расчетов;

4. Определены основные виды дефектов (повреждение подшипниковых узлов, дисбаланс, расцентровка валов, резонанс), которые определяют более 80% всех дефектов, и от них зависит обеспечение работоспособности электрических машин в горнодобывающей промышленности;

5. Предложена инженерная методика расчета экономического эффекта при переходе от планово-предупредительных ремонтов к оценке работоспособности по результатам вибродиагностики.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работы используются при эксплуатации электрических машин переменного тока на Обоганительной фабрике №3 и Ремонтно-строительном специализированном управлении Мирнинского горно-обогатительного комбината, а также в Специализированном управлении «Алмазэлектромонтаж» УКСа АК «АЛРОСА» в виде методик, алгоритмов и программ.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения только на одной обоганительной фабрике алмазодобывающей отрасли составит 9161 тыс. руб. за первый год.

**Апробация.** Основные результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Электрические машины и аппараты» Томского политехнического университета и следующих конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2001);
- Восьмая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2002);
- Девятая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2003);

А также основные результаты исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» г. Тольятти, Тольяттинский государственный университет, 2004.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из шести разделов, содержащих 160 страниц машинописного текста, 21 таблицу, 58 рисунков, 3 приложения и список литературы из 200 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель работы, научная новизна и практическая ценность диссертации. Приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

Во *втором разделе* работы делается анализ условий эксплуатации и уровня обслуживания ЭМ переменного тока. Проведена статистическая обработка эксплуатационных результатов более 500 электрических машин и сделан анализ работ по обеспечению надежности ЭМ переменного тока. Выявлены основные виды и причины отказов электрических машин переменного тока.

Проведенный анализ условий эксплуатации электрических машин переменного тока в горнодобывающей отрасли показывает, что на обеспечение надежности в условиях эксплуатации обращается недостаточное внимание. Рассмотрены основные пути дальнейшего повышения надежности и эффективности использования электрических машин. На обеспечение эксплуатационной надежности ЭМ переменного тока влияют сложные условия эксплуатации, тяжелые режимы работы, недостаточный уровень квалификации и профессиональной подготовки обслуживающего персонала.

Исследования эксплуатационной надежности ЭМ переменного тока, проведенные за период с 1994 по 2003 год на предприятиях горнодобывающей промышленности, позволили установить условия их эксплуатации и уровень обслуживания, режимы работы, виды и причины возникновения отказов двигателей и их узлов. Анализ систематизированной эксплуатационной информации показал, что ЭМ переменного тока, работающие в качестве приводов горношахтного оборудования, подвергаются комплексному воздействию тепла, вибрации, пыли, влаги и др. Так, колебания температуры воздуха в течение года в подземных выработках составляют от 6 до 15°C (на поверхности - от плюс 35 до минус 55°C), колебания значений относительной влажности - от 80 до 98% (на поверхности - от 22 до 100%), запыленности воздуха в подземных выработках - от 70 до 695 мг/м<sup>3</sup>. На большинстве предприятий горнодобывающей промышленности обслуживающий персонал имеет низкую квалификацию.

При исследовании надежности ЭМ переменного тока был использован статистический материал, собранный на обогатительных фабриках (ОФ) ГОКов АК «АЛРОСА» в период с 1996 по 2003 годы. Этот материал позволяет оценить влияние аварийных режимов (АР) в алмазодобывающей промышленности (АП) на эксплуатационную надежность ЭМ, а так же квалифицировать по типам АР, являющихся истинной причиной выхода из строя рассмотренных ЭМ.

В табл. 1 приведены статистические данные видов отказов электродвигателей переменного тока мощностью свыше 10 кВт по одной обогатительной фабрике алмазодобывающей промышленности за период с 1998 по 2003 г.

Причиной большого количества отказов являются сложные условия эксплуатации и не высокий уровень квалификации обслуживающего персонала.

Проведенный анализ уровня специального образования обслуживающего персонала показывает, что значительное число электрослесарей на

Таблица 1

## Виды отказов электродвигателей переменного тока мощностью свыше 10 кВт

| Вид отказа                                                                                  | По двигателям      |      |                               |      |                                                       |      |                                                                           |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|-------------------------------|------|-------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                                             | По всем двигателям |      | По всем отказавшим двигателям |      | По всем двигателям, нуждающимся в капитальном ремонте |      | По двигателям, вышедшим в капитальный ремонт по причине первичных отказов |      |
|                                                                                             | Кол-во             | %    | Кол-во                        | %    | Кол-во                                                | %    | Кол-во                                                                    | %    |
| Витковое замыкание                                                                          | 75                 | 14,3 | 75                            | 16,9 | 75                                                    | 19,9 | 75                                                                        | 68,2 |
| Межфазное »                                                                                 | 13                 | 2,5  | 13                            | 2,9  | 13                                                    | 3,5  | 13                                                                        | 11,8 |
| Корпусное »                                                                                 | 5                  | 1,0  | 5                             | 1,1  | 5                                                     | 1,3  | 5                                                                         | 4,5  |
| Снижение сопротивления изоляции обмотки                                                     | 62                 | 11,8 | 62                            | 13,9 | -                                                     | -    | -                                                                         | -    |
| Обрыв цепи в фазе                                                                           | 1                  | 0,2  | 1                             | 0,2  | 1                                                     | 0,3  | 1                                                                         | 0,9  |
| Замыкание витковой изоляции из-за заклинивания подшипника или ротора                        | 7                  | 1,3  | 7                             | 1,6  | 7                                                     | 1,9  | 7                                                                         | 6,4  |
| То же из-за работы на двух фазах                                                            | 48                 | 9,2  | 48                            | 10,8 | 48                                                    | 12,8 | -                                                                         | -    |
| То же из-за опрокидывания двигателя, перегрева частыми пусками, заклинивания рабочей машины | 111                | 21,2 | 111                           | 24,9 | 111                                                   | 29,5 | -                                                                         | -    |
| То же из-за поломки вентилятора и ухудшения охлаждения                                      | 7                  | 1,3  | 7                             | 1,6  | 7                                                     | 1,9  | 7                                                                         | 6,4  |
| Выход из строя подшипниковых узлов                                                          | 107                | 20,4 | 107                           | 24,0 | 107                                                   | 28,5 | -                                                                         | -    |
| Поломка вентилятора                                                                         | 7                  | 1,3  | 7                             | 1,6  | -                                                     | -    | -                                                                         | -    |
| Поломка вала                                                                                | 2                  | 0,4  | 2                             | 0,4  | 2                                                     | 0,5  | 2                                                                         | 1,8  |
| Двигатели не имеют дефектов и повреждений                                                   | 79                 | 15,1 | -                             | -    | -                                                     | -    | -                                                                         | -    |
| ИТОГО:                                                                                      | 524                | 100  | 445                           | 100  | 376                                                   | 100  | 110                                                                       | 100  |

обогачительных фабриках, шахтах, карьерах и драгах имеет достаточный стаж работы с электрооборудованием, но низкие производственные навыки и, соответственно, низкую квалификацию. Отсутствие опыта и недостаток квалификации значительной части обслуживающего персонала обуславливают высокую, аварийность работы электрооборудования на горнодобывающем производстве и, соответственно, снижение уровня его эксплуатационной надежности.

Специфика ЭМ переменного тока в горнодобывающей отрасли, представляет собой сложную техническую схему при неполном знании исходной информации. Это приводит к выводам о необходимости создания методической базы грамотной эксплуатации, устранения морального старения для улучшения показателей качества, технического уровня и увеличения сроков службы ЭМ в АП.

Основные причины, определяющие работоспособность асинхронных и синхронных двигателей делятся на две большие группы - связанные с обмоткой и подшипниками. В настоящей работе проведены исследования связанные с диагностикой подшипниковых узлов и вращающихся механизмов.

В современных условиях эксплуатации поддержание работоспособности электрических машин переменного тока возможно только с помощью системы ППР, которая не учитывает конкретные условия эксплуатации, нет увязки ремонтных циклов с показателями надежности, и имеет сравнительно высокую трудоемкость технического обслуживания. Несмотря на недостатки планово-предупредительных ремонтов, им нет альтернативы при отсутствии диагностики для поддержания работоспособности электрических машин переменного тока. Широкий диапазон условий эксплуатации и режимов работы ЭМ переменного тока, низкий уровень обслуживания их на ряде производств горнодобывающей промышленности обуславливают необходимость разработки методов непосредственного контроля и оценки технического состояния ЭМ и их узлов в условиях эксплуатации. Наиболее перспективными в этом отношении являются методы вибродиагностики, базирующиеся на использовании информации, заключенной в колебательных процессах.

Продление установленного срока службы электрических машин, применяемых в горнодобывающем производстве, не решает главных задач по поддержанию назначенных показателей, таких как выявление систематических, однотипных (неслучайных) отказов и определение причин их возникновения. Оценку технического состояния и сбора информации можно достичь с помощью диагностики и мониторинга ЭМ переменного тока в горнодобывающей отрасли, что в дальнейшем позволит увеличить первоначально установленный назначенный срок службы и сохранит работоспособность ЭМ и ее отдельных составных частей при граничных условиях эксплуатации.

Вибродиагностикой необходимо заниматься в связи с тем, что по результатам обследования можно сразу же провести работы, направленные на



устранение обнаруженных неполадок, а также, потому что вибродиагностика решает следующие задачи:

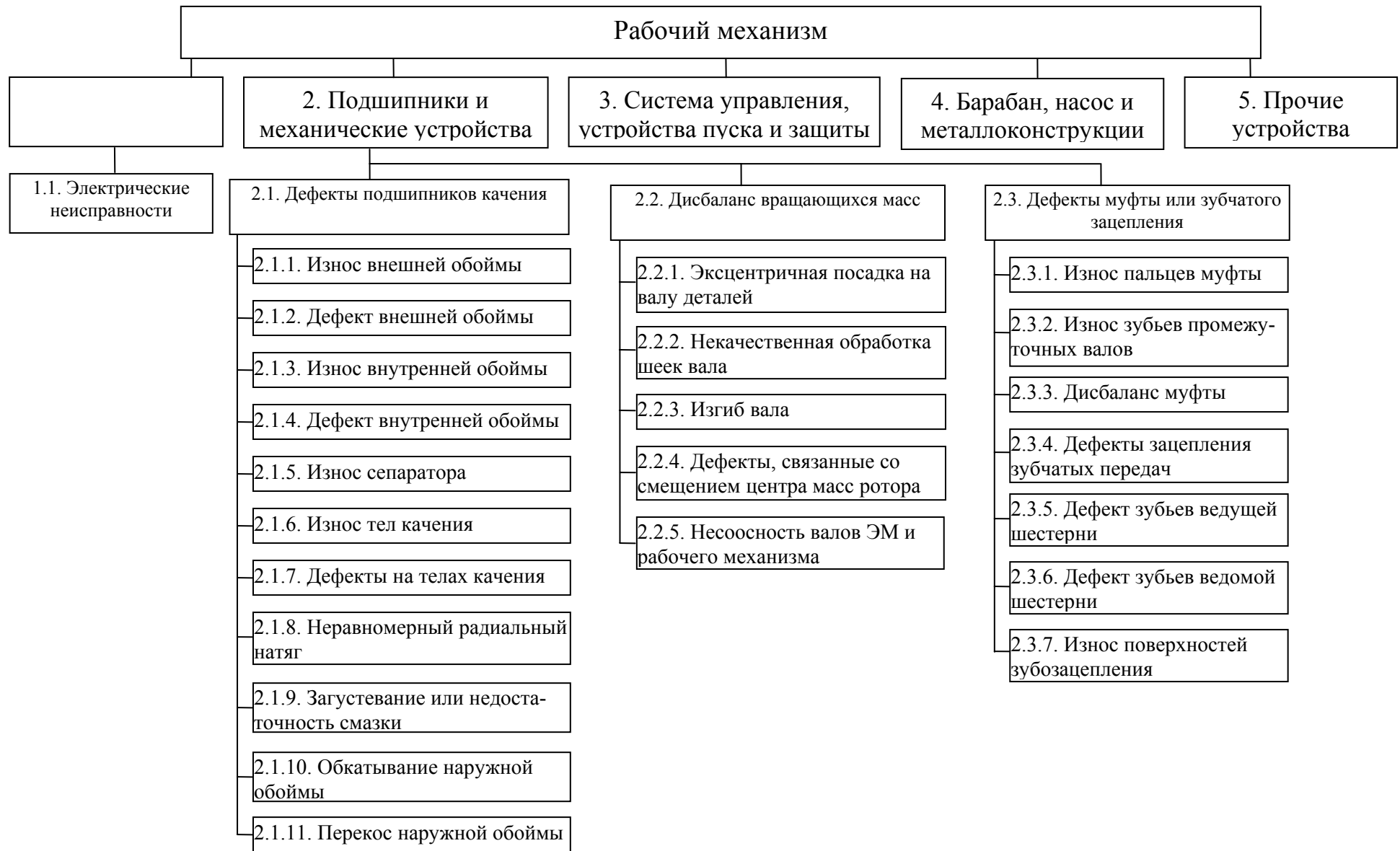
- ❖ описание объекта диагностики минимальной совокупностью параметров состояния;
- ❖ установление количественной связи между параметрами состояния и диагностическими параметрами;
- ❖ выявление наиболее чувствительных к состояниям электрической машины диагностических параметров;
- ❖ определение пределов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

На основе проведенного анализа осуществлена постановка задач исследования.

В *третьем разделе* представлены: структурная модель диагностики рабочих механизмов; структурная схема диагностирования и прогнозирования рабочих механизмов и агрегатов; модель вибродиагностики электрических машин, которая включает систему уравнений для оценки подшипниковых узлов ЭМ и связанных с ЭМ вращающихся элементов рабочих механизмов и агрегатов, установлены точки измерения для диагностики, выбраны вибрационные сигналы и спектры измерения, введена оценка состояния и определены способы устранения неисправностей.

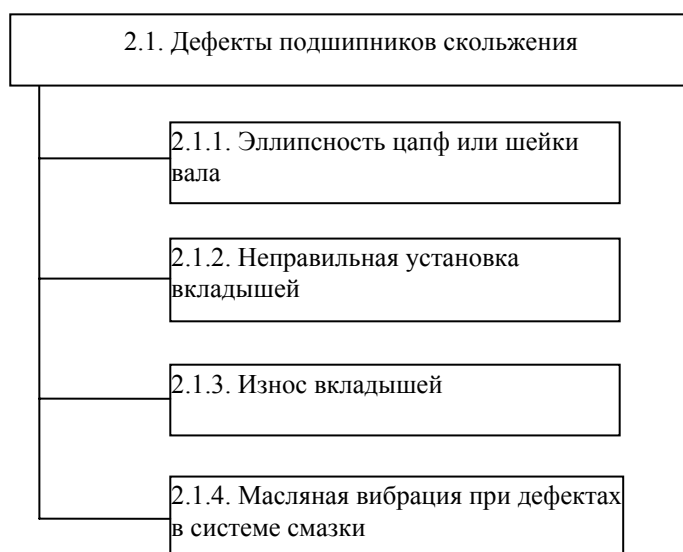
Создание математической модели диагностирования электрических машин большой мощности в настоящее время необходимо и возможно на данном этапе развития науки и техники. Существует две основные причины создания системы диагностирования этих ЭМ – срок службы является величиной вероятностной и всегда имеется несоответствие предписанных режимов эксплуатации реальным, что приводит к ускоренному расходованию ресурса, особенно в горнодобывающей промышленности. К сожалению, разработка способов диагностики пока является проблемой для потребителей. Установлены тактические и стратегические задачи диагностики ЭМ и пути их решения. Основным методом устранения дефектов является ремонт, а диагностическое обслуживание определяет вид и объем ремонта для увеличения остаточного ресурса или для восстановления работоспособного состояния ЭМ, что должно быть сделано с учетом экономики.

Структурная модель диагностики рабочих механизмов (рис. 1 и 2) в горнодобывающей промышленности устанавливает набор элементов, взаимосвязи между ними и позволяет определить коэффициенты относительной важности элементов модели для вибродиагностики в соответствии с поставленными задачами исследования. Получены численные значения коэффициентов относительной важности для трех уровней, которые позволяют оценить важность всех элементов модели. Эта модель диагностики разработана на основе системного подхода, устанавливает набор и взаимосвязь элементов, определяющих функционирование ЭМ переменного тока в



**Рис. 1.** Структурная схема диагностики рабочих механизмов

сложных условиях горнодобывающей отрасли. Под системой понимается совокупность любым способом выделенных из остального мира реальных или воображаемых объектов. Для системы характерны следующие свойства: заданные связи, существующие между элементами системы; каждый из элементов внутри системы считается неделимым; с окружающей средой система взаимодействует как целое. Иногда для простоты систему определяют как комплекс функционально связанных элементов. Главными отличительными чертами большой системы являются: наличие у всей системы общей цели; наличие выделяемых частей – подсистем; большое число входящих в систему элементов; разнообразие функций, выполняемых элементами; вероятностный характер ее взаимодействия с внешней средой.



**Рис. 2.** Дефекты подшипников скольжения

Для определения критериев вибросостояния электрических машин мощностью от 15 до 300 кВт, которые необходимы для вибродиагностики ЭМ предложена структурная схема диагностирования и прогнозирования рабочих механизмов и агрегатов на предприятиях АК «АЛРОСА».

В настоящее время для ЭМ отсутствует единая концепция диагностирования и прогнозирования, а применяются отдельные методики. Это относится в полной мере для крупных асинхронных и синхронных двигателей работающих в алмазодобывающей промышленности. По-прежнему основным методом является применение планово-предупредительных ремонтов и ремонт оборудования после аварийных ситуаций. Диагностические приборы и устройства только начинают применяться и для принятия решений по результатам вибродиагностики должны быть установлены критерии. В настоящей работе для оценки состояния оборудования в АК «АЛРОСА» приняты критерии вибросостояния для электрических машин номинальной мощностью от 15 до 300 кВт, с высотой оси вращения вала от 160 до 315 мм.

Взаимосвязь основных источников вибрации и шума ЭМ переменного тока можно представить в виде блок-схемы, где установлены набор элементов и взаимосвязи между ними, которые в дальнейшем необходимы

для организации вибродиагностики.

Разработана модель вибродиагностики ЭМ, которая включает систему уравнений для оценки подшипниковых узлов ЭМ и связанных с ЭМ вращающихся элементов рабочих механизмов и агрегатов, установлены точки измерения для диагностики, выбраны вибрационные сигналы и спектры измерения, введена оценка состояния и определены способы устранения неисправностей. Модель предназначена для применения вибродиагностики ЭМ на предприятиях АК «АЛРОСА» с целью совершенствования организации эксплуатации электрооборудования. На основании результатов диагностики разработаны рекомендации по совершенствованию ЭМ.

### Модель вибродиагностики электрических машин переменного тока

#### 1. Система уравнений описывающая вибрации (1)

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{e.эл.} = \varphi(f_{об}; f_n; f_{мг}), \\ f_{об} = \varphi(f_{ст}; f_{д}), \\ f_r = \frac{n}{60}, \\ f_n = \varphi(f_{м.к.}; f_c; f_n; f_{\theta}), \\ f_c = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d_{м.к.} \cos \alpha}{d_c} \right), \\ f_{м.к.} = f_c \left( \frac{d_c}{d_{м.к.}} + \cos \alpha \right), \\ f_{\theta} = f_c z_{м.к.} = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d_{м.к.} \cos \alpha}{d_c} \right) z_{м.к.}, \\ f_{\theta} = (f_r - f_c) z_{м.к.} = \frac{f_r}{2} \left( 1 + \frac{d_{м.к.} \cos \alpha}{d_c} \right) z_{м.к.}, \\ f_{мг} = \varphi(f_0; f_3), \\ f_3 = f_1 \frac{z_2}{p} (1 - S), \\ f_{вен.} = f_r \cdot z_{л}, \end{array} \right. , (1)$$

где  $f_{об}$  – вибрация от дисбаланса вращающихся деталей ЭМ переменного тока;  $f_n$  – вибрация, создаваемая подшипниками качения;  $f_{мг}$  – вибрация от действия сил магнитного происхождения;  $f_{e.эл.}$  – среднеквадратическая виброскорость ЭМ переменного тока;  $f_{ст}$  – вибрация, вызванная статической неуравновешенностью;  $f_{д}$  – вибрация, вызванная динамической неуравновешенностью;  $n$  – число оборотов ротора в минуту;  $f_{м.к.}$  – вибрация, создаваемая телами качения;  $f_c$  – вибрация, создаваемая

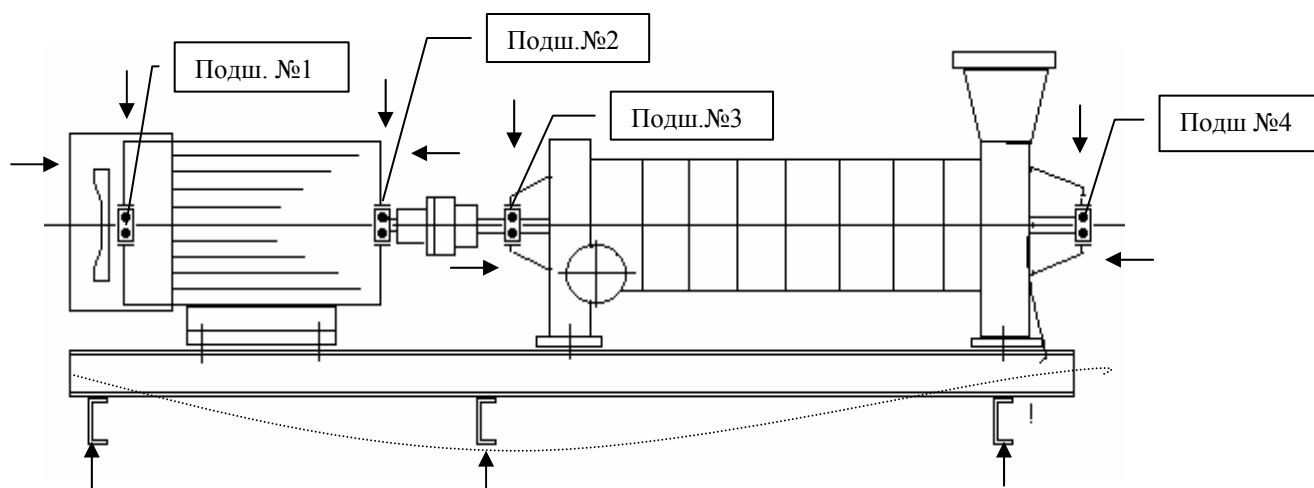
сепаратором;  $f_n$  – вибрация, создаваемая наружной обоймой;  $f_v$  – вибрация, создаваемая внутренней обоймой;  $d_{т.к}$  – диаметр тел качения;  $d_c$  – диаметр сепаратора;  $\alpha$  – угол контакта тел и дорожек качения;  $z_{т.к}$  – число тел качения;  $f_0$  – вибрация, создаваемая основной гармоникой магнитного поля;  $f_3$  – вибрация, создаваемая зубцовыми гармониками магнитного поля;  $f_1$  – частота сети;  $p$  – число пар полюсов;  $z_2$  – число пазов ротора;  $S$  – скольжение ротора;  $z_d$  – число лопаток вентилятора.

## 2. Точки измерения

На рис. 3 приведены обобщенные данные по точкам измерения. Для конкретных механизмов и агрегатов они выбираются с учетом особенностей их функционирования. При определении точек измерения учитываются наблюдения обслуживающего персонала.

Основные точки измерения:

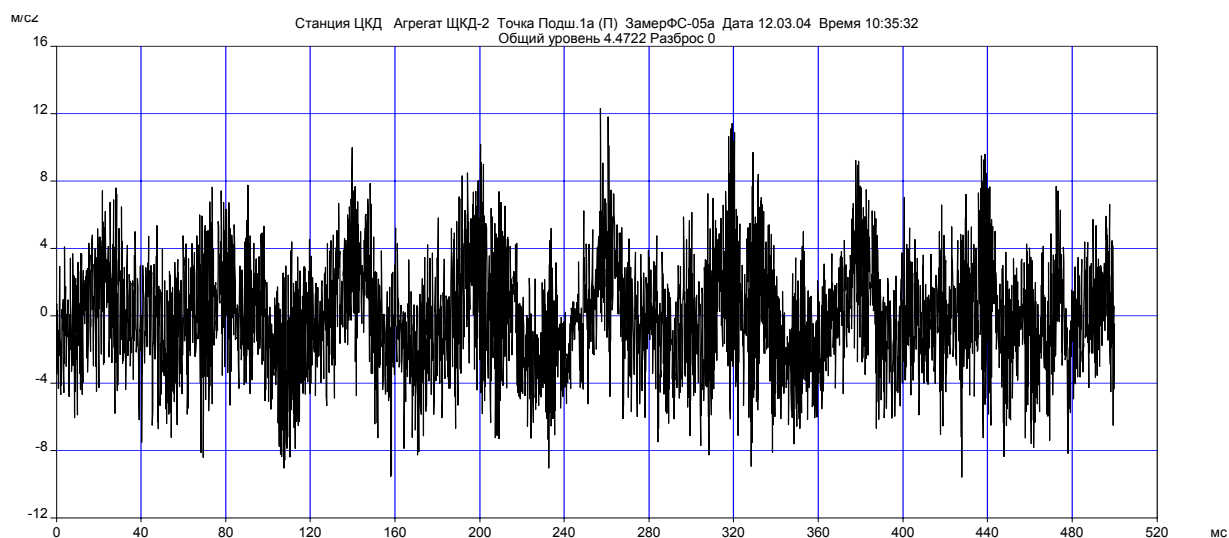
- опоры вала (подшипниковая стойка) в осевом (вертикальном) и поперечном направлении;
- точки жесткой заделки металлоконструкции (опорные балки) на которых установлен агрегат и ЭМ.



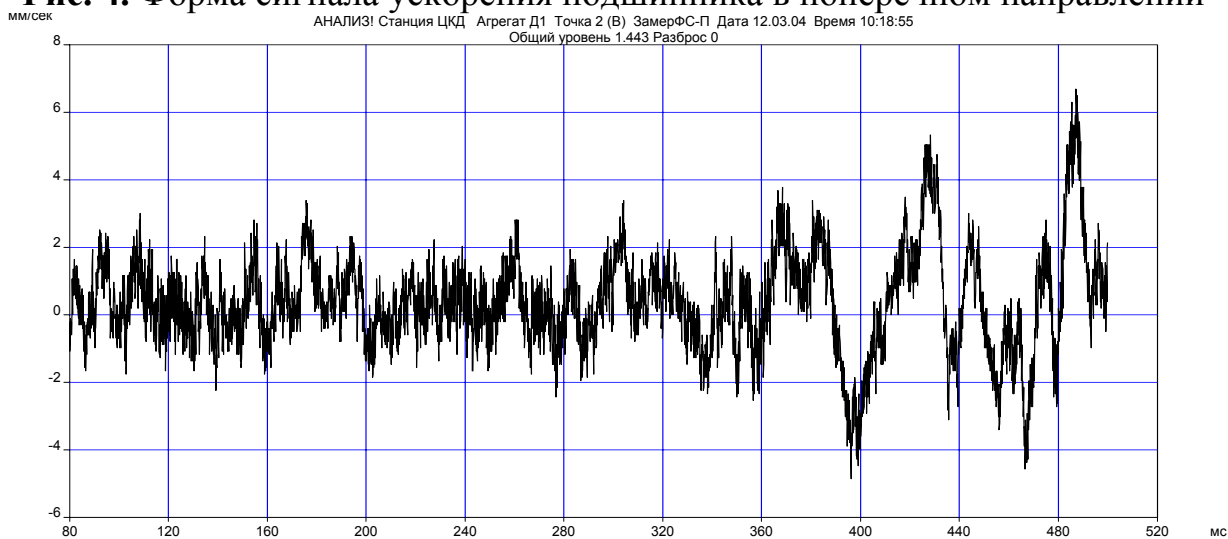
**Рис. 3.** Схема замеров вибрации;  $\leftarrow$  – месторасположение и направление датчика вибрации

## 3. Вибрационные сигналы и спектры измерения

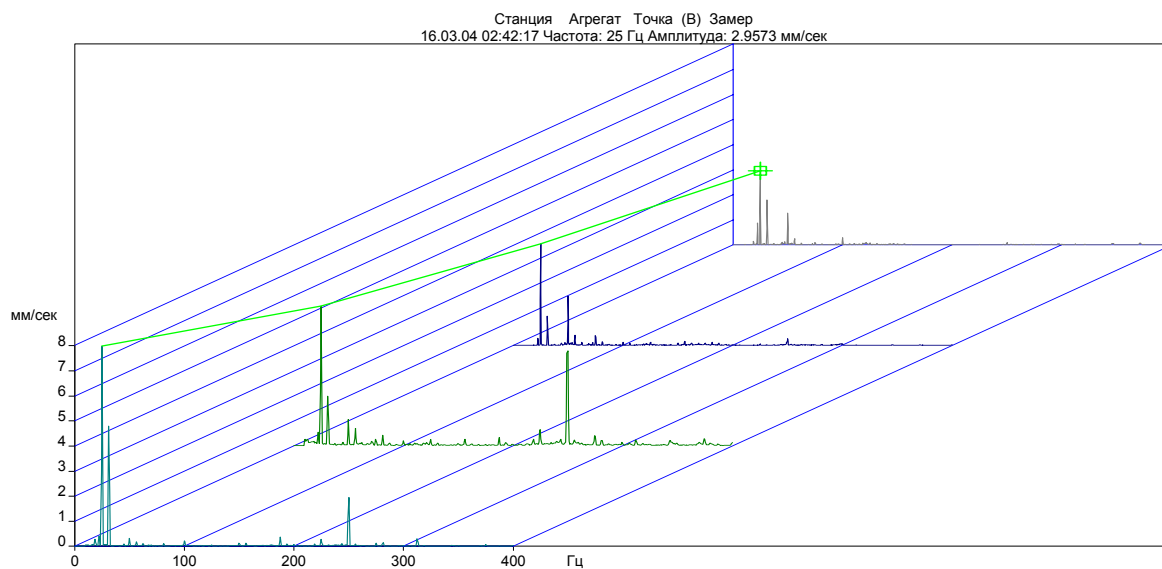
Вибрационный сигнал представляется в виде виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Спектры измерения представляются в таком виде:



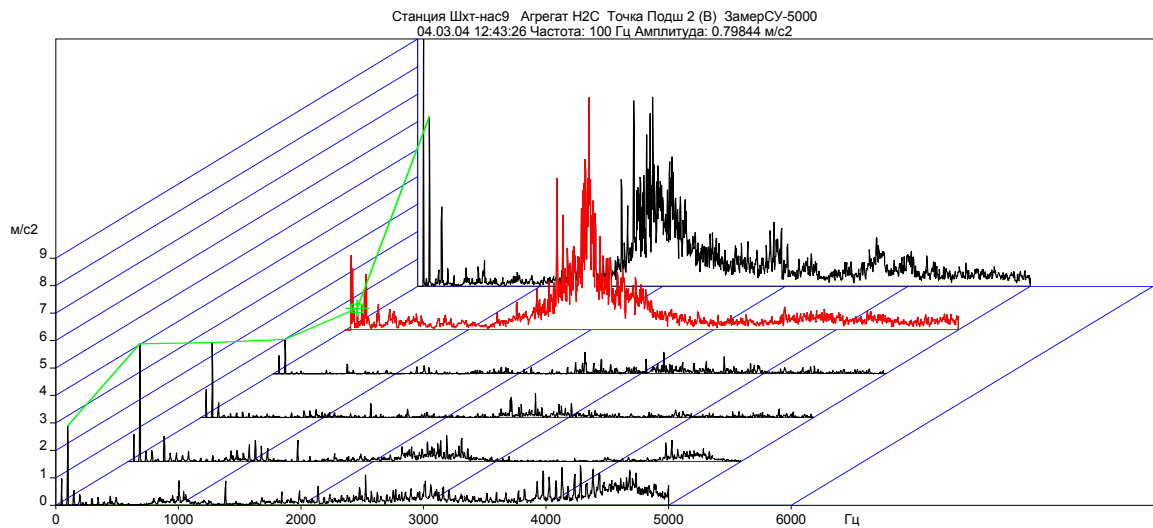
**Рис. 4.** Форма сигнала ускорения подшипника в поперечном направлении



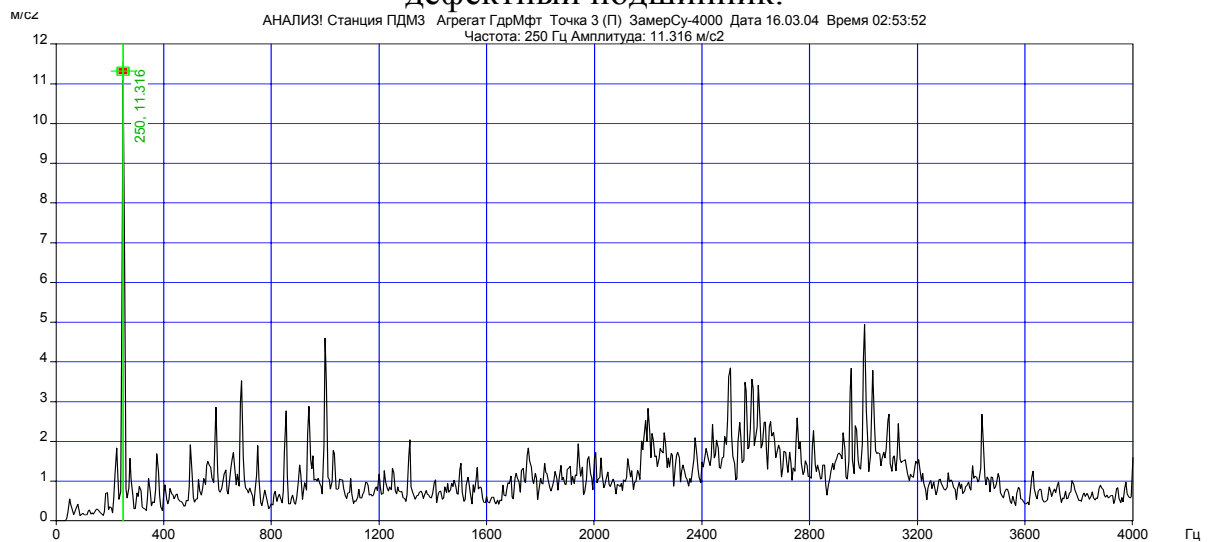
**Рис. 5.** Форма сигнала скорости подшипника в поперечном направлении



**Рис. 6.** Спектр скорости, под маркером подшипник электродвигателя, 25 Гц (оборотная)



**Рис. 7.** Спектры ускорения. Под маркером - 2фр. Верхние спектры - дефектный подшипник.



**Рис. 8.** Спектр ускорения. Пик - 10 фр (250 Гц).

#### 4. Оценка состояния (критерии вибросостояния) ЭМ переменного тока

Для оценки состояния приняты следующие критерии:

- "Допустимо" - Допустимая вибрация для новых, вводимых в эксплуатацию машин. Вероятность появления дефектов на протяжении длительной эксплуатации минимальна. Бездефектное эксплуатационное состояние. Оценка качества ремонта.
- "Еще допустимо" - Необходимость проведения мероприятий по обнаружению дефекта, усиление контроля. Машины, попадающие в эту зону, обычно считаются пригодными для длительной эксплуатации.
- "Требуется принятия мер" - Машины, попадающие в эту зону, обычно рассматриваются как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения предремонтных или ремонтных работ, а также пока исследуют причины изменения вибрации и определяют

комплекс необходимых мероприятий по обнаружению дефекта. Усиление и сокращение срока периодичности виброконтроля, уточнение диагноза. Повышенная вероятность появления сильных дефектов.

- "Недопустимо" - Уровни вибрации в этой зоне считаются достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины. Дальнейшая эксплуатация машины может привести к выходу из строя узлов.

### **5. Способы устранения дефекта (неисправности)**

В таблице 2 приведены результаты вибродиагностики и способы устранения дефектов.

В этой таблице к дефектам ЭМ отнесены все дефекты рабочих механизмов и агрегатов, которые связаны с вращением ЭМ и отражаются на их работоспособности.

Наибольшее количество дефектов связано с повреждением подшипниковых узлов. Эффективное устранение неисправностей в этом случае следующее: замена подшипников, подшипникового узла и в ряде случаев электрической машины в целом – действие достаточно дорогое, но своевременная замена позволяет избегать огромных экономических потерь при аварийной остановке оборудования.

**Таблица 2**

**Основные выявленные дефекты ЭМ переменного тока с помощью вибродиагностики**

| <b>№ п/п</b> | <b>Результаты вибродиагностики</b>             | <b>Способы устранения дефектов</b>                                                      |
|--------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | Повреждения подшипниковых узлов                | Замена подшипников или подшипникового узла. Замена ЭМ. Фиксация (стопорение) подшипника |
| 2            | Дисбаланс                                      | Балансировка. Восстановление жесткости. Подцентровка. Ревизия                           |
| 3            | Расцентровка валов                             | Подцентровка                                                                            |
| 4            | Резонанс                                       | Устранение дефектов опор. Замена ЭМ. Усиление рамы ЭМ                                   |
| 5            | Биение от привода                              | Замена или ревизия дефектного узла.                                                     |
| 6            | Прочие                                         | Устранение дефекта (неисправности)                                                      |
| 7            | Дефект монтажа                                 | Устранение дефекта. Новый монтаж                                                        |
| 8            | Радиальный прогиб (изгиб), выход из строя вала | Замена вала                                                                             |

Увеличение дисбаланса связано в первую очередь с тяжелыми условиями эксплуатации ЭМ и также занимает достаточно большую долю



отказов от общего числа отказов, а его устранение связано с проведением балансировки, восстановлением жесткости и улучшением центровки валов.

Дефекты, связанные с расцентровкой валов, составляют значительную долю отказов и определяются сложными условиями эксплуатации, а единственный способ устранения - проведение подцентровки.

Присутствует наличие резонансных явлений, которые появляются в процессе эксплуатации и для их устранения требуется восстановление опор, замена ЭМ или усиление механической конструкции, на которой установлен двигатель.

Четыре вида рассмотренных дефектов определяют львиную долю всех дефектов, и от них зависит обеспечение работоспособности ЭМ в горнодобывающей промышленности. Остальные виды дефектов - биение от привода, дефекты монтажа, изгиб вала и прочие составляют лишь 18%. Устранение неисправности в этом случае связано с проведением мероприятий по устранению дефекта обычно путем монтажа с заменой или ревизией дефектного узла.

В *четвертом разделе* построено дерево причинно-следственных связей состояния ЭМ переменного тока, которое устанавливает набор элементов и взаимосвязи между ними, которые определяют параметры диагностики. Как показывает эта схема (дерево) диагностический сигнал, связанный с вибрацией определяет большинство дефектов при диагностике, поэтому в качестве основного вида диагностики целесообразно использовать вибродиагностику. Рассмотрены вибродиагностические признаки дефектов механической и магнитной системы, а также диагностические признаки дефектов подшипниковых узлов.

В данном разделе представлены подробные описания вибродиагностики типовых дефектов для агрегатов горнодобывающей промышленности. Результаты вибродиагностики позволяют эффективно определить имеющиеся и прогрессирующие дефекты, и по этим результатам принять решение по критерию вибросостояния. Вибродиагностика позволяет своевременно обнаружить дефекты, что позволяет произвести остановку оборудования в ремонт при подходе к предельному состоянию.

Представленные результаты вибродиагностики трудно анализировать из-за большой информации, поэтому составлены сводные таблицы. Для обобщения, сделана сводная таблица результатов диагностики и мониторинга ЭМ переменного тока мощностью свыше 10 кВт, которая позволяет для специалиста найти необходимый объект, агрегат, определить вид дефекта, вибрационные признаки до устранения неисправности и после, и способ устранения дефекта, который был использован.

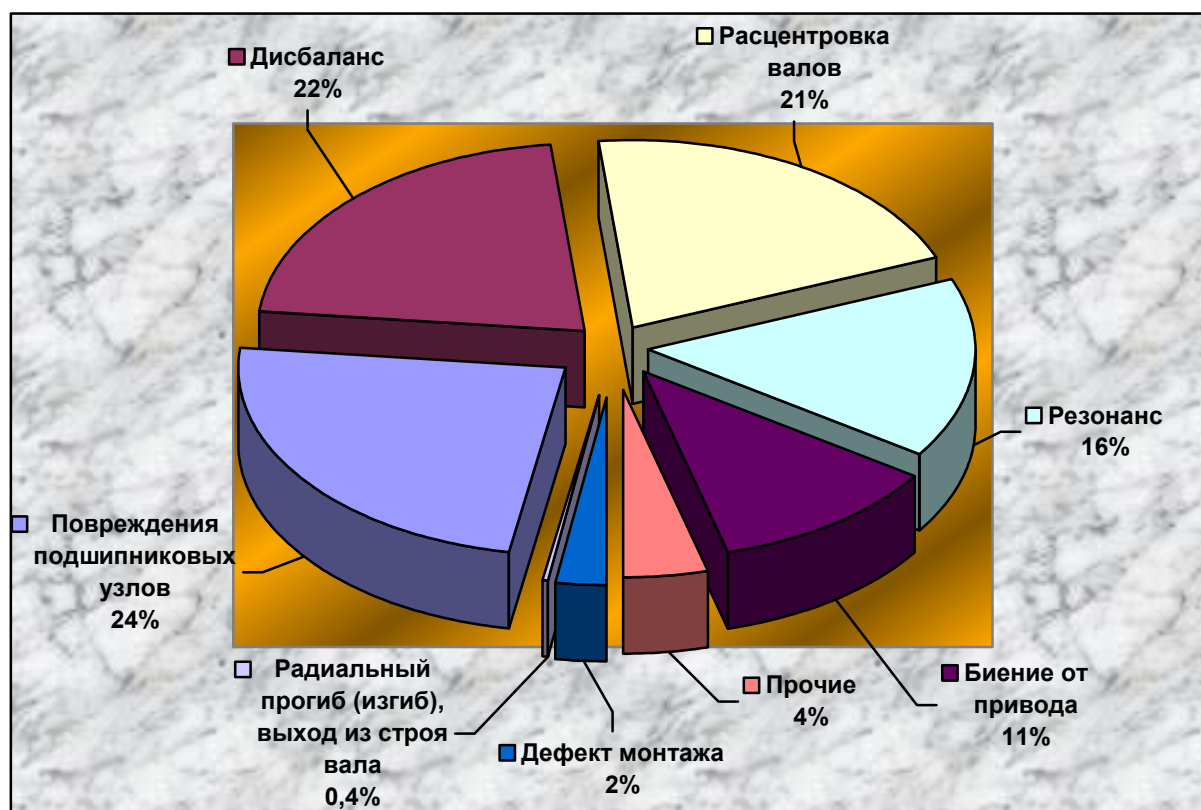
Чтобы обобщить статистические данные и выяснить основные выявляемые дефекты вибродиагностикой сделана табл. 3.

Основные выявленные дефекты ЭМ переменного тока с помощью вибродиагностики представлены в табл. 3. В этой таблице к дефектам ЭМ отнесены все дефекты рабочих механизмов и агрегатов, которые связаны с вращением ЭМ и отражаются на их работоспособности.

Таблица 3

**Основные выявленные дефекты ЭМ переменного тока с  
помощью вибродиагностики**

| №<br>п/п | Результаты вибродиагностики                    | Кол-во<br>одно-<br>именных<br>дефектов | %    | Решение принятое по результатам<br>вибродиагностики                                                   |
|----------|------------------------------------------------|----------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Повреждения подшипниковых узлов                | 306                                    | 23,9 | Замена подшипников, подшипникового узла или ЭМ. Кроме того, проводят фиксацию (стопорение) подшипника |
| 2        | Дисбаланс                                      | 276                                    | 21,6 | Проведена балансировка. Восстановление жесткости. Подцентровка. Ревизия                               |
| 3        | Расцентровка валов                             | 265                                    | 20,7 | Проведена подцентровка                                                                                |
| 4        | Резонанс                                       | 198                                    | 15,5 | Устраняют дефекты опор. Замена электродвигателя. Усиление рамы ЭД                                     |
| 5        | Биение от привода                              | 145                                    | 11,3 | Замена или ревизия дефектного узла.                                                                   |
| 6        | Прочие                                         | 54                                     | 4,2  | Устранение дефекта (неисправности)                                                                    |
| 7        | Дефект монтажа                                 | 31                                     | 2,4  | Проводят мероприятия по устранение дефекта обычно путем нового монтажа                                |
| 8        | Радиальный прогиб (изгиб), выход из строя вала | 5                                      | 0,4  | Замена вала                                                                                           |
|          | ИТОГО:                                         | 1280                                   | 100  |                                                                                                       |



**Рис. 9.** Основные дефекты ЭМ переменного тока в процентном отношении

Из диаграммы основных дефектов ЭМ переменного тока в процентном отношении (рис. 9) видно, что четыре вида основных дефектов (повреждение подшипниковых узлов, дисбаланс, расцентровка валов, резонанс) определяют

81,7% всех дефектов и от них зависит обеспечение работоспособности ЭМ в горнодобывающей промышленности. Остальные виды дефектов - биение от привода, дефекты монтажа, изгиб вала и прочие – 18,3%.

Результаты вибродиагностики по 1280 случаям позволяют определить направления совершенствования рабочих механизмов в горнодобывающей промышленности – совершенствование конструкции агрегатов с целью обеспечения надежной балансировки, которая не изменялась бы во времени; увеличение жесткости опор; обеспечение надежной центровки валов. Для ЭМ, работающих в тяжелых условиях эксплуатации определяются обоснованные требования по совершенствованию подшипниковых узлов – повышение срока службы подшипников для конкретных режимов эксплуатации, усиление конструкции опор и обеспечение более качественной фиксации подшипников.

Использование вибродиагностики для обнаружения дефектов ЭМ и агрегатов на предприятиях АК «АЛРОСА» показало ее высокую эффективность. Накопленный опыт и наличие необходимой аппаратуры позволяет перейти от диагностики к мониторингу ЭМ для наиболее ответственного по экономическим соображениям электрооборудованию. Проведение мониторинга ЭМ позволит обеспечить их работоспособность, предсказать приближение отказов и экономически обоснованно определить резерв по ЭМ и их элементам, чтобы обеспечить высокую надежность в эксплуатации.

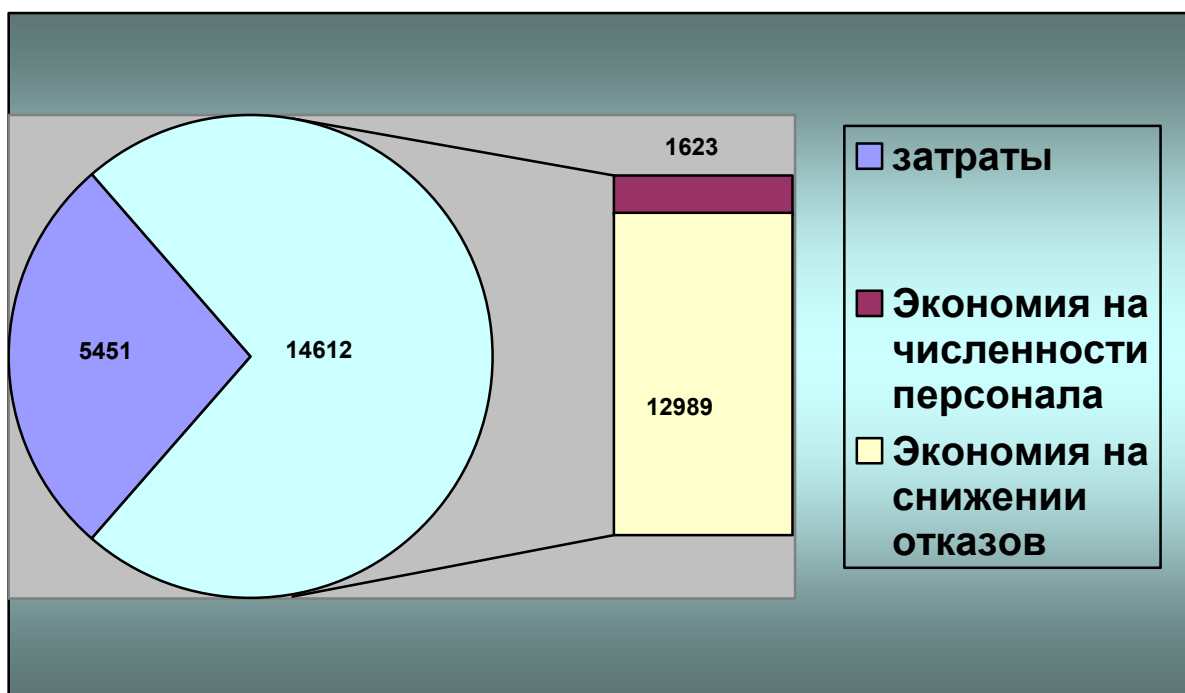
Таким образом, проведенная вибродиагностика позволяет определить эффективные пути совершенствования электрических машин и агрегатов горнодобывающей промышленности в целом для обеспечения их работоспособности и надежности в любых условиях эксплуатации, а также представить обоснованные рекомендации изготовителям электрических машин для улучшения конструкции и повышения эксплуатационных показателей.

В *пятом разделе* предложена методика, которая позволяет организовать новую систему работоспособности электрических машин переменного тока на основании вибродиагностики. Сделана экономическая оценка поддержания работоспособности электрических машин переменного тока с помощью вибродиагностики, которая также позволяет оценить экономический эффект от внедрения мониторинга и диагностики на предприятиях алмазодобывающей отрасли.

Исследованы актуальные и наиболее перспективные организационно-экономические задачи проведения ремонта электрических машин и предложена современная и отвечающая объективным требованиям рыночной экономики система организации ремонтных работ. Разработаны функциональные основы и механизм оптимизации комплекса проводимых работ по ремонту электрических машин на предприятии добывающей промышленности на основании современного метода вибродиагностики. При оценке экономической выгоды предлагаемого метода эффективного выбора обеспечения надежности проведен поэтапный функционально-стоимостной

анализ, а также сделан расчет по внедрению данного метода на исследуемом предприятии содержащий: подготовительный, информационный, аналитический, творческий, исследовательский и рекомендательный этапы, что обеспечивает лучшее понимание эффективности предложенных мероприятий.

Функционально-стоимостной анализ внедрения системы ремонта по фактическому состоянию с использованием метода вибродиагностики позволяет рассчитать экономический эффект по добывающему предприятию с учетом ликвидации потерь от простоя электрических машин и экономии численности ремонтного персонала. Согласно проведенным экономическим оценкам, планируется получение дополнительного экономического эффекта на исследуемом алмазодобывающем предприятии в размере 9161 тыс. руб. (рис. 10), как за счет значительного сокращения простоев оборудования вследствие выхода из строя электрических машин переменного тока, а также за счет сокращения излишней численности ремонтного персонала вследствие повышения уровня автоматизации ремонтных работ.



**Рис. 10.** Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий, тыс. руб.

Экономический эффект = 14612 тыс. руб. – 5451 тыс. руб. = 9161 тыс. руб.

Разработана математическая модель экономической оценки эксплуатационной надежности электрических машин переменного тока в горнодобывающей промышленности, которая учитывает повышение работоспособности ЭМ переменного тока по результатам вибродиагностики. Определены направления и пути повышения эффективности на стадии освоения нового метода организации ремонтных работ, и разработаны специализированные для исследуемого предприятия рекомендации по оптимизации и совершенствованию механизма внедрения предложенной

системы ремонта электрических машин по фактическому состоянию. Произведено исследование изменения затрат на ремонт по мере освоения более прогрессивного метода осуществления ремонтных работ. Рассчитаны ожидаемые затраты на ремонтные работы и их динамика по мере наращивания эффективности и качества ремонтных работ, которая в свою очередь зависит от снижения трудоемкости ремонта в процессе освоения и повышения отказоустойчивости и долговечности электрических машин.

В **заключении** сделаны основные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, которые состоят в следующем:

1. Анализ тенденций развития электромашиностроения, результаты проведенных статистических исследований условий эксплуатации и режимов работы электрические машины переменного тока в горнодобывающей отрасли свидетельствуют о том, что разрушение подшипниковых узлов работающих в сложных горногеологических условиях, при применении электрических машин на дробилках, мельницах, грохотах, классификаторах, конвейерах и т.д. имеют свои особенности, но для каждого случая возможно применение вибродиагностики. Поэтому в настоящей работе рассматриваются вопросы обеспечения работоспособности подшипниковых узлов.

2. Для обеспечения работоспособности электрические машины переменного тока в условиях эксплуатации разработана система их вибрационной диагностики, которая включает в себя модель вибродиагностики подшипниковых узлов и механических устройств различных рабочих механизмов, установлены точки измерения для диагностики, выбраны вибрационные сигналы и спектры измерения, введена оценка состояния и определены способы устранения неисправностей. Определены основные дефекты ЭМ переменного тока выявляемые с помощью вибродиагностики. Разработанная модель вибродиагностики предназначена для применения вибродиагностики электрических машин на предприятиях АК «АЛРОСА» с целью совершенствования организации эксплуатации электрооборудования. На основании результатов диагностики разработаны рекомендации по совершенствованию электрических машин.

3. В современных условиях эксплуатации поддержание работоспособности электрических машин переменного тока обеспечивается только с помощью системы планово-предупредительного ремонта, которая не учитывает конкретные условия эксплуатации, нет увязки ремонтных циклов с показателями надежности, и имеет сравнительно высокую трудоемкость технического обслуживания. Несмотря на недостатки планово-предупредительных ремонтов, им нет альтернативы при отсутствии диагностики для поддержания работоспособности электрических машин переменного тока. Широкий диапазон условий эксплуатации и режимов работы электрических машин переменного тока, низкий уровень обслуживания их на ряде производств горнодобывающей промышленности обуславливают необходимость разработки методов непосредственного

контроля и оценки технического состояния ЭМ и их узлов в условиях эксплуатации. Наиболее перспективными в этом отношении являются методы вибродиагностики, базирующиеся на использовании информации, заключенной в колебательных процессах.

4. Структурная модель диагностики рабочих механизмов в горнодобывающей промышленности устанавливает набор элементов, взаимосвязи между ними и позволяет определить коэффициенты относительной важности элементов модели для вибродиагностики в соответствии с поставленными задачами исследования. Получены численные значения коэффициентов относительной важности для трех уровней, которые позволяют оценить важность всех элементов модели.

5. Вибродиагностики по 1280 случаям позволяют определить направления совершенствования рабочих механизмов в горнодобывающей промышленности – совершенствование конструкции агрегатов с целью обеспечения надежной балансировки, которая не изменялась бы во времени; увеличение жесткости опор; обеспечение надежной центровки валов. Для электрических машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации определяются обоснованные требования по совершенствованию подшипниковых узлов – повышение срока службы подшипников для конкретных режимов эксплуатации, усиление конструкции опор и обеспечение более качественной фиксации подшипников.

Результаты вибродиагностики эффективно определяют имеющиеся и прогрессирующие дефекты, и позволяют принять решение по критерию вибросостояния. Вибродиагностика позволяет своевременно обнаружить дефекты и произвести остановку оборудования в ремонт при подходе к предельному состоянию. Четыре вида основных дефектов (повреждение подшипниковых узлов, дисбаланс, расцентровка валов, резонанс) определяют более 80% всех дефектов, и от них зависит обеспечение работоспособности электрических машин в горнодобывающей промышленности.

6. Разработана математическая модель экономической оценки эксплуатационной надежности электрических машин переменного тока в горнодобывающей промышленности, которая учитывает повышение работоспособности ЭМ переменного тока по результатам вибродиагностики. Определены направления и пути повышения эффективности на стадии освоения нового метода организации ремонтных работ, и разработаны специализированные для исследуемого предприятия рекомендации по оптимизации и совершенствованию механизма внедрения предложенной системы ремонта электрических машин по фактическому состоянию. Функционально-стоимостной анализ внедрения системы ремонта по фактическому состоянию с использованием метода вибродиагностики позволяет рассчитать экономический эффект по добывающему предприятию с учетом ликвидации потерь от простоя электрических машин и экономии численности ремонтного персонала. Согласно проведенным экономическим оценкам, планируется получение дополнительного экономического эффекта на исследуемом алмазодобывающем предприятии в размере 9161 тыс. руб.

Результаты исследований и основное содержание работы отражены в следующих публикациях:

1. Модель вибродиагностики электрических машин переменного тока/ Муравлев О.П., Шевчук В.П.; Том.политехн.ун-т.- Томск, 2005.-19с.: ил.- Библиогр.: 7 назв.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 13.01.05. № 14-B2005
2. Муравлев О.П. Шевчук В.П. Исследования и возможные пути повышения эксплуатационной надежности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии / Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции 21-24 сентября 2004 г. Тольятти: Изд-во Тольяттинского государственного ун-та, 2004, - с. 21 – 24.
3. Шевчук В.П. Испытания электрических машин на надежность // IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 7-11 апреля 2003 г. \ Труды. В 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. – Т. 1.- с. 263 – 264
4. Шевчук В.П. Обеспечение эксплуатационной надежности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей отрасли // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 6-7 сентября 2001 г. Томск: ТПУ, 2001 г. - С. 118.
5. Экономическая оценка выбора эффективного метода обеспечения надежности электрических машин переменного тока в горнодобывающей отрасли/ Муравлев О.П., Шевчук В.П.; Том.политехн.ун-т.- Томск, 2005.- 26с.: ил.- Библиогр.: 7 назв.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 13.01.05. № 15-B2005.
6. Shevchuk V.P. Investigations of the operation reliability increase of the alternating current electric machines in diamond extractive industries \ The eight International Scientific and Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists «Modern Technique and Technologies» (MTT' 2002), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. \ Russia, Tomsk, April 12, 2002. – S. 103 – 104.

Подписано в печать