

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

На правах рукописи

КУЗИН ЕВГЕНИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ
МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, профессор
Б. Л. Герике

Кемерово 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ ЛЕНТОЧНЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ НА ШАХТАХ.....	10
1.1 Конвейерный транспорт в горной промышленности.....	10
1.2 Анализ возникновения отказов в работе ленточных конвейеров.....	16
1.3 Стратегия и системы ремонтного обслуживания горных машин.....	27
1.4 Основные итоги и выводы.....	32
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.....	34
2.1 Обзор и анализ существующих методов технической диагностики горно-шахтного оборудования	34
2.2 Анализ методов вибрационной диагностики регулируемых приводов.	41
2.3 Оценка методов теплового контроля электроприводов шахтных ленточных конвейеров.....	48
2.4 Исследование методов анализа смазочных материалов редукторов шахтных ленточных конвейеров.....	61
2.5 Основные итоги и выводы	66
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.....	68
3.1 Анализ методов повышения надежности и прогнозирования техниче- ского состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров.....	68
3.2 Разработка математической модели деградации технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров	72
3.3 Проверка гипотезы о законе распределения экспериментальных результатов оценки работоспособного технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров.....	76
3.4 Оценка влияния погрешности измерения на результаты диагностирования редукторов шахтных ленточных конвейеров.....	83
3.5 Разработка прогностической модели изменения технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров	85
3.6 Основные итоги и выводы	88

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.....	89
4.1 Описание и выбор объекта исследования.....	89
4.2 Методика проведения вибродиагностических обследований редукторов шахтных ленточных конвейеров.....	93
4.3 Методика проведения диагностических обследований редукторов шахтных ленточных конвейеров методом инфракрасной термографии.....	104
4.4 Апробация методики оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров по параметрам вибрации, результатам инфракрасной термографии и параметрам смазочного масла.....	107
4.5 Основные итоги и выводы.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы работы. Одной из основных единиц транспортной техники на угольных предприятиях, добывающих полезное ископаемое подземным способом, является ленточный конвейер. Повышающиеся объемы добычи угля комплексно-механизированными очистными забоями требуют, вместе с увеличением безопасности производства работ, создания надежных транспортных систем.

Существующие на предприятиях по подземной добыче угля стратегии обслуживания и ремонтов редукторов шахтных ленточных конвейеров используют рекомендации заводов изготовителей, составленные для усредненных условий эксплуатации. Каждый отдельный редуктор, в зависимости от места установки в кинематической схеме конвейера, имеет различную нагрузку и темпы износа. Согласно используемым стратегиям технического обслуживания, при отсутствии методики определения технического состояния узлов и элементов редуктора ленточного конвейера, возможны как замена еще работоспособной детали, так и риск преждевременного ускоренного износа или даже возникновения внезапного отказа. Своевременное определение технического состояния и прогнозирование процессов деградации редукторов ленточных конвейеров будет способствовать сокращению затрат на техническое обслуживание, повышению безопасности их эксплуатации и является актуальной научной задачей.

Степень разработанности. Исследованиями повышения надёжности горных и транспортных машин занимались многие учёные: А. О. Спиваковский, Л. Г. Шахмейстер, М. Г. Потапов, В. Н. Гетопанов, В. Г. Дмитриев, В. С. Волотковский, В. П. Дьяченко, В. К. Смирнов, А. Г. Нохрин, В. И. Галкин, Б. Л. Герике, А. Ю. Захаров, Л. И. Андреева, А. А. Хорешок, В. М. Юрченко, А. Б. Ефременков, А. А. Реутов, В. И. Александров и др.

Большинство авторов исследовали вопросы повышения надёжности ленты, стыковых соединений, роlikоопор, загрузочных устройств. Несмотря на значительный объем проведенных исследований, отсутствует методика оценки технического состояния, адаптированная для диагностики редукторов в составе частотно-

регулируемого электропривода ленточных конвейеров, учитывающая условия и режимы эксплуатации в подземных горных условиях. Отказы, вызванные неисправностью редуктора, занимают в среднем 12% от общего числа отказов, но при этом среднее время восстановления составляет 21,2 часа.

Таким образом, разработка методов оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров и прогнозирования их остаточного ресурса позволит не только усовершенствовать систему их технического обслуживания и ремонтов, но и повысит эксплуатационную надежность.

Цель работы. Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров на основе применения совокупности методов неразрушающего контроля для назначения технического и ремонтного обслуживания.

Идея работы заключается в комплексном использовании методов неразрушающего контроля для разработки методических основ оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров, позволяющее назначать соответствующее ремонтное обслуживание для повышения их эксплуатационной надежности.

Объект исследований: редукторы шахтных ленточных конвейеров.

Предмет исследований: диагностические параметры редукторов шахтных ленточных конвейеров.

Задачи исследований:

1. Провести анализ отказов ленточных конвейеров на угольных шахтах и оценить: надежность узлов и элементов ленточных конвейеров, а также эффективность применяемых стратегий технического обслуживания и ремонта.
2. Выявить наиболее приемлемые, с точки зрения получения достоверных заключений, методы и средства технической диагностики для оценки фактического технического состояния редукторов.
3. Разработать физико-статистическую модель постепенной деградации технического состояния редукторов.

4. Разработать методические основы диагностирования редукторов шахтных ленточных конвейеров позволяющие назначать соответствующее техническое и ремонтное обслуживание.

Методы исследований. В работе используются методы систематических целенаправленных наблюдений и математико-статистической обработки данных; системного анализа при разработке критериев оценки фактического технического состояния узлов редуктора; методы теории вероятности и математического моделирования при разработке прогностических моделей деградации узлов и элементов редуктора шахтного ленточного конвейера.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Оценка технического состояния узлов и элементов редукторов базируется на диагностических признаках, получаемых в результате комплексного анализа информации о параметрах вибрации, теплового контроля, смазочного масла.

2. Разработанная прогностическая модель изменения технического состояния узлов и элементов редукторов шахтных ленточных конвейеров имеет вероятностный характер с доверительной вероятностью заключения не менее 90% и подчиняется нормальному закону распределения.

3. Мониторинг параметров вибрации подшипников и зубчатых передач, температуры корпуса редуктора, кинематической вязкости, температуры вспышки, накопленных механических примесей в смазочном масле создает основу для установления регрессионных зависимостей и определяет текущее техническое состояние узлов и элементов редукторов шахтных ленточных конвейеров с прогнозом их остаточного ресурса.

Обоснованность и достоверность сформулированных научных положений и основных результатов диссертационной работы обусловлена: достаточным объемом экспериментальных исследований (систематический мониторинг параметров вибрации и масла 12 редукторов в течение 5 лет); использованием апробированных теоретических положений по оценке работоспособности редукторов шахтных ленточных конвейеров, выполненных с применением современных методов спектрально-эмиссионного анализа смазочного масла, методов теплового кон-

троля, вибрационной диагностики и математического моделирования; использованием диагностического оборудования, прошедшего поверку; положительными результатами внедрения методики на «Шахте им. В. Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс».

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Установлена закономерность отказов и продолжительность простоев шахтных ленточных конвейеров от определяющих факторов: качество и своевременность технического обслуживания, отсутствие систем контроля технического состояния, дефекты монтажа, наличие высоких динамических нагрузок.
2. Определены методы функциональной диагностики и разработаны критерии оценки фактического технического состояния редукторов, включая «плавающие опорные маски» вибрационного сигнала для частотно-регулируемых приводов, разницу в температурах сопряженных элементов и содержание примесей в смазывающих материалах.
3. Установлены предельные уровни критериев износа составляющие: для подшипников $K_b = 1,15$ мм/с, для зубчатых передач $K_g = 3,5$ мм/с.
4. Установлена предельно допустимая температурная аномалия при контроле поверхности корпуса редуктора методом инфракрасной термографии $\Delta T = 15$ °С.
5. Установлены параметры регрессионных моделей определяющих факторов с показателями достоверности не менее 90%, пригодные для прогнозирования остаточного ресурса подшипниковых узлов и зубчатых передач редукторов шахтных ленточных конвейеров.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработана методика оценки технического состояния редукторов на основе результатов вибродиагностики, инфракрасной термографии и контроля состава вещества позволяющая:

- объективно оценивать фактическое техническое состояние редукторов по совокупности диагностических признаков;

– определять остаточный ресурс подшипниковых узлов и зубчатых пар редуктора и заблаговременно определять рациональные сроки проведения технического обслуживания редуктора, в том числе планировать сроки замены смазочного масла.

Личный вклад автора заключается:

- в выявлении факторов, влияющих на отказы редукторов;
- в выполнении аналитических и экспериментальных исследований;
- в установлении закономерностей накопления механических примесей в смазочном масле с изменением параметров вибрации редуктора;
- в разработке прогностической модели для оценки остаточного ресурса редукторов, а также разработке методики для оценки технического состояния редукторов по совокупности диагностических признаков.

Научное значение работы заключается в разработке:

комплексной методики оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров с учетом использования в приводах частотных преобразователей, особенностей условий и режимов эксплуатации на горных предприятиях, основанной на использовании методов неразрушающего контроля и спектрально-эмиссионного анализа смазочного масла;

прогностической модели изменения фактического технического состояния редуктора по комплексным показателям.

Реализация результатов работы. Выводы и рекомендации, полученные в результате научного исследования, находят практическое применение в учебных учреждениях высшего образования (Филиал КузГТУ в г. Прокопьевске) и эксплуатирующих организациях (АО «СУЭК - Кузбасс»). Результаты диссертационной работы, включающие методы оценки фактического технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров, рекомендации по использованию методов вибродиагностики и инфракрасной термографии для прогнозирования остаточного ресурса деталей и узлов редукторов внедрены на шахте «Шахта им. В.Д. Ялевского» АО «СУЭК – Кузбасс».

Основные положения методики включены в разделы лекционных курсов и практических занятий по дисциплине «Диагностика горных машин и оборудования».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на VII, VIII, XII Международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании» (Белово 2014, 2015, 2019); на XIV научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной отрасли» (Кемерово 2012); на Международной научно-практической конференции «Подземные горные работы - 21 век» (Ленинск-Кузнецкий 2013); на IV, V, VI Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие угольных регионов России» (Прокопьевск 2014, 2016, 2018); на Международной научно-практической конференции «Неделя горняка» (Москва, 2015, 2020); на V Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017)» (Кемерово 2017); на Международной научно-практической конференции «Повышение качества образования, современные инновации в науке и на производстве» (Экибастуз 2017); на Всероссийской научно-практической конференции «Россия молодая 2019» (Кемерово 2019); на Четвертом Международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово 2019).

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертации 30 научных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения общим объемом 141 страница, содержит 28 таблиц, 65 рисунков и приложение, список литературы включает 135 наименований.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ ЛЕНТОЧНЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ НА ШАХТАХ

1.1. Конвейерный транспорт в горной промышленности

Полезное ископаемое, добываемое подземным способом необходимо выдать на поверхность для переработки или отправки потребителю. В зависимости от места работы различают транспорт внутренний – транспорт в пределах горного предприятия, и внешний – осуществляющий вывоз полезного ископаемого до потребителя.

Классификация транспорта шахт по месту работы и средствам механизации представлена на рисунке 1.1.

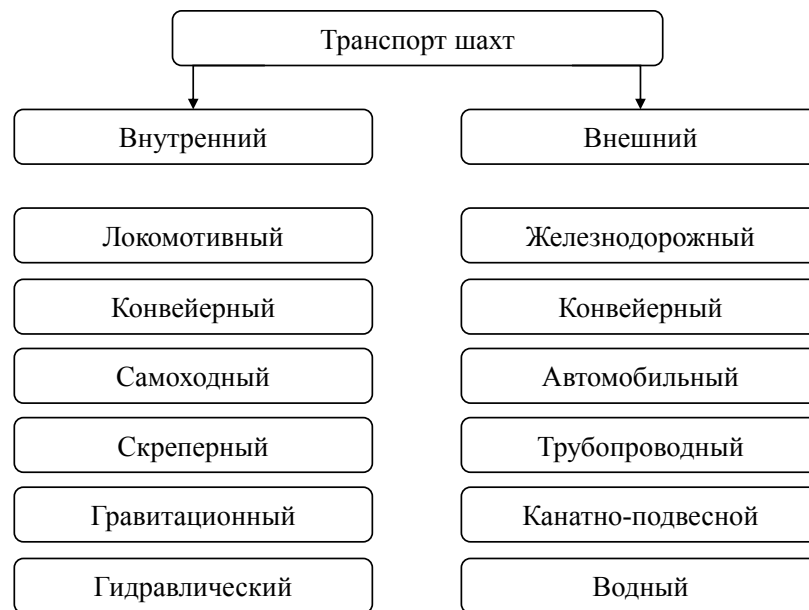


Рисунок 1.1. – Классификация транспорта шахт

По принципу действия все транспортные установки шахт разделяют на две основные группы:

1. Установки периодического действия, работающие циклично с определенными интервалами, принимающие и транспортирующие груз отдельными порциями.

2. Установки непрерывного действия, перемещающие поступающий на них груз непрерывным потоком в течение длительного периода времени.

Особенностью транспортных машин циклического действия является то, что при неизменной скорости время транспортирования увеличивается, а производительность падает с ростом расстояний перевозки. Производительность таких машин снижается также при увеличении времени погрузочно-разгрузочных, маневровых работ и других операций, увеличивающих время цикла [1].

Анализ практики эксплуатации показал, что расчетная производительность машин непрерывного действия не зависит от дальности транспортирования и существенно может быть увеличена за счет скорости перемещения. Указанное преимущество транспортных машин непрерывного действия нашло широкое применение в конвейерных установках. В ближайшее время ожидается увеличение, как количества, так и производительности, а также расстояния транспортирования горной массы ленточными конвейерами. Растут энерговооруженность и техническая оснащённость ленточных конвейеров, широко внедряется частотно-регулируемый электропривод. От работоспособного состояния конвейеров зависит работа всего предприятия в целом.

Увеличение объемов добычи угля комплексно-механизированными очистными забоями и безопасности производства работ требуют создания надежных транспортных систем. Высокая эффективность и бесперебойность в работе с одновременным снижением энергопотребления – основная задача, стоящая перед производителями поточных линий шахтных ленточных конвейеров. Другой не менее важной задачей является сокращение затрат на их техническое обслуживание и ремонт. Для обеспечения безотказности работы ленточного конвейера в течение как можно более продолжительного времени необходимо: определить причины выхода из строя различных составляющих элементов, узлов и деталей конвейера; выявить критерии оценки технического состояния узлов конвейера [2].

Конвейеры, как правило, классифицируются по принципу действия, конструктивным особенностям, типам тягового и грузонесущего элементов, назначению и области применения [3].

Классификация конвейеров по принципу действия:

- непрерывное перемещение груза по сплошному грузонесущему органу вращением;
- непрерывное перемещение груза вместе со сплошным грузонесущим органом;
- непрерывное перемещение груза по вращающимся опорам – каткам, роликам;
- непрерывное перемещение груза колеблющимся грузонесущим органом;
- перемещение груза в ковшах, лотках, платформах и тележках, при этом тяговый орган движется непрерывно, а груз перемещается порциями.

По типу тягового элемента различают конвейеры с ленточным, цепным, канатным и комбинированным тяговым органом и без тягового органа (вибрационные, качающиеся, винтовые, роликовые).

По типу грузонесущего элемента конвейеры бывают ленточные, пластинчатые, скребковые, подвесные, толкающие, тележечные, ковшовые и люлочные, инерционные (качающиеся, вибрационные, роликовые), а также винтовые (шнеки).

По назначению конвейеры бывают стационарные, полустационарные, передвижные, разборные, поворотные, крутонаклонные, для перемещения насыпных, штучных (тарных) грузов и груза особого рода – людей.

Из всего многообразия конвейеров на горных предприятиях наибольшее распространение получили скребковые и ленточные конвейеры, благодаря их достаточно высокой надежности и производительности. При этом скребковые конвейеры используются для доставки в пределах забоя, а ленточные в качестве участкового и магистрального транспорта.

Для приведения в движение тягового органа (цепи, ленты, каната) используются приводные барабаны и звездочки, частота вращения которых составляет десятки оборотов в минуту. Изготовление электродвигателей с подобной частотой вращения оказывается нецелесообразным. Электрические машины из конструктивных и экономических соображений выполняют с частотой вращения 1000,

1500, 3000 об/мин. Для согласования частоты вращения и повышения момента приводного барабана (звездочки) применяются передаточные механизмы, чаще всего редукторы.

Рассмотрим классификацию редукторов, применяемых в приводах конвейеров для горной промышленности. Редукторы классифицируют по типам, типоразмерам и исполнениям.

Классификация редукторов приведена на рисунке 1.2.

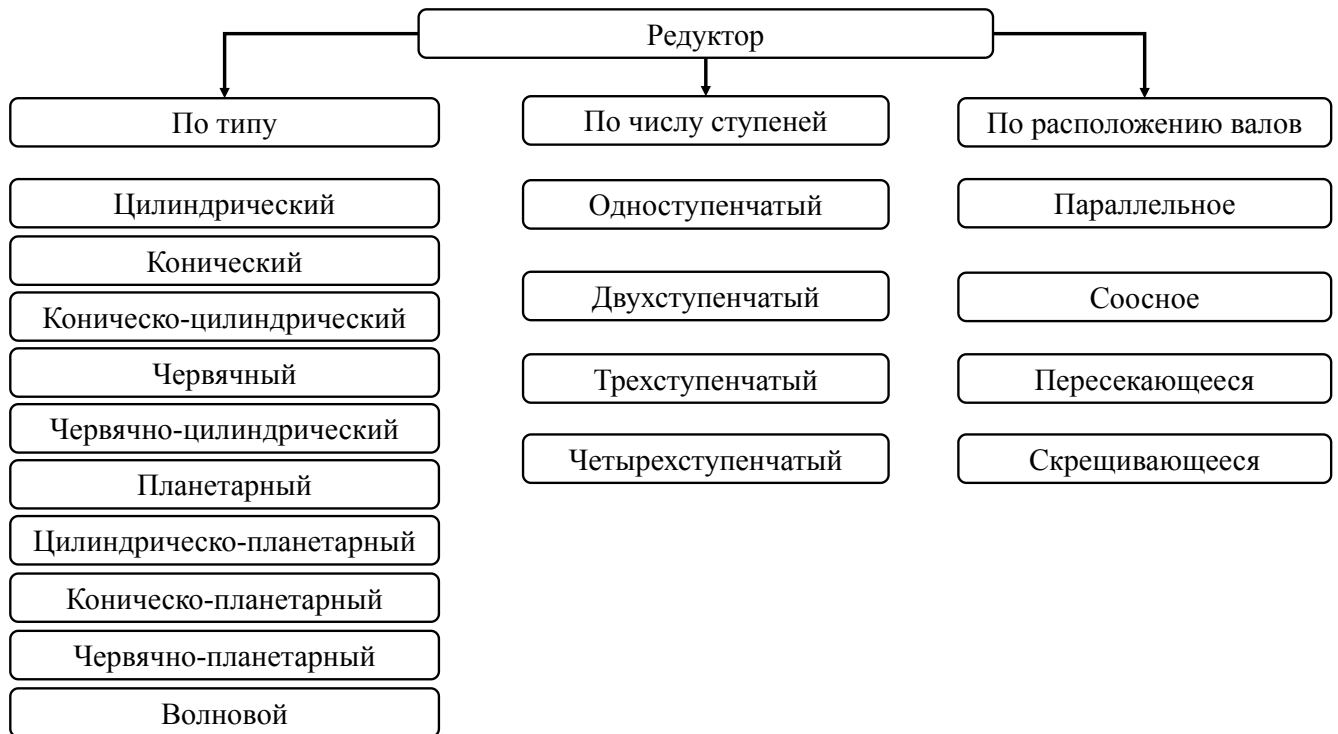


Рисунок 1.2. – Классификация редукторов

Цилиндрические редукторы являются самыми распространенными в машиностроении, так как позволяют передавать достаточно значительные мощности при высоком КПД (0,96-0,98 на зубчатую пару). В цилиндрических редукторах количество передач влияет на габариты и передаточное отношение. Например, одноступенчатые редукторы имеют передаточные числа от 2,0 до 10, двухступенчатый – от 10 до 60, а трехступенчатый – от 20 до 400 [4].

На рисунке 1.3. показаны кинематические схемы наиболее распространенных зубчатых цилиндрических и коническо-цилиндрических редукторов.

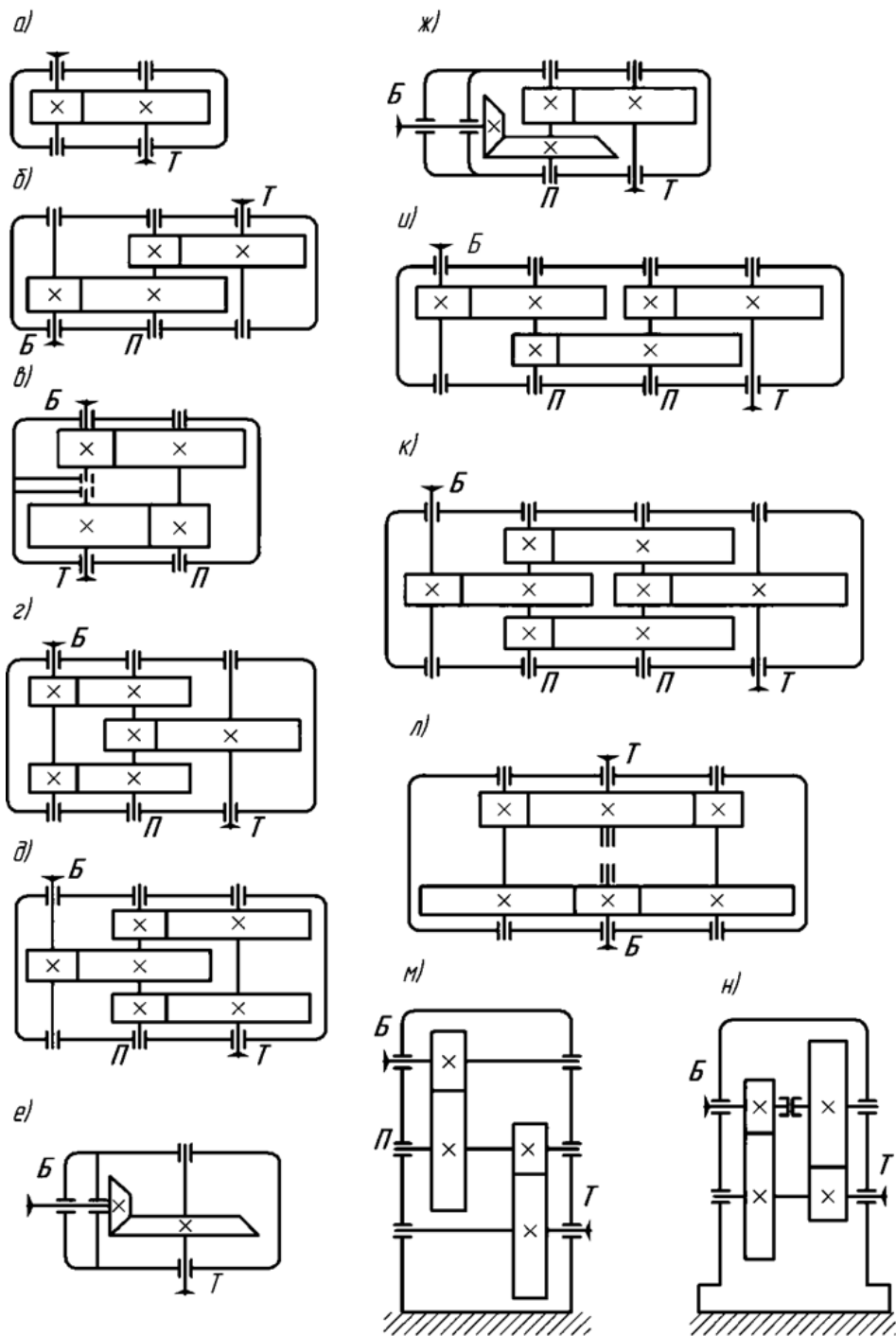


Рисунок 1.3. – Кинематические схемы наиболее распространенных зубчатых цилиндрических и цилиндрических редукторов: Б – быстроходный вал; П – промежуточные валы; Т – тихоходный вал

В приводах ленточных конвейеров в настоящее время находят наибольшее применение кинематические схемы типа б), в), г) и ж). Для стационарных ленточных конвейеров на поверхности используются цилиндрические редукторы типа (серии) 1Ц2У, 1Ц3У, Ц2, РМ, РЦД, РК, ВК, Ц2Н, Ц2У, РКЦ, РПК.

Для подземных ленточных конвейеров используются коническо-цилиндрические редукторы серии КЦ1, КЦ2, 2КЦ3.

Отличия редукторов шахтных ленточных конвейеров от редукторов общего машиностроения вызываются случайным характером нагружения, определяемым изменением сил сопротивления транспортированию горной массы. К редукторам шахтных конвейеров предъявляются требования компактности при высоких осевых, радиальных нагрузках и прочности корпуса, возможности обеспечения высокого пускового момента и минимального технического обслуживания. Наличие агрессивных шахтных вод и взрывоопасной атмосферы требует применения устройств электрического заземления корпуса и отдельных элементов редуктора, исключающих накопление статического электричества, а также особых условий охлаждения. Сервис-фактор редукторов, используемых в ленточных конвейерах, составляет от 1,75 до 2,0 и учитывает возможность запуска конвейера под нагрузкой. Привод ленточного конвейера должен иметь устройство, препятствующее движению ленты с грузом в обратном направлении. Это достигается установкой тормоза на быстроходном валу и установкой ограничителя обратного хода внутри корпуса редуктора.

Приведенные данные, позволили выбрать для исследования шахтные ленточные конвейеры, которые могут оснащаться редукторами и двигателями импортного производства, прошедшими необходимую сертификацию.

Основные параметры коническо-цилиндрических редукторов серии ХО фирмы Moventas (Финляндия) представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры коническо-цилиндрических редукторов серии ХО фирмы Moventas

Типоразмер	Мощность двигателя, кВт	Масса, кг	Объем масла, л
D3RST50ХО	160	1200	70
D3RST50ХО	250	1600	100
D3RST50ХО	315	2100	130
D3RST82ХО	500	3100	180

1.2. Анализ возникновения отказов в работе ленточных конвейеров

Научно-методическая база повышения надежности ленточных конвейеров

Ленточный конвейер представляет транспортную машину непрерывного действия, основными элементами являются: лента – тяговый и грузонесущий орган; приводной, отклоняющий, обводной и хвостовой барабаны; став конвейера с направляющими конструкциями роlikоопор; верхние и нижние ролики; приводные блоки; вспомогательные и защитные устройства.

Исследованиями повышения надёжности транспортных машин занимались многие учёные: А. О. Спиваковский, Л. Г. Шахмейстер, М. Г. Потапов, В. Г. Дмитриев, В. Н. Гетопанов, В. Ф. Монастырский, А. А. Титов, И. Г. Штокман, В. П. Серый, Н. В. Комарова, В. С. Волотковский, В. П. Дьяченко, В. К. Смирнов, А. Г. Нохрин, Х. С. Хасаев, В. И. Галкин, А. Ю. Захаров, А. А. Реутов, В. М. Юрченко, Б. Л. Герике, А. А. Хорешок, Л. И. Андреева, В. И. Александров, А. Б. Ефременков и др.

Спиваковский А. О. являлся создателем научной школы рудничных и карьерных транспортных машин, был основоположником теории крутонаклонных конвейеров, ленточно-канатных конвейеров, занимался вопросами теории расчёта, оптимизации пусковых режимов и автоматизации конвейерного транспорта [5–6].

Потапов М. Г. обосновал применение поточных систем и обозначил проблемы использования конвейерного транспорта на карьерах [7].

Галкин В. И. разработал теорию надежности ленточного конвейера, роlikов и става на основе системного подхода, учитывающего климатические условия, режим загрузки и систему технического обслуживания. Основное внимание в исследованиях уделялось ленточному полотну и роlikоопорам [8 - 9].

Шахмейстер Л. Г. и Дмитриев В. Г. занимались вопросами теории расчёта ленточных конвейеров и вопросами снижения коэффициента трения качения ленты по роlikоопорам [10, 11].

Научные исследования Захарова А. Ю. направлены на повышение эффективности ленточных конвейеров на основе использования силового взаимодействия постоянных магнитов. Исследовались вопросы вибрации конвейерной ленты и создание устойчивого магнитного подвеса, определение критической величины сопротивления движению роликов [12 – 15].

Юрченко В. М. занимался вопросами уменьшения износа лент и предотвращению их возгорания, а также условиями центрирования конвейерной ленты [16 – 18].

Хачатрян С. А. в работе [19] приводит данные по отказам элементов ленточных конвейеров на шахтах ОАО «Воркутауголь» где простои механического оборудования составляют от 10,5% до 28,3%, при этом отдельно не выделялись отказы редуктора. Отказы по причине порыва ленточного полотна или стыка составляют от 37% до 49%.

Богданов А. А. в работе [20] приводит данные о простоях ленточных конвейеров, вызванных отказами загрузочных устройств, которые составляют от 50 до 80% в общем количестве простоев на предприятиях ПО «Интауголь».

Дьяченко В. П. занимался вопросами надежности роликоопор [21].

В работе [22] Кочневой О. В. приведено обоснование основных параметров загрузочных секций с батутной подвеской для повышения надежности работы распределительных ленточных конвейеров.

В работе [23] Реутов А. А. приводит данные, что более 50% аварий на ленточных конвейерах угольных шахт происходит из-за разрыва стыковых соединений.

В перечисленных исследованиях вопросам исследования надежности редукторов ленточных конвейеров уделялось недостаточное внимание.

Анализ причин простоев ленточных конвейеров

Данные по простоям ленточных конвейеров некоторых шахт Кузбасса приведены в таблицах 1.2 – 1.6 и на рисунках 1.4 – 1.8. При этом отдельно рассмотре-

ны простои конвейеров, связанные с отказом редуктора, а к отказам механического оборудования относятся отказы муфт, барабанов, натяжных устройств.

Основные факторы, приводящие к отказам элементов конвейера, включают в себя следующие: несвоевременное техническое обслуживание; низкая квалификация обслуживающего персонала; отсутствие систем определения технического состояния оборудования; отсутствие учета влияния места установки приводных станций; нарушение центровки и балансировки приводов; нарушения в работе систем вентиляции и охлаждения редукторов и приводных двигателей; использование некачественных смазочных материалов.

Факторами, которые выявлены впервые являются:

отсутствие учета влияния места установки приводных станций – включает в себя работу приводных барабанов с различными коэффициентами сцепления с рабочей и нерабочей обкладками ленты;

наличие геологических нарушений, приводящее к пучению почвы и расцентровке валов;

влияние запыленности, обводненности и стесненности пространства;

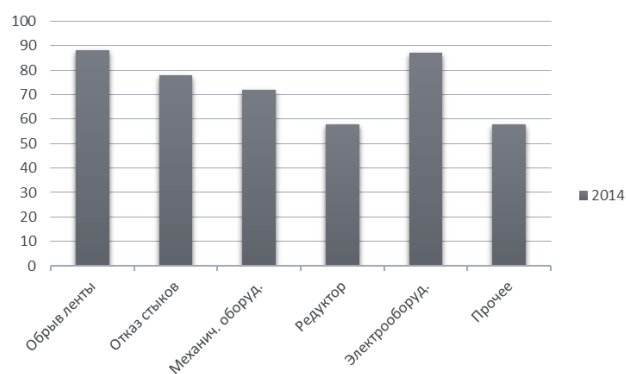
нарушения в работе вентиляции картера редуктора, приводящие к повышению давления водяных паров и отказу уплотнений, а также к образованию водомасляной эмульсии.

Таблица 1.2. – Простои конвейеров на ООО «Шахта «Байкаимская»

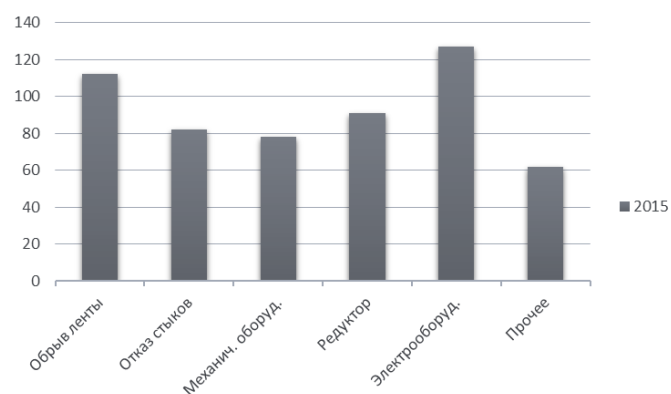
Причина простоя	Годы									
	2013		2014		2015		2016		2017	
	Вре- мя, ч	До- ля, %	Вре- мя, ч	До- ля, %	Вре- мя, ч	До- ля, %	Вре- мя, ч	До- ля, %	Вре- мя, ч	До- ля, %
Обрыв ленты	65	15,0	88	19,9	112	20,3	78	19,9	89	32,5
Отказ стыков	49	11,3	78	17,7	82	14,9	93	23,7	45	16,4
Отказ механиче- ского оборудова- ния	61	14,1	72	16,3	78	14,1	54	13,8	43	15,5
Редуктор	79	18,2	58	13,2	91	16,5	24	6,12	35	12,8
Отказ электрообо- рудование	143	33,0	87	19,7	127	23,0	76	19,2	28	10,2
Прочее	36	8,31	58	13,2	62	11,2	67	17,1	34	12,4
Всего	433	100	441	100	552	100	392	100	274	100

Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Байкаимская» приведена на рисунке 1.4.

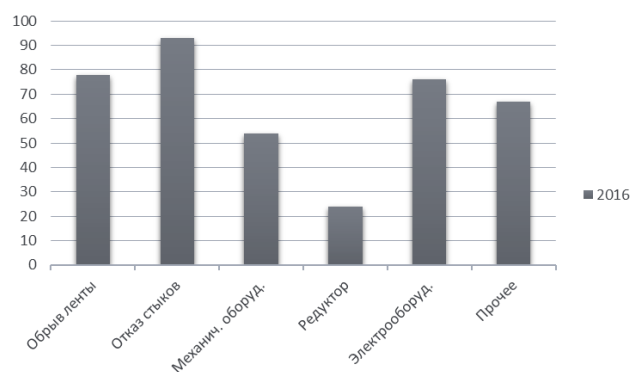
Т, ч



Т, ч



Т, ч



Т, ч

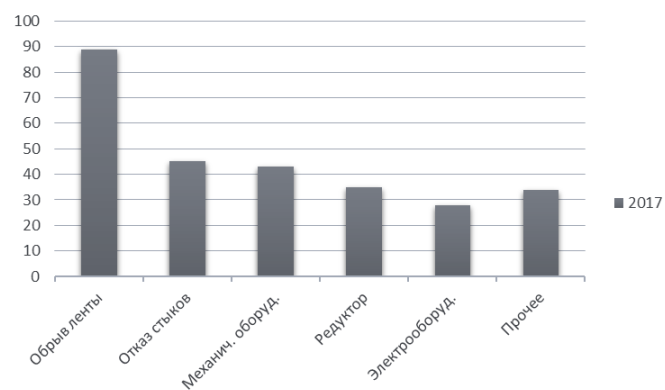


Рисунок 1.4. – Гистограмма простоев конвейеров по ООО «Шахта Байкаимская»

Таблица 1.3. – Простои конвейеров на ООО «Шахта «Зенковская» (Техкомплекс)

Причина простоя	Годы							
	2012		2013		2014		2015	
	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %
Обрыв ленты	87	17,06	45	20,36	51	20,01	56	18,01
Отказ стыков	135	26,47	59	26,69	46	18,04	43	13,83
Отказ механического оборудования	114	22,35	42	19,00	47	18,43	87	27,97
Редуктор	57	11,18	24	10,86	42	16,47	68	21,86
Отказ электрооборудования	63	12,35	22	9,955	36	14,12	40	12,86
Прочее	54	10,59	29	13,12	33	12,94	17	5,47
Всего	510	100	221	100	255	100	311	100

Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Зенковская» приведена на рисунке 1.5.

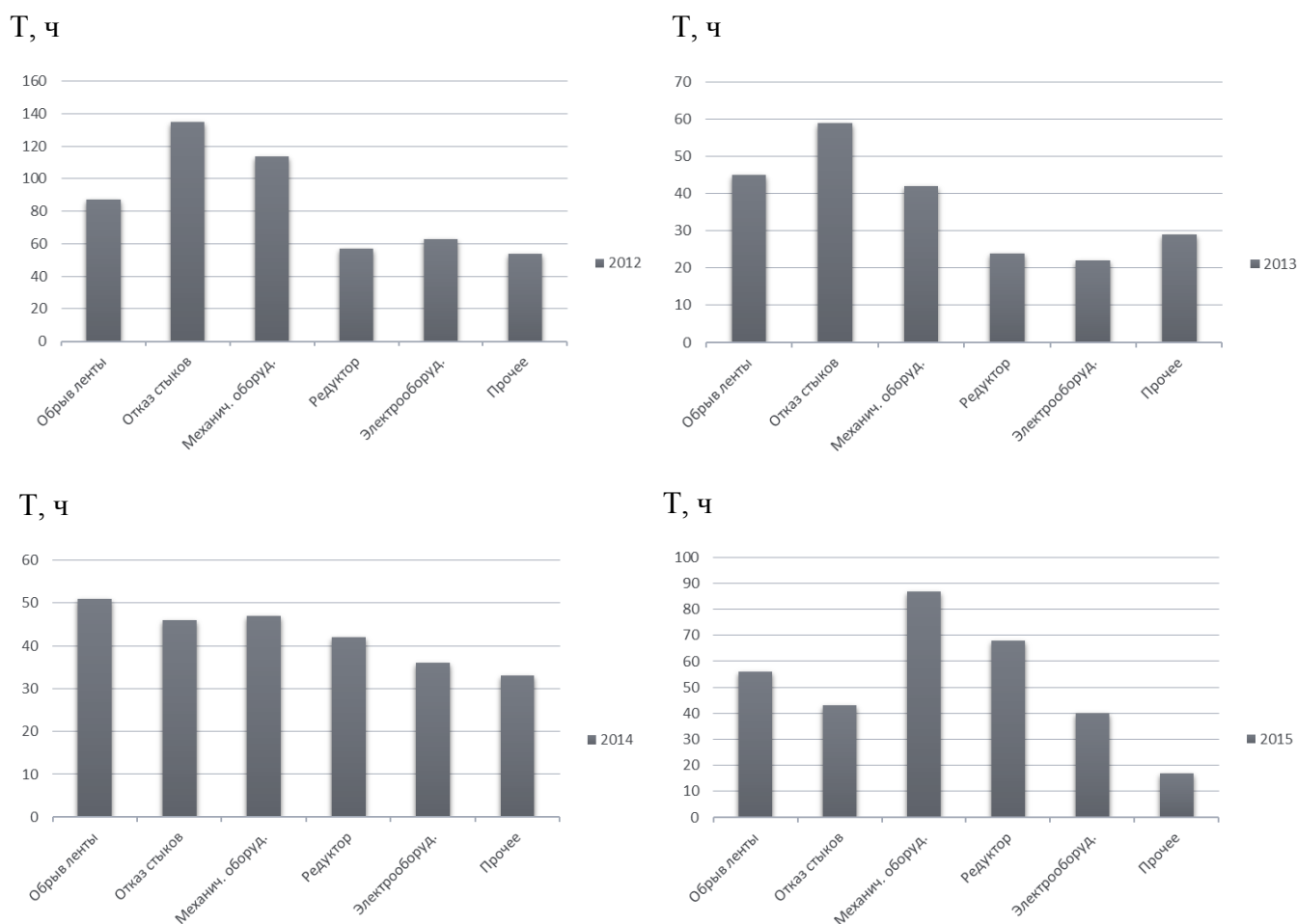


Рисунок 1.5. – Гистограмма простоев конвейеров по ООО «Шахта «Зенковская»

Таблица 1.4. – Простои конвейеров на шахте «Талдинская-Западная 1»

Причина простоя	Годы							
	2014		2015		2016		2017	
	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %
Обрыв ленты	82	23,56	62	19,08	97	23,32	45	14,95
Отказ стыков	64	18,39	78	24,00	67	16,11	84	27,91
Отказ механического оборудования	48	13,79	64	19,69	81	19,47	56	18,60
Редуктор	42	12,07	24	7,384	48	11,54	19	6,31
Отказ электрооборудования	65	18,68	56	17,23	61	14,66	32	10,63
Прочее	47	13,51	41	12,62	62	14,90	65	21,59
Всего	348	100	325	100	416	100	301	100

Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Талдинская-Западная 1» приведена на рисунке 1.6.

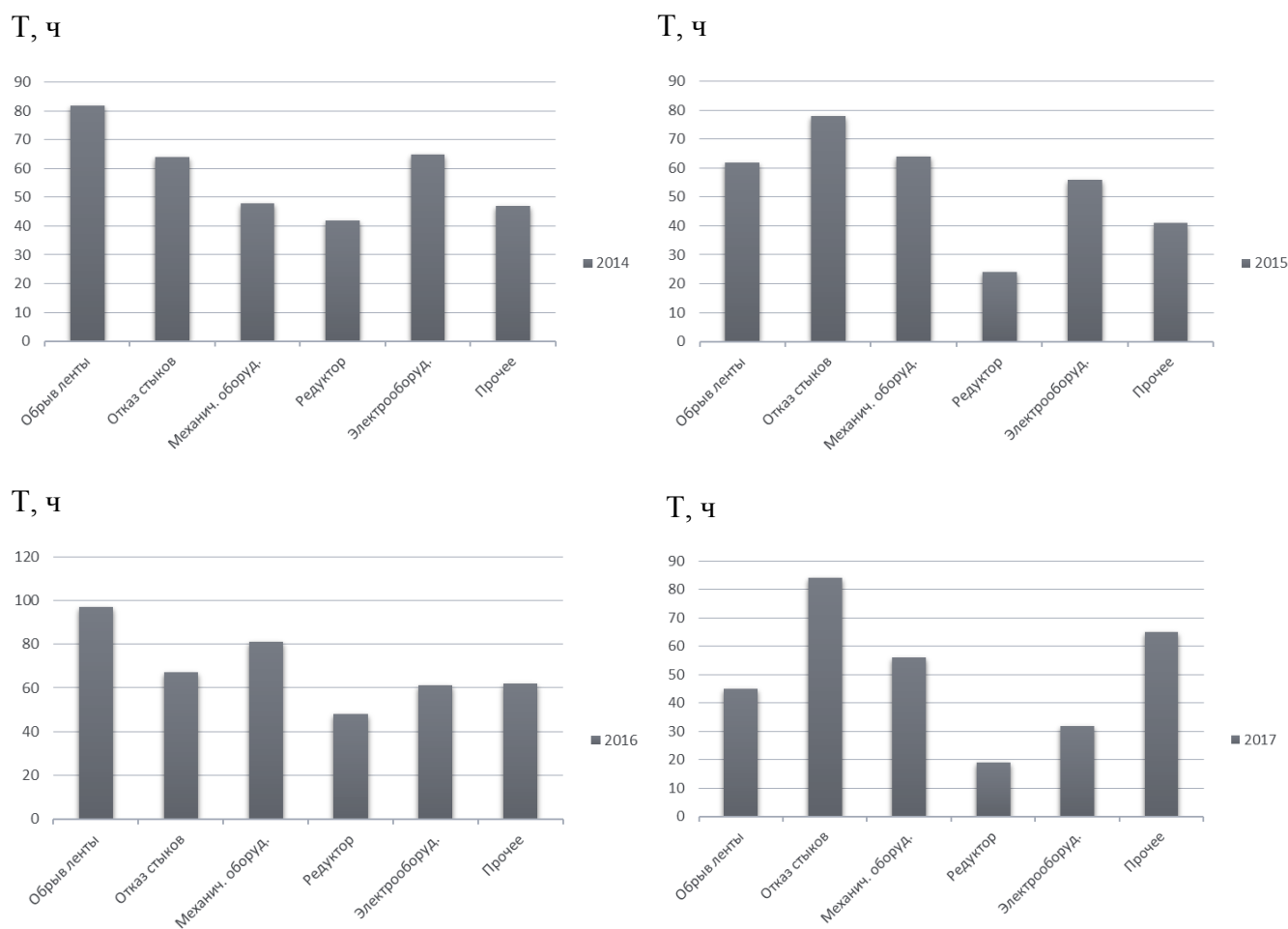


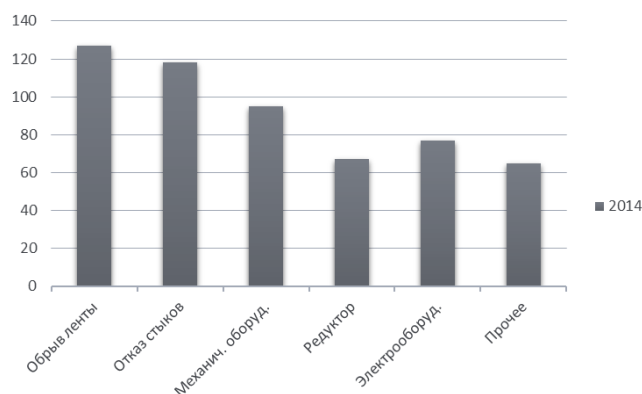
Рисунок 1.6. – Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Талдинская-Западная 1»

Таблица 1.5. – Простои конвейеров на шахте «Талдинская-Западная 2»

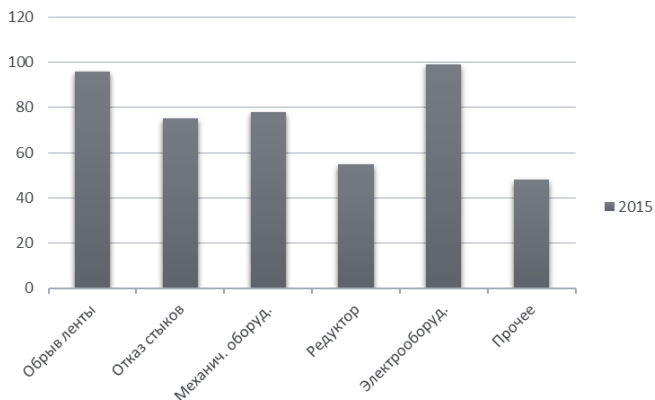
Причина простоя	Годы							
	2014		2015		2016		2017	
	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %
Обрыв ленты	127	23,13	96	21,29	127	34,23	68	29,31
Отказ стыков	118	21,49	75	16,63	81	21,83	74	31,90
Отказ механического оборудования (муфта, барабаны, натяжные устройства)	95	17,30	78	17,29	23	6,20	42	18,10
Редуктор	67	12,20	55	12,19	15	4,04	8	3,45
Отказ электрооборудования	77	14,03	99	21,95	59	15,90	23	9,91
Прочее	65	11,84	48	10,64	66	17,79	17	7,33
Всего	549	100	451	100	371	100	232	100

Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Талдинская-Западная 2» приведена на рисунке 1.7.

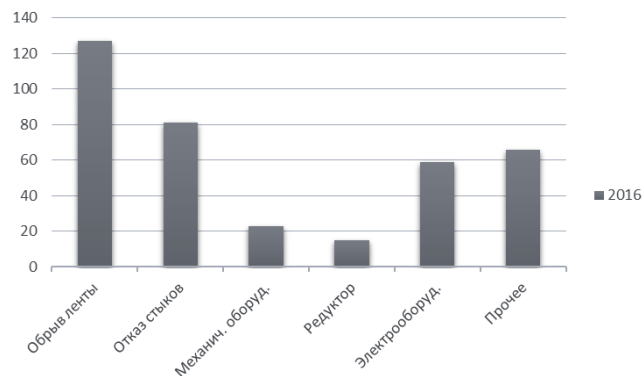
Т, ч



Т, ч



Т, ч



Т, ч

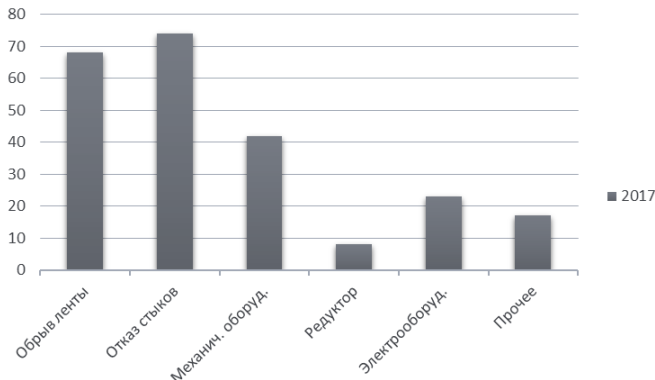


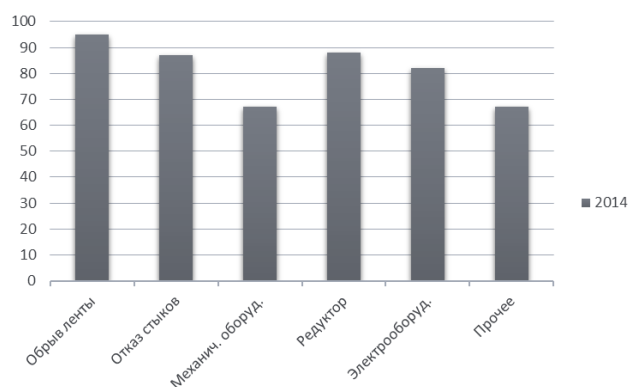
Рисунок 1.7. – Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Талдинская-Западная 2»

Таблица 1.6. – Простои конвейеров на ООО «Шахта Есаульская»

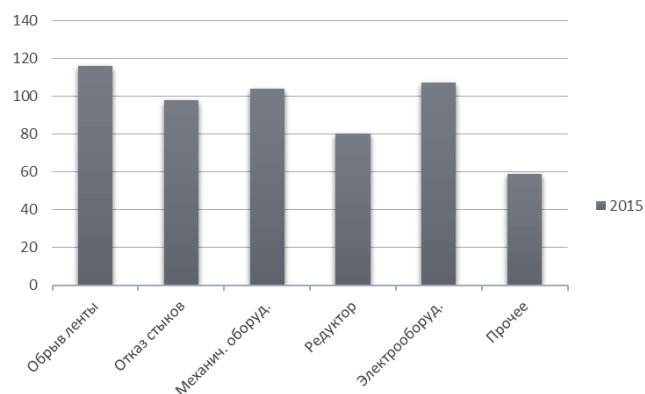
Причина простоя	Годы							
	2014		2015		2016		2017	
	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %	Время, ч	Доля, %
Обрыв ленты	95	19,55	116	20,57	134	22,83	122	32,02
Отказ стыков	87	17,90	98	17,37	95	16,18	59	15,49
Отказ механического оборудования	67	13,78	104	18,44	117	19,93	75	19,69
Редуктор	88	18,11	80	14,18	79	13,46	55	14,44
Отказ электрооборудования	82	16,87	107	18,97	88	14,99	41	10,76
Прочее	67	13,78	59	10,46	74	12,61	29	7,61
Всего	486	100	564	100	587	100	381	100

Гистограмма простоев конвейеров по шахте «Есаульская» приведена на рисунке 1.8.

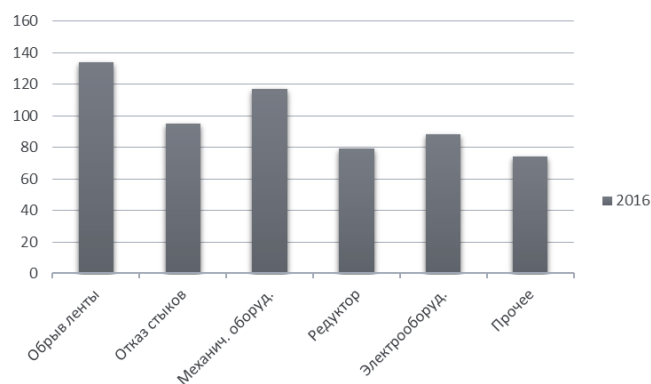
Т, ч



Т, ч



Т, ч



Т, ч

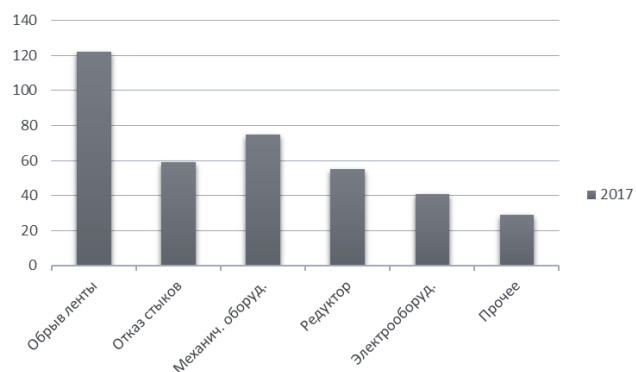


Рисунок 1.8. – Гистограмма простоев конвейеров по ООО «Шахта Есаульская»

Анализ простоев, вызванных отказом редуктора ленточного конвейера, выявил следующее, что число отказов может колебаться от 3,45% до 21,8% от обще-

го числа отказов конвейера, и составляет в среднем около 12%. Гистограмма усредненного по годам процента отказов для предприятий приведена на рисунке 1.9.

Необходимо отметить, что процент отказов стыков ленты действительно преобладает в общем числе отказов. При этом отказы происходят часто, а среднее время их устранения составляет 1,5 – 2 ч. Отказы, вызванные неисправностью редуктора, происходят редко, но при этом среднее время восстановления составляет 21,2 часа [24].

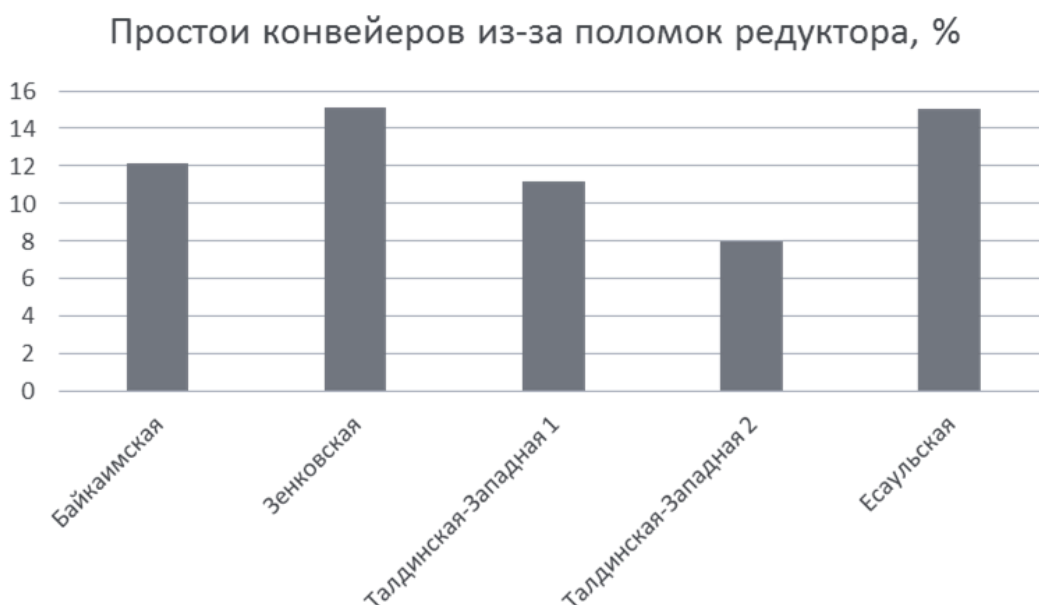


Рисунок 1.9. – Гистограмма усредненного по годам процента отказов
Данные по причинам отказов и усредненному времени восстановления представлены в таблице 1.7 и на рисунке 1.10.

Таблица 1.7 – Причина отказа редуктора и усредненное время восстановления, ч работоспособного состояния

Причина отказа	Байкаимская	Зенковская	Талдинская- Западная 1	Талдинская- Западная 2	Есаульская
Поломка вала	-	56	48	-	42
Поломка зубчатых передач	36	52	24	38	41
Нарушение центровки	16	12	8	6	14
Ослабление крепления	11	8	18	34	22
Перегрев	12	16	6	8	14
Износ подшипников	24	36	14	16	18

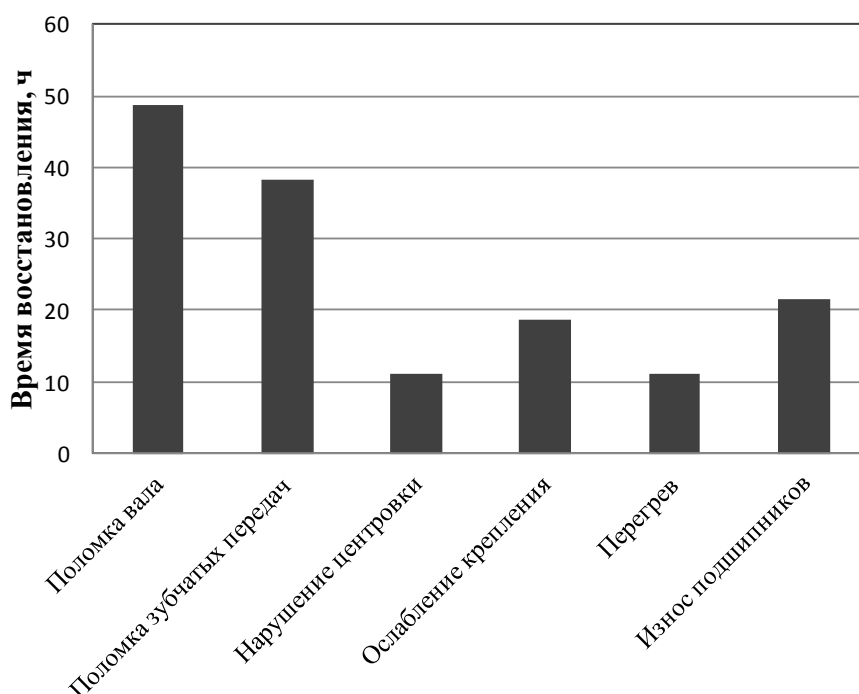


Рисунок 1.10 – Гистограмма времени восстановления работоспособного состояния после отказов редуктора

Таким образом, распознавание фактического технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров является весьма актуальной задачей.

Актуальность темы совершенствования технического обслуживания редукторов шахтных ленточных конвейеров подтверждается исследованиями российских и зарубежных авторов. Так в работах [25 – 28] показывается, что обнаружение повреждений в подшипниках и зубчатых передачах редукторов является одной из наиболее интенсивно изучаемых проблем в зарубежной литературе по мо-

мониторингу состояния оборудования. Для механических систем, используемых в горнодобывающей промышленности, проблема внезапного отказа может быть вызвана кратковременной локальной перегрузкой контактирующих поверхностей в зубчатых парах или подшипниках. Разрушение сальниковых уплотнений валов редуктора приводит к снижению уровня смазочного масла, к попаданию внутрь корпуса паров воды при остановке и остывании редуктора, что вызывает ускоренную деградацию масла. Также авторы показывают, что определенные условия работы подземного оборудования требуют адаптации существующих методов диагностики или даже разработки новых подходов к оценке технического состояния [27]. Работа горных машин осуществляется при переменном характере нагрузки, при этом часто возникает наложение помех от работающего оборудования на информативный сигнал вибрационного анализа, особенно в низкочастотной области. Наличие случайных импульсов вносит помехи в работу систем диагностики, и может быть связано с повреждениями других машин, либо не связано с ними вовсе.

Неисправное состояние и отказ горной машины должны рассматриваться как неизбежные в процессе эксплуатации, как результат деградации и износа. Мониторинг состояния позволяет определять сценарии развития процессов износа и деградации. Как правило, внезапная остановка конвейера по причине поломки зуба шестерни является результатом развития нескольких событий [29]. Основными являются нарушение геометрии пар трения (перекосы вала и шестерни) фрикционный износ, несоосность валов электродвигателя и редуктора (расцентровка), наличие дисбаланса. Фрикционный износ вызывается попаданием частиц пыли, воды и самого металла пар трения в результате неправильной работы систем вентиляции масляного картера и фильтрации масла [30]. Своевременная очистка смазочного масла (либо его полная замена) продлит срок службы подшипников и зубчатых передач. Устранение выявленных проблем дисбаланса и расцентровки приводит к снижению интенсивности изнашивания редуктора. В случае, если параметры вибрации характеризующие дефекты подшипника, будут обнаружены до его полного разрушения, затраты на ремонт будут на порядок ниже. Заменить подшипники проще и дешевле, чем наплавлять и протачивать валы

или менять зубчатое колесо по причине поломки зуба. Кроме того, при внезапном заклинивании редуктора возникнут динамические нагрузки на ленту, что может повлечь ее обрыв. Это может обернуться серьезной аварией.

Таким образом, прогнозирование процессов деградации редуктора ленточного конвейера, будет способствовать не только сокращению затрат на техническое обслуживание, но и позволит повысить безопасность работ при их эксплуатации [31].

1.3. Стратегия и системы ремонтного обслуживания горных машин

1.3.1. Системы ремонтного обслуживания горных машин

В соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [32] надежностью называется свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Показателями надежности, количественно характеризующими состояние горно-шахтного оборудования служат наработка на отказ, среднее время восстановления, ресурс и др. [32].

Угольные предприятия применяют различные системы технического обслуживания и ремонта, с целью обеспечения работоспособного состояния оборудования. При этом система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) представляет собой набор правил, норм и положений, взаимоувязанных между собой, которые определяют порядок выполнения профилактических и ремонтных работ для обеспечения показателей качества горных машин и механизмов, установленных в документации на это оборудование.

На горнодобывающих предприятиях Кузбасса реализуются следующие виды ремонтно-технического обслуживания оборудования:

- техническое обслуживание – профилактические виды работ, представляющие наблюдение за работой, очистку корпуса от пыли и грязи, смазку пар трения и т.п., выполняется обслуживающим персоналом;

- текущий ремонт – осуществляется как в плановом порядке, предусмотренном документацией, так и в неплановом, например, в результате отказов; выполняется персоналом электромеханической службы и предусматривает замену или восстановление отдельных деталей и простых узлов;

- капитальный ремонт – осуществляется как в плановом, так и аварийном порядке, в случае исчерпания ресурса основных узлов или сложных элементов, выполняется силами специализированных ремонтных подразделений или предприятий;

- модернизация машины – осуществляется для повышения эффективности горной машины, находящейся в эксплуатации, эффект может достигаться в результате повышения быстродействия электропривода, точности поддержания заданных режимов работы, снижения динамических нагрузок на механизмы в переходных режимах, и, в конечном итоге, увеличения производительности, межремонтных интервалов и срока службы машины.

Структурная схема обслуживания и ремонта горных машин представлена на рисунке 1.11. [33].

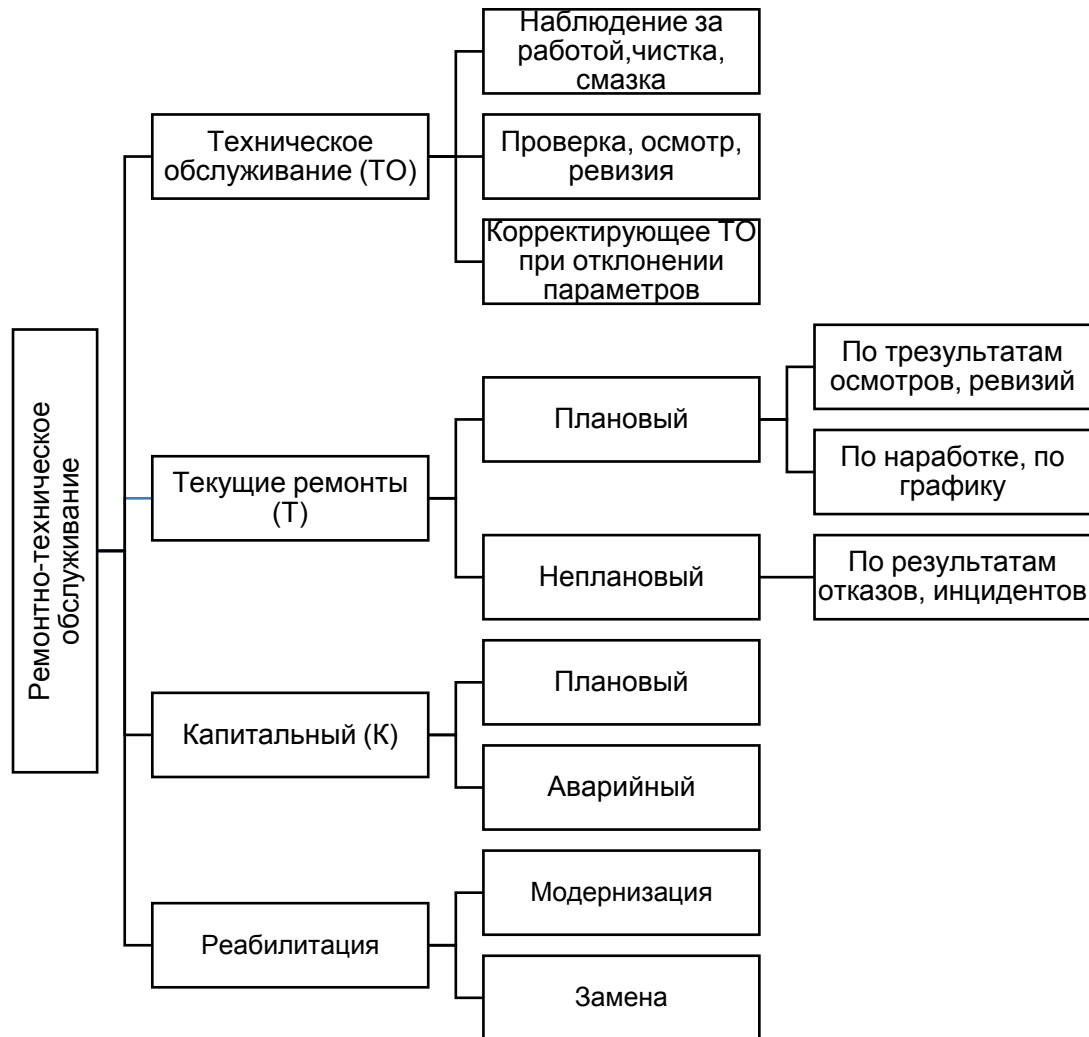


Рисунок 1.11. – Структурная схема обслуживания и ремонта горных машин

Обеспечение работоспособного состояния горнотранспортных машин на угольных предприятиях обеспечивается реализацией различных стратегий и организацией ремонтного производства. Преимущественное положение занимают системы периодических, послеосмотровых и планово-предупредительных ремонтов.

1.3.2. Стратегия проведения ремонта горно-шахтного оборудования

Современные горнодобывающие предприятия при проведении технического обслуживания и ремонтов оборудования подземного транспорта используют следующие стратегии:

1. До отказа – ремонт осуществляется после возникшего отказа;

2. По наработке – определенный вид обслуживания регламентируется наработкой (отработанными часами или календарному времени) с момента начала эксплуатации, так называемый планово-предупредительный ремонт (ППР);

3. По состоянию – вид обслуживания или ремонт по фактическому состоянию (РФС), выполняется по результатам оценки технического состояния методами диагностики;

4. Проактивное техническое обслуживание - заключается в выполнении упреждающего обслуживания, уменьшающего скорость протекания процессов износа, поддерживающее уровень эксплуатационной надежности на высоком уровне.

Стратегия до отказа одна из самых первых стратегий ремонта не требующая высокого уровня организации ремонта. Ремонт выполняется после полной потери работоспособности оборудования. Для осуществления данной стратегии необходимо поддерживать наличие запасных частей оборудования на материальных складах в больших объемах, что не является экономически выгодным. Другим существенным недостатком является возможность возникновения отказа в самый неподходящий момент. К достоинствам стратегии до отказа можно отнести полную выработку ресурса отказавшей детали. Стратегия до отказа, как правило, применяется для малоответственного оборудования, имеющего резерв, потеря работоспособности которого не представляет опасность для персонала, не может повлечь расстройство сложного технологического процесса и длительный простой всей технологической цепочки.

Стратегия по наработке или ППР основанная на статистических данных об отказах однотипного оборудования предполагает выполнение ремонтных работ по регламенту. К достоинствам данной стратегии можно отнести снижение аварийных (неплановых) простоев оборудования, обеспечение приемлемого уровня надежности. Однако при данной стратегии возможна замена еще исправных деталей, не выработавших свой ресурс, а также риск возникновения отказа до регламентированной наработки остается достаточно высоким. Кроме того, к недостаткам стратегии планово-предупредительных ремонтов можно отнести возрастание

вероятности отказов после некачественно проведенного ремонта в условиях шахты или механического цеха. Стратегия по наработке используется для оборудования, отказ которого представляет опасность для жизни и здоровья людей, а также для оборудования, проведение диагностики которого нецелесообразно.

Стратегия по состоянию или РФС основана на оценке текущего состояния горно-шахтного оборудования по результатам его технической диагностики. Применение данной стратегии направлено на снижение числа необоснованных ремонтных воздействий при максимальном использовании ресурса машины. К достоинствам стратегии ремонтов по фактическому состоянию можно отнести минимизацию как аварийных, так и плановых простоев, снижение затрат на техническое обслуживание. Для применения указанной стратегии необходимо использовать средства технического диагностирования и критерии оценки состояния оборудования по диагностическим признакам.

Стратегия проактивного ремонта, базируется на том, что различные эксплуатационные факторы, режимы и условия работы, вызывают развитие различных видов неисправностей, присутствующих в зачаточном состоянии с момента производства и монтажа горной машины. Задача состоит в определении вида ремонтного воздействия с целью уменьшения влияния совокупности факторов и скорости деградации оборудования. Признаком необходимости вмешательства является такое состояние элемента (детали), которое может повлечь ухудшение технического состояния соседних элементов или узла в целом.

Одним из объективных методов оценки технического состояния оборудования является техническое диагностирование. Диагностирование позволяет выявлять наличие дефектов, назначать сроки проведения ремонтов путем сравнения регламентированного значения параметра объекта с фактическим при помощи средств диагностики. Под параметром согласно ГОСТ Р ИСО 13372-2013 понимается переменная, представляющая собой некоторую значимую измеримую характеристику системы [34].

Контролируемый параметр – информационный элемент, совпадающий с каким-либо параметром или получаемый в результате преобразований параметров или формируемый по наблюдениям за системой.

Систематический мониторинг параметров позволяет строить тренды их изменения и оценивать фактическое состояние машины без вмешательства в технологический процесс. Прогнозирование, в свою очередь, заключается в анализе признаков неисправностей с целью оценки изменения состояния машины в будущие моменты времени и минимального периода ее безаварийной эксплуатации.

Указанное положение дел в ремонтных службах реализует разносторонние рекомендации по формированию структуры ремонтного цикла типового оборудования не только на разных предприятиях Кузбасса, но порою в пределах одной компании. Поэтому актуальной задачей совершенствования системы технического обслуживания и ремонтов горнотранспортного оборудования для шахт Кузбасса является оптимизация структуры ремонтного цикла, с применением технических средств диагностирования.

1.4. Основные итоги и выводы

1. Наиболее эффективным средством доставки извлеченного полезного ископаемого в подземных условиях является конвейерный транспорт. В пределах очистного забоя – скребковыми конвейерами, имеющими значительную жесткость, в пределах участковых и магистральных выработок – ленточными конвейерами, обладающими высокой и не зависящей от длины транспортирования производительностью. Производительность подземных конвейеров достигает 5000 т/ч.

2. Установлено, что наибольшее распространение в приводах подземных ленточных конвейеров получили коническо-цилиндрические трехступенчатые редукторы с установкой на жестком фундаменте или на реактивной тяге.

3. Доказано, что доля отказов редукторов составляет около 12% от всех отказов шахтных ленточных конвейеров. Среднее время восстановления работо-

способного состояния конвейера, требующего замены редуктора, составляет 21,2 часа.

4. Перспективным способом повышения эксплуатационной надежности и продления срока эксплуатации редукторов шахтных ленточных конвейеров является их обслуживание по фактическому техническому состоянию, с применением проактивного профилактического воздействия на основании данных мониторинга состояния.

5. Разнообразие горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации подземных конвейеров, резкопеременный характер нагрузки, наличие запыленной атмосферы и помех от работающего оборудования требуют адаптации существующих методов диагностики и разработки новых подходов к оценке их технического состояния.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

2.1. Обзор и анализ существующих методов технической диагностики горно-шахтного оборудования

Для оценки фактического технического состояния узлов и отдельных элементов ленточного конвейера следует проводить диагностику оборудования в условиях эксплуатации во всех доступных режимах, а после этого проводить анализ результатов. Для проведения обследования горных машин возможно применение методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики.

Согласно Федеральному закону о промышленной безопасности опасных производственных объектов (ФЗ №116) технические устройства, применяемые на опасном производственном объекте, в процессе эксплуатации подлежат экспертизе промышленной безопасности:

- по истечении срока службы или при превышении количества циклов нагрузки такого технического устройства, установленных его производителем;
- после проведения работ, связанных с изменением конструкции, заменой материала несущих элементов такого технического устройства, либо восстановительного ремонта после аварии или инцидента на опасном производственном объекте, в результате которых было повреждено такое техническое устройство [35].

Таким образом, шахтный ленточный конвейер относится к техническому устройству, применяемому на опасном производственном объекте.

Согласно методических указаний по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок экспертное обследование элементов ленточных конвейерных установок (ЛКУ) [36] состоит из:

- визуального и измерительного контроля;

- неразрушающего контроля;
- вибродиагностического обследования.

Таким образом, в нормативных документах [35, 36] регламентируются следующие методы неразрушающего контроля:

- дефектоскопические – магнитный контроль (МК), капиллярный контроль (ПВК), визуальный и измерительный контроль (ВИК), ультразвуковой контроль (УЗК);
- функциональные – вибродиагностический (ВД) и тепловой (ТК) контроль;
- контроль эксплуатационных материалов.

При этом диагностика должна выполняться средствами измерения, внесенными в Государственный реестр средств измерений, прошедших государственную поверку, обученным и аттестованным персоналом.

Исследования, проведенные с участием автора, позволили выделить наиболее эффективные методы оценки технического состояния горно-шахтного оборудования.

Визуальный и измерительный контроль. Метод визуального и измерительного контроля (ВИК) позволяет выявлять изменения в металлических конструкциях (став ленточного конвейера, рамы приводных, хвостовых и отклоняющих барабанов, рамы приводов и. т. д.), а также состояние стыков ленты, роликов. Распознаются поверхностные дефекты в материале и соединениях деталей; образование трещин, коррозионных повреждений, деформации, ослабления соединений, которые могут повлиять на безопасность эксплуатации ленточного конвейера [37]. К достоинствам визуального метода контроля можно отнести его простоту, дешевизна специальных приспособлений, достаточная эффективность при контроле металла и сварных швов.

Недостатками метода ВИК являются сложность выявления дефектов при малой освещенности, особенно это проявляется в подземных условиях, необходимость остановки оборудования, а также психофизиологическое состояние дефектоскописта. Визуальный контроль для редукторов горных машин применяется при выявлении утечек смазочного масла, и, как правило, выявляет неисправности

на достаточно поздней стадии развития, когда необходимо срочно принимать меры.

Тепловой метод контроля. Так или иначе, различные преобразования энергии связаны с выделением тепла. Процессы выделения или поглощения тепла объектом приводит к изменению его температуры относительно температуры окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта несет информацию, как о его внутренней структуре, так и о возможных скрытых дефектах [38, 39].

Тепловой метод контроля способен оценивать разнообразные технологические процессы. Измерение и последующий анализ температуры масла редуктора, охлаждающей жидкости (при жидкостном охлаждении), температурных градиентов на корпусе, позволяют оценить его техническое состояние. Мониторинг возможен как бесконтактными (тепловизор, пирометр), так и контактными способами (термометр, термокарандаш, термопара). Важным условием возможности применения теплового контроля является выделение в контролируемом объекте тепловых потоков [40].

Тепловой контроль может быть пассивным – если тепловыделения обеспечиваются внутренними явлениями и активным – если тепловые потоки возникают в результате внешней стимуляции [41].

Для проведения теплового контроля и инфракрасной диагностики используются: пирометры, термометры, тепловизоры, логгеры данных, измерители тепловых потоков и теплопроводности, термокарандаши, термокраска и термоэтикетки.

Важными преимуществами неразрушающего теплового контроля (ТК) являются:

- безопасность для оператора, так как работа ведется на расстоянии от объекта;
- высокая скорость получения и обработки данных;
- возможность выполнения больших объемов работ за малое время испытаний;
- возможность выполнения контроля при одно- и двустороннем доступе к объекту;

- хорошая совместимость с современными системами обработки данных;
- хорошая взаимная сочетаемость с другими методами неразрушающего контроля.

Активный метод малоприменим для контроля горно-шахтного оборудования и больше используется при неразрушающем контроле материалов. Приборы и аппаратура, применяемые при активном методе ТК:

- источник теплового возбуждения (галогенные лампы, инфракрасные излучатели, ультразвуковые генераторы, лазеры);
- контактный термометр;
- тепловизор;
- измеритель теплопроводности.

Приборы, используемые при пассивном методе ТК:

- пирометр;
- инфракрасный термометр;
- тепловизор;
- измерители тепловых потоков.

Для диагностики электрического и механического оборудования горных предприятий инфракрасная термография обладает рядом достоинств [42]:

- полнота полученных данных, точность информации по измерениям;
- отсутствие опасных этапов при проведении обследования оборудования;
- не требуется прерывание технологических процессов и отключения оборудования;
- отсутствие или минимальная подготовка рабочего места;
- большой объем производимых работ за небольшой промежуток времени;
- возможность точного обнаружения дефектов на ранней стадии образования.

Таким образом, применение пассивного метода теплового контроля в виде инфракрасной термографии возможно для оценки технического состояния приводов шахтных ленточных конвейеров.

Вибродиагностический метод контроля. Вибродиагностика (ВД) – метод неразрушающего контроля промышленного оборудования, основанный на измерении и анализе комплекса параметров вибрации. В настоящее время вибрационная диагностика машин и механизмов признается одним из самых удобных и информативных методов технической диагностики, позволяющим достоверно судить о текущем техническом состоянии оборудования и наличии в нем скрытых дефектов, в том числе и на ранних стадиях развития. Среди основных преимуществ вибродиагностики, для вращающегося оборудования:

- незначительное время проведения диагностирования;
- не требуется остановка технологического процесса;
- возможность определения дефектов и причин их вызывающих.

Вибрация вызывается действиями колебательных сил различной природы. В основе колебательных процессов лежит динамическое взаимодействие работающих элементов оборудования. С помощью анализа различных вариантов обработанного вибрационного сигнала можно получить информацию о развитых и зарождающихся дефектах. Таким образом, вибродиагностика оборудования позволяет использовать стратегии ремонта по фактическому состоянию или проактивного (упреждающего) ремонта, что в некоторых отраслях позволяет на 40–50% сократить затраты на обслуживание оборудования по сравнению с системой планово-предупредительных ремонтов [42].

Вибродиагностика оборудования позволяет выявить различные достаточно распространенные дефекты, такие, как дисбаланс, механическое ослабление крепления, непараллельность и изгибы валов, нарушение центровки в приводах, и многие дефекты подшипников.

Для быстрой оценки общего состояния оборудования проводится измерение и анализ следующих параметров вибрации:

- общего уровня среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости, пикового значения виброускорения, с их последующим сравнением с регламентированными значениями [43];

- уровня ударных импульсов, значительное увеличение которого говорит о нарушении смазывания подшипникового узла;
- спектра ударных импульсов, по которому определяют дефектную деталь – источник импульсов [44].

Согласно исследованиям Э. Л. Айрапетова и М. Д. Генкина [45] колебания в зубчатых передачах приводят к возрастанию уровня контактных и изгибных напряжений в зубьях колес, а также к усталостной поломке валов. При повышенной податливости ободьев зубчатых колес возможно возникновение в них изгибных колебаний, приводящих к усталостной поломке ободьев и выходу из строя всей передачи. Таким образом, для определения характерных параметров вибросигнала, соответствующих колебаниям зубчатых передач, требуется проведение более подробного и глубокого исследования.

Для более полного понимания процессов, происходящих в механизмах горных машин, используются методы спектрального анализа, при которых проводят [46]:

- анализ прямого спектра вибрации;
- изучение формы вибросигнала;
- анализ гармоник оборотной частоты;
- анализ спектра огибающей высокочастотной вибрации.

Проанализировать спектр вибрационного сигнала возможно, зная кинематику редуктора и типоразмеры установленных подшипников.

Помимо спектрального анализа, вибродиагностика оборудования позволяет выявить собственные частоты оборудования и фундаментов его крепления, для исключения режимов работы оборудования при попадании их в резонансные частоты.

Применение методов вибродиагностики наиболее полно соответствует поставленной задаче по определению состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров и будет являться основным методом диагностики.

Контроль эксплуатационных материалов. Анализ параметров смазочного масла в редукторах позволяет многое сказать об условиях эксплуатации, режимах

работы и в некоторых случаях установить наличие внутренних дефектов. Работающее масло позволяет не только диагностировать и прогнозировать изменение технического состояния объекта, но и выявлять причины снижения надежности и энергоэффективности [47].

Необходимо отметить, что к маслу, как и к другим деталям редуктора, применимы понятия надежности и работоспособности. Несоответствие характеристик смазочного материала стандартам может привести к выходу оборудования из строя. Преимущества диагностики механического оборудования по анализу смазочных материалов:

- простота по сравнению с другими методами диагностики;
- отсутствие разборки техники;
- возможность диагностики любого маслonaполненного оборудования (двигатели внутреннего сгорания, компрессоры, турбины, станки, редукторы, гидравлические системы и другое оборудование);
- анализ смазочных материалов помогает выявить внутренние дефекты техники на ранней стадии и устранить их с минимальными затратами.

Кроме этого, оценка состояния масла позволяет производить его замену по фактической потере работоспособности (деградации), а не по фиксированному значению наработки, что позволяет снизить расходы на техническое обслуживание. Возможность по результатам нескольких анализов отследить динамику состояния масла, спрогнозировать время нормальной работы масла и соответствующих деталей, например, подшипников и зубчатых передач позволяет выявить и устранить причины возможной аварии еще задолго до ее возникновения [48, 49].

Проанализировав возможности методов технической диагностики, автором было принято решение для оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров и последующей разработки методики диагностирования использовать в качестве основных методов вибродиагностику и анализ параметров смазочного масла, в качестве дополнительного метод инфракрасной термографии.

2.2. Анализ методов вибрационной диагностики регулируемых приводов

Изучение горных машин и инженерных сооружений, обладающих определенными физическими свойствами и набором нелинейных характеристик (зазоры в зубчатых парах трения, люфты в муфтах, упругости гибких тяговых органов и др.) требует разработки математических моделей для теоретического описания. Попытка охватить в модели все свойства реального объекта приведет к существенному усложнению математической модели, а иногда и к невозможности проведения расчета. Для теоретического расчета необходимо учитывать главные свойства реального объекта с некоторой долей упрощения.

Установлено, что в электроприводах с частотным управлением угловой скоростью приводного электродвигателя существенно изменяется частота возмущающей силы, изменяются также амплитуды колебаний отклика системы. Вибрационный анализ возникающих колебаний, основанный на понимании законов изменения параметров вибрации, позволяет диагностировать дефекты элементов привода, прогнозировать развитие повреждения и упреждать появления недопустимого состояния. Своевременное определение предельного состояния повышает эксплуатационную надежность привода конвейера и существенно снизит возможность аварийной остановки транспортной цепочки.

Любая механическая система обладает собственной частотой колебаний, при совпадении собственной частоты колебаний привода с возмущающей частотой или частотой отклика возможно возникновение резонанса. Возбуждение двух колебаний с разными частотами в нелинейной системе приводит к возникновению колебаний на кратных, разностных или суммарных частотах. При изменении возбуждающей частоты также будет изменяться общий уровень вибрации.

Для редукторов частотно-управляемого электропривода частота, возбуждающая колебания системы, изменяется в соответствии с нуждами технологического процесса. Таким образом, для определения технического состояния элементов редуктора требуется разработка новых критериев оценки при пониженных скоростях движения ленты.

Математическое описание вибрационного состояния машины является первым и самым важным этапом при проведении вибрационной диагностики. На следующем этапе необходимо выделить характерные диагностические признаки дефектов. Заключительным этапом является принятие решения об остановке машины и проведении ее технического обслуживания или ремонта [50].

Для извлечения полезной информации с помощью современных математических методов, данные вибрационных сигналов подлежат обработке. Основными видами вибросигналов являются: временной сигнал, общий уровень вибрации, спектр, спектр огибающей. Дополнительными сигналами являются: пик-фактор и эксцесс.

Рассмотрим особенности возникновения и обработки описанных сигналов.

Временной сигнал. Замеры вибрации начинаются с записи временного сигнала, который впоследствии подвергается всевозможным преобразованиям.

Вибрационный сигнал действующей машины представляет собой сложный сигнал, включающий как гармонические, так и случайные компоненты. Помимо полезной составляющей присутствует и шумовая компонента, осложняющая анализ (рисунок 2.1).

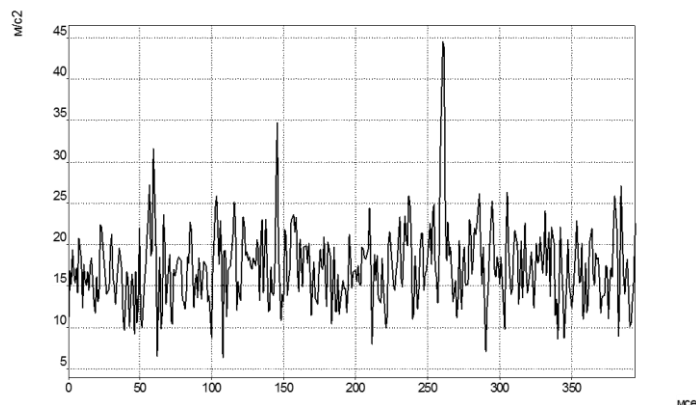


Рисунок 2.1 – Форма вибрационного сигнала реальной машины

Временной сигнал отображает картину в целом, поэтому определить техническое состояние машины исходя из данных только временного сигнала сложно. Временная форма сигнала может использоваться при выявлении резонансных явлений при совпадении частоты вращения ротора и собственной частоты конструкции привода.

Форма сигнала, представленная на временном интервале от 0 до T снимаемая вибропреобразователем, определяется как

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T S(\omega) e^{i\omega t} dt. \quad (2.1)$$

Спектр сигнала определяется как

$$S(\omega) = \int_0^T S(\omega) e^{-i\omega t} dt. \quad (2.2)$$

Модуль функции $|S(\omega)|$ характеризует распределение интенсивности гармонических колебаний сигнала $S(t)$ по частотам, а величина $|S(\omega)d\omega|$ представляет амплитуду синусоидального колебания с частотой ω содержащегося в вибросигнале $S(t)$ (рисунок 2.2).

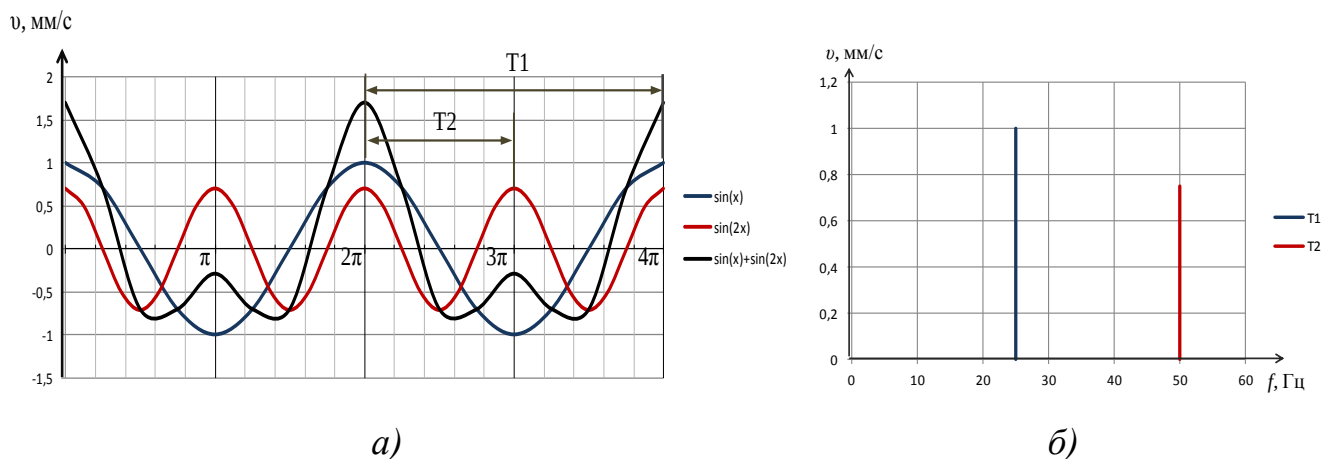


Рисунок 2.2 – Представление периодического сигнала:
а) – во временной области, б) – в частотной области

Общий уровень вибрации. Диагностика по общему уровню вибрации осуществляется, как правило, по среднему квадратическому значению (СКЗ) виброскорости с учетом сложения всех гармонических составляющих в диапазоне от 2 до 1000 Гц. Данный метод подходит для предаварийной диагностики горной машины и при систематическом контроле может считаться эффективным.

Спектр (от латинского spectrum – образ, видение) – представление распределенных по определенному параметру значений физической величины. В нашем случае таким параметром является частота.

Распознавание состояния горных машин по спектру вибросигнала позволяет диагностировать дефекты примерно с середины второго этапа их развития.

Спектральная (частотная) форма представления сложных полигармонических колебаний получается при разложении сигнала в комплексный ряд Фурье [51]. Сложный сигнал можно представить суммой гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте $\omega=2\pi f$:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_i \cos(i\omega t + \varphi_i), \quad (2.3)$$

где S_i – амплитуда виброперемещений i -й гармонического колебания;
 φ_i его начальная фаза, ($i=2, 3, 4 \dots$);

$$S_{a1} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}; \quad \varphi_i = \arctg\left(\frac{B_i}{A_i}\right), \quad (2.4)$$

где A_i, B_i – коэффициенты, определяемые для ряда Фурье по выражениям:

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(i\omega t) dt, \quad (2.5)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(i\omega t) dt. \quad (2.6)$$

Форма вибросигнала и соответствующий ей спектр представлены на рисунке 2.3.

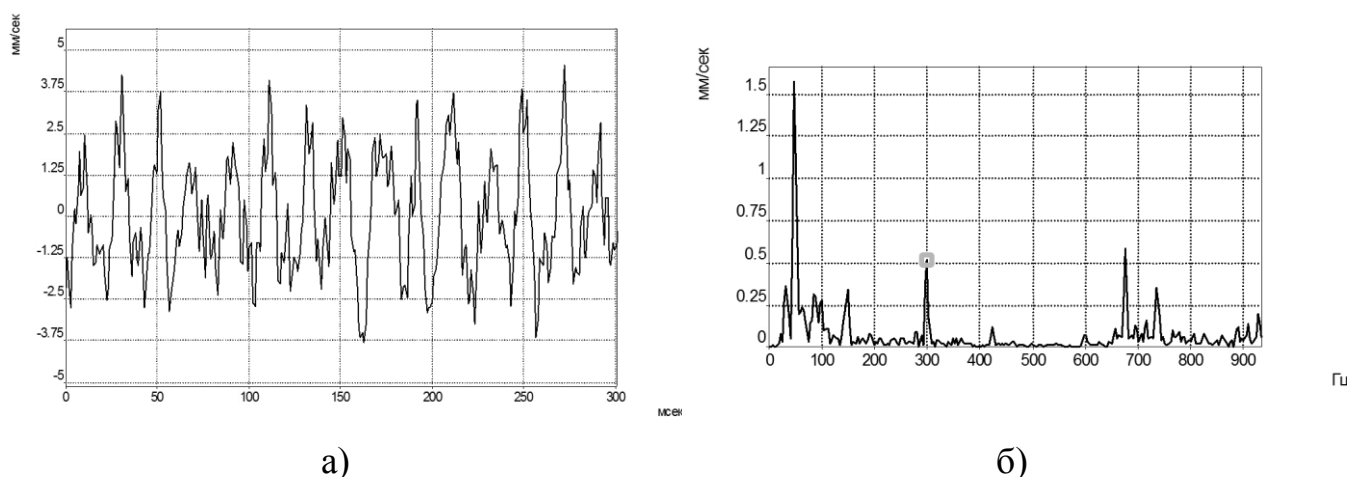


Рисунок 2.3. – а) форма сигнала и б) – соответствующий ей спектр вибросигнала

Анализ частотного спектра вибросигнала позволяет определять по характерным частотам дефектные элементы, например, подшипников и зубчатых пар редуктора [52]. Использование спектрального анализа позволяет построить зави-

симости во времени изменения технического состояния редукторов конвейеров, в том числе и при изменении частоты вращения приводного двигателя [53].

Спектр огибающей. Анализируя прямой спектр, можно заметить, что высокочастотная составляющая модулируется некоторым низкочастотным сигналом. Именно в этом сигнале, называемым огибающей вибросигнала, содержится информация о состоянии подшипников. Определять состояние подшипников качения редукторов по методу огибающей можно на довольно ранней стадии развития дефекта. При использовании методов оценки вибросигналов, описанных ранее, технический персонал обнаружит, например, высокий уровень вибрации, загрязнение масла продуктами износа и увеличение температуры подшипников, что соответствует последней стадии развития дефектов, практически предаварийное состояние. Применение диагностики по огибающей вибросигнала позволяет значительно продлить срок эксплуатации, за счет, например, применения масла с другими параметрами, заблаговременно подготовиться к ремонту оборудования и провести его в удобное время.

Получение спектра огибающей представлено на рисунке 2.4

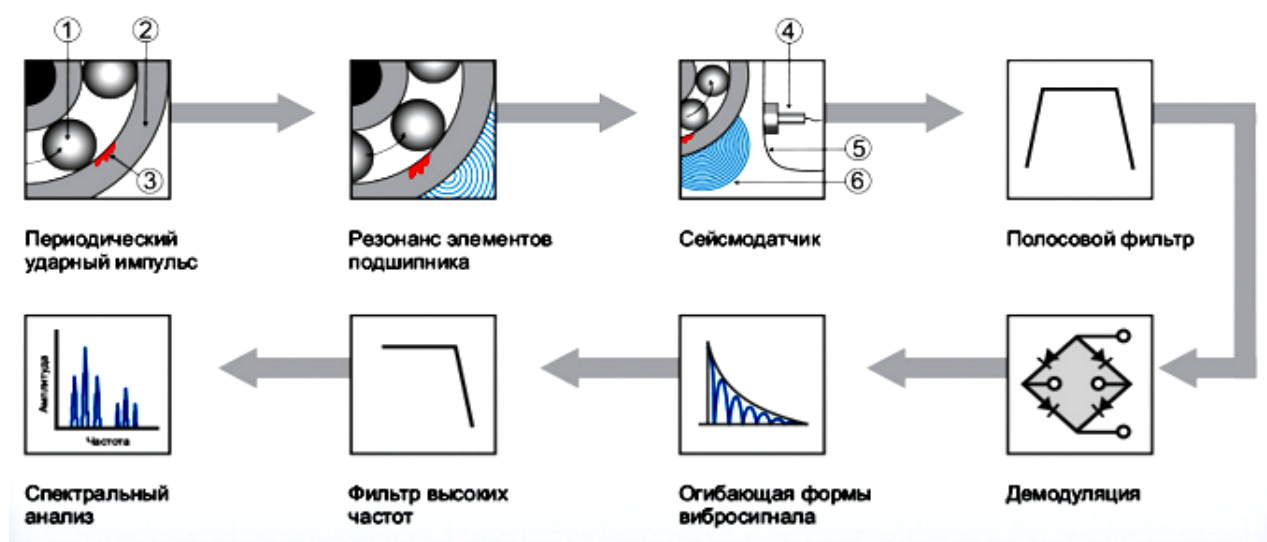


Рисунок 2.4. – Последовательность получения спектра огибающей:
1 – тело качения, 2 – наружное кольцо, 3 – дефект, 4 – датчик вибрации,
5 – корпус редуктора, 6 – сигнал от дефекта

Метод эксцесса. Эксцесс – мера соотношения ударных, непериодических составляющих в вибросигнале к стационарным, периодическим составляющим.

Используя постулаты статистической физики, полагаем, что мгновенное значения, например, виброскорости случайной вибрации задается ее плотностью вероятности $p(x)$ в соответствии с нормальным (Гауссовым) распределением – (см. рисунок 2.5).

Значения эксцесса используется для определения развития различных неисправностей элементов машин, так как отклонение от нормального распределения является однозначным признаком появления неисправности.

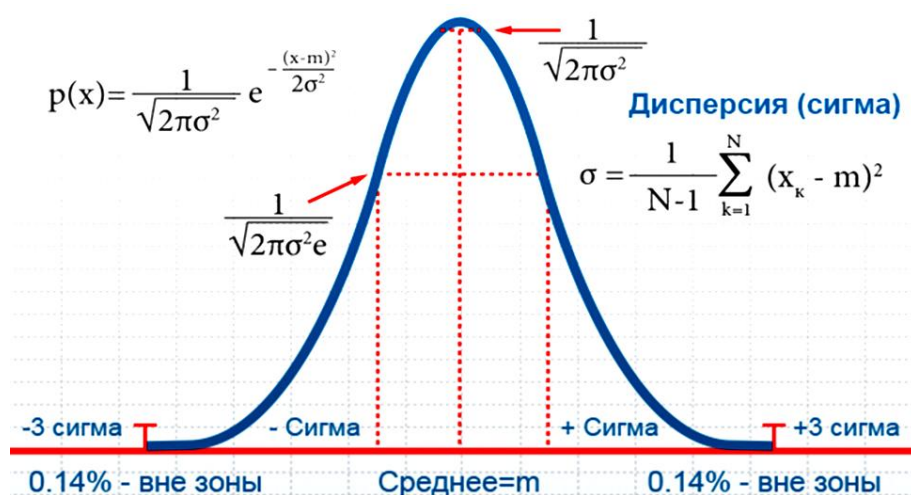


Рисунок 2.5. – Закон нормального распределения Гаусса

Эксцесс характеризует развивающиеся дефекты. Чем сильнее соударения тел качения о дефекты (сколы, трещины на кольцах), тем более островершинной становится кривая распределения вероятностей.

Достоинства диагностики по эксцессу: метод не зависит от скорости и нагрузки на валу; знание параметров подшипника не требуется; имеется возможность определения загрязнения смазки подшипника [54].

Недостатки: длительность получения информации; невозможно определить тип дефекта; метод неприменим на тихоходных машинах (при частоте вращения менее 300 об/мин), а также в редукторах и механизмах с ударными воздействиями [55].

В отношении редукторов частотно-регулируемых приводов шахтных ленточных конвейеров метод оценки технического состояния по эксцессу может

быть применен только для предварительной оценки состояния подшипников быстроходного вала.

Пик-фактор. Метод Пик-фактора заключается в том, что наличие зарождающихся дефектов в подшипнике приводит к появлению ударных импульсов на высокой частоте (возрастают высокочастотные пики амплитуды вибросигнала), а среднее квадратическое значение вибрации меняется незначительно.

Функции среднего квадратического значения (СКЗ) и пикового значения (ПИК) изменяются во времени плавно, а потому являются малоинформативными. Однако отношение пикового значения к среднему квадратическому, имеет четко выраженный максимум на оси времени, что и является основой метода (рисунок 2.6.) [56].

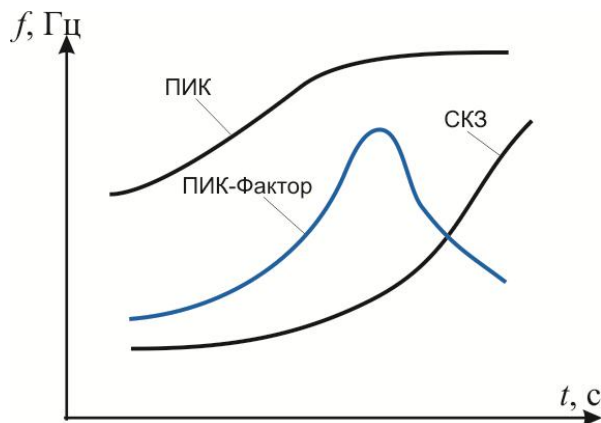


Рисунок 2.6 – Изменение по времени параметров вибросигнала

Достоинство – простота метода, для реализации достаточно самого простого виброметра общего уровня.

Сложные механические системы, являющиеся нелинейными, имеют резонансы и будут вызывать искажения, сам датчик устанавливается на корпусе машины, при этом возникает сложность в определении конкретного подшипника. Метод может использоваться при возможности близкого расположения датчика к подшипнику.

Недостатки: слабая помехозащищенность; неэффективность для механизмов со сложной кинематикой; требуется систематический и достаточно длительный мониторинг. Получить по одному замеру оценку состояния подшипника редуктора невозможно.

Для каждого ряда горно-шахтных машин необходимы экспериментальные исследования в рабочем и неисправном состояниях, по результатам которых должна создаваться методика определения технического состояния [57].

Подводя итог возможностям вибрационного анализа колебаний элементов частотно-регулируемого электропривода шахтных ленточных конвейеров, стоит отметить многообразие внешних возмущающих воздействий на передающий тракт виброакселерометра, и соответственно получаемый для обработки сигнал. Основные из возмущающих воздействий представлены на рисунке 2.7.

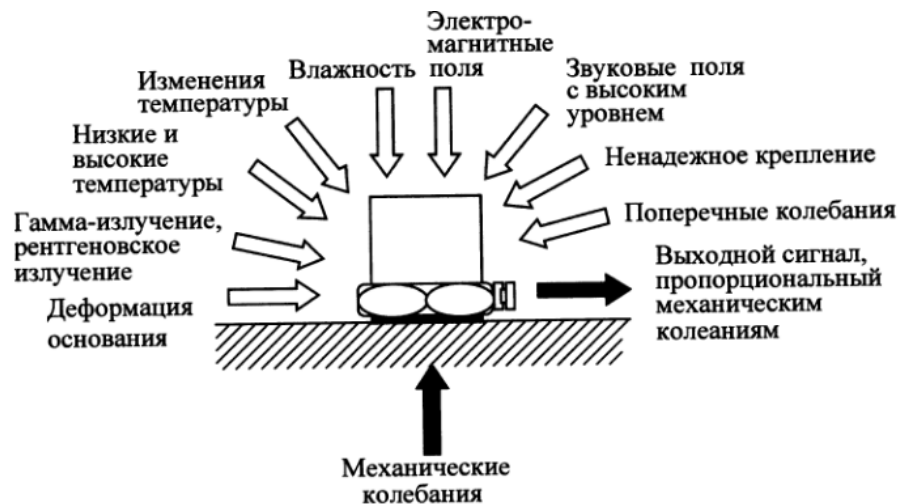


Рисунок 2.7. – Описание основных возмущающих факторов вибромониторинга

Приведенные на рисунке 2.7 возмущающие факторы (помехи) следует принимать в расчет при построении системы вибродиагностического мониторинга редукторов шахтных ленточных конвейеров.

2.3. Оценка методов теплового контроля электроприводов шахтных ленточных конвейеров

При изучении практических результатов эксплуатации шахтных ленточных конвейеров, в частности редукторов, установлено, что одним из способов определения их технического состояния является своевременная диагностика неразрушающими методами контроля в процессе эксплуатации [31]. Задачами диагности-

ки являются распознавание состояния эксплуатируемого агрегата и выявление причин, вызывающих неисправности, которые следует устранить в короткие сроки. Носителем информации о техническом состоянии элементов рабочего оборудования в тепловом методе контроля являются уровни температуры различных элементов [58].

Контроль температуры для механического оборудования используется очень давно, так как около 90÷95% всех форм энергии, генерируемой и передаваемой машинами, так или иначе, превращается в тепловую. Восприятие температуры органами чувств человека позволяет оценить уровень нагрева корпуса редуктора, электродвигателя и боксов подшипников по критериям: «холодно», «тепло», «горячо». «Холодно» – температура менее +20°C, «тепло» – температура +30...+40°C, «горячо» – температура свыше +50°C. Пределом для непосредственного восприятия является температура +60°C – так называемый критерий «рука не терпит», при котором необходимо было принимать меры.

В настоящее время органолептический контроль продолжает использоваться на горнодобывающих предприятиях, при невысоких скоростях лент, где возможен доступ обслуживающего персонала. Недостатки прямого органолептического контроля состоят в следующем: наличие человеческого фактора; невозможность контролировать температуру оборудования выше +60...+65°C. Некоторые современные редукторы ленточных конвейеров имеют допустимую температуру работы +110 °C.

Тепловой контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами.

С одной стороны, требования контроля температуры регламентируются нормативным документом [59] «Ленточные конвейеры должны быть оснащены устройством для плавного запуска. Гидромурфты на конвейерах следует эксплуатировать при исправной защите, осуществляемой температурными реле или специальными калиброванными плавкими предохранительными пробками».

С другой стороны, возрастающие скорости движения лент, вызванные необходимым повышением производительности, приводят к сокращению времени допустимого перегрева в случае заклинивания ролика вследствие поломки подшипников ролика, а также трения ленты о неподвижные элементы става конвейера. Поэтому для обеспечения безопасной работы угольного конвейера необходимо постоянно контролировать температуру роликов, ленточного полотна, других механизмов конвейера и температуру окружающего его воздуха.

Безопасность горных выработок оборудованных ленточными конвейерами, обеспечивается установкой входящих в состав многофункциональной системы безопасности (МФСБ) технических средств обнаружения ранних признаков эндогенных и экзогенных пожаров.

Применение автоматических средств обнаружения начальных стадий подземных пожаров, средств контроля нагрева узлов ленточных конвейеров на всем его протяжении, реализуемых МФСБ должно обеспечивать [59]:

- мониторинг и предупреждение условий возникновения опасности геодинамического, аэрологического и техногенного характера;
- оперативный контроль соответствия технологических процессов заданным параметрам.

Ранее установлено (в параграфе 2.1) что, тепловая стимуляция объекта исследования не требуется, и в данном случае возможно использование пассивного теплового контроля. Допускается применение, как контактных методов измерения температуры, так и бесконтактных. При измерении температуры неконтактными методами используют, как правило, характеристики инфракрасного излучения. Метод анализа тепловых полей посредством получения тепловых изображений получил название термография. Инфракрасная термография, согласно определению, исследует тепловое излучение объектов.

Согласно классификации методов неразрушающего контроля [60] выбираются методы, пригодные для оценки состояния элементов приводов подземных ленточных конвейеров:

1. по первичному информативному параметру:

- термометрический – метод неразрушающего контроля, основанный на контактной или дистанционной регистрации температуры контролируемого объекта;
- теплотметрический – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации теплового потока, либо величин его определяющих.

2. по способу получения первичной информации:

- метод термозависимых параметров, основанный на изменении температуры контролируемого объекта с помощью его термозависимых параметров (сопротивления, емкости и т.п.);
- метод собственного излучения, основанный на регистрации параметров собственного излучения контролируемого объекта [61].

При рассмотрении процессов тепловыделения в элементах редуктора выявлено: контактное взаимодействие твердых тел относительно друг друга в результате поступательного или вращательного движения вызывает повышение внутренней энергии поверхностных слоев пар трения. Под внутренней энергией понимается сумма кинетической и потенциальной энергии атомов и молекул вещества. Изменение температуры тела вызывается изменением энергии движения молекул. Распространение теплоты в поверхностном слое пары трения происходит в виде температурных волн. Чем дальше от поверхности трения, тем меньше амплитуда температурной волны. С увеличением скорости взаимного скольжения в паре трения уменьшается глубина распространения температурных волн. Увеличение силы прижатия и шероховатости трущихся поверхностей, наоборот вызывает ее увеличение [62].

Сложность расчета температурных полей контактирующих пар обуславливается теплоотдачей в окружающую среду с боковых стенок и трудностью определения граничных условий [63, 64].

Одним из эмпирических подходов к оценке средней температуры нагрева поверхностного слоя при трении T является соотношение [65]:

$$T = \frac{\delta \cdot f \cdot k_{\sigma} \cdot v}{I \left(\lambda + 2,6k \cdot \rho \frac{\sqrt{a \cdot v}}{\lambda_g} \right)}; \quad (2.7)$$

где δ – коэффициент распределения теплоты между трущимися телами;

f – коэффициент трения;

k_{σ} – давление контакта;

v – скорость относительного скольжения;

I – механический эквивалент теплоты;

λ – теплопроводность;

a – коэффициент теплоотдачи поверхности;

k – коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем;

ρ – плотность материала;

λ_g – длина волны неровностей на трущейся поверхности.

Причины выхода из строя подшипников качения согласно исследованиям [66, 67] приведены на рисунке 2.13 и связаны в большей степени с недостаточным смазыванием (более 40%) и неправильным монтажом.

Тепловыделение в подшипнике в основном связано с трением, возникающим между элементами подшипника и с выделением тепла, образующимся при перемешивании масла. Расчёт выделения тепла в подшипнике, требующий полного учета множества факторов представляет весьма сложную задачу [68].

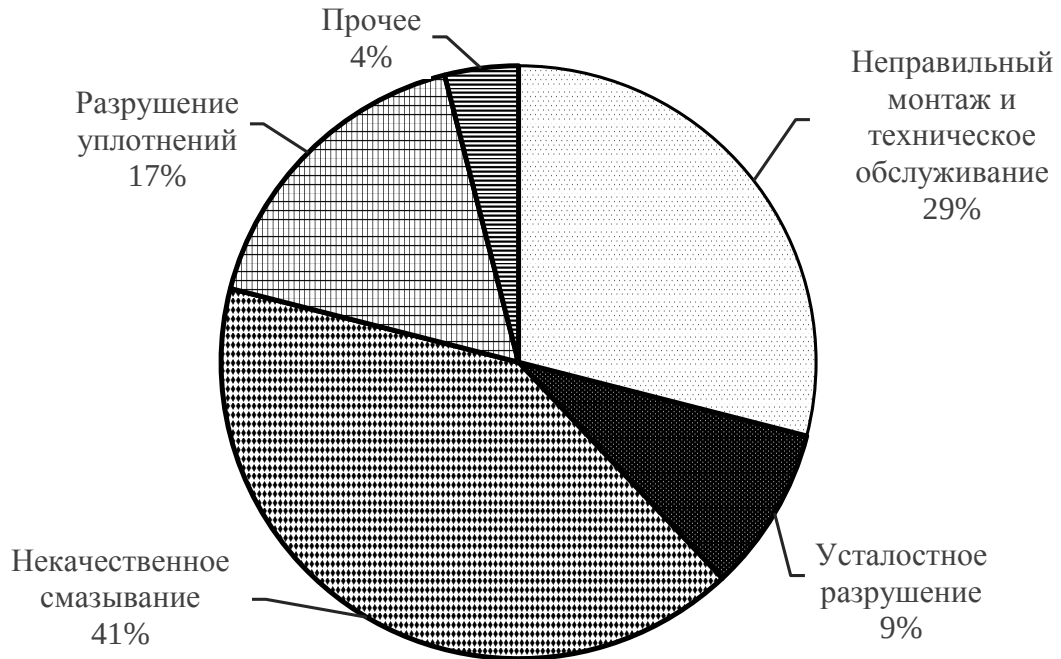


Рисунок 2.13. – Диаграмма причин отказов подшипников качения

Тепловая мощность (Вт), выделяемая при работе в подшипнике качения, при эмпирическом подходе определяется по методике, описанной в источниках [69 – 71]:

$$Q_{\text{тр.под}} = 1,047 \cdot 10^{-4} \cdot M \cdot n; \quad (2.8)$$

где $M = M_0 + M_1$ – общий момент сопротивления в подшипнике качения, Н·мм;

M_0 – момент сопротивления, вызываемый смазочным материалом, Н·мм;

M_1 – момент качения, зависящий от нагрузки на подшипник, Н·мм;

n – скорость вращения внутреннего кольца подшипника, с⁻¹.

Момент сопротивления, вызываемый смазочным материалом, определяется как (Н·мм):

$$\begin{aligned} \text{при } \nu \cdot n \geq 2000 \quad M_0 &= 10^{-7} \cdot f_0 \cdot (\nu \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_0^3, \\ \text{при } \nu \cdot n < 2000 \quad M_0 &= 160 \cdot 10^{-7} \cdot f_0 \cdot d_0^3 \end{aligned} \quad (2.9)$$

где ν – кинематическая вязкость смазочного материала, мм²/с;

$f_0 = 4 \div 6$ – коэффициент, учитывающий условия смазки и тип подшипника;

d_0 – средний диаметр подшипника, мм; $d_0 = \frac{D + d}{2}$;

D – наружный диаметр подшипника, мм;

d – внутренний диаметр подшипника, мм.

Момент качения определяется по формуле:

$$M_1 = \frac{P \cdot f_{np} \cdot d_0}{2}; \quad (2.10)$$

где $P = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}$ – результирующая нагрузка на подшипник, Н;

F_r, F_a – соответственно радиальная и осевая нагрузка на подшипник, Н

$f_{np} = 0,001 \div 0,004$ – приведенный коэффициент трения.

Некоторые недостатки эмпирического метода расчета состоят в сложности определения коэффициентов f_0, f_{np} [72, 73].

Петров Н. И. и Лаврентьев Ю. Л. в работе [74] показали хорошую сходимость результатов эксперимента с методикой расчета тепловой мощности, применяемой на фирме FAG (Германия) [75] для подшипников качения в диапазоне скоростей, не превышающих предельную тепловую скорость подшипника согласно ГОСТ 32305-2013. Скорости вращения быстроходного вала редукторов ленточных конвейеров, как правило, не превышают 1500 об/мин. Таким образом, методики расчета тепловой мощности [69, 75] могут быть использованы для расчета тепловыделений подшипников редуктора.

По предложенным методикам произведен расчет тепловой мощности выделяемой коническим роликоподшипником второго вала 32321А, доступном для контроля тепловизором, при его работе:

$$D = 225 \text{ мм}; d = 105, \text{ тогда } d_0 = \frac{225 + 105}{2} = 165 \text{ мм}; f_0 = 5$$

$$f_{np} = 0,0015, P = 198256 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$M_1 = \frac{198256 \cdot 0,0015 \cdot 165}{2} = 49068 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$v = 320 \text{ мм}^2/\text{с}; n = 15,13 \text{ с}^{-1} \text{ произведение } v \cdot n = 320 \cdot 15,13 = 4842 \geq 2000;$$

$$M_0 = 10^{-7} \cdot 5 \cdot (4842)^{\frac{2}{3}} \cdot 165^3 = 642 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$\text{общий момент сопротивления составит } M = 642 + 49068 = 49710 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$Q_{mp.нод} = 1,047 \cdot 10^{-4} \cdot 49710 \cdot 15,13 = 78,7 \text{ Вт}.$$

Разность между средней температурой подшипника и окружающей среды [75]

$$\Delta T = \frac{Q_{тр.под}}{k_q \cdot A_r} \text{ Н} \cdot \text{мм}; \quad (2.11)$$

где $k_q = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – коэффициент теплопередачи посадочной поверхности подшипника;

$A_r = \pi \cdot T \cdot (D + d) = 3,14 \cdot 81,5 \cdot (225 + 105) = 84450 \text{ мм}^2$ – площадь посадочной поверхности подшипника;

где $T = 81,5 \text{ мм}$ – действительная монтажная высота поверхности подшипника 32321А.

Тогда разность между температурой подшипника и окружающей средой составит

$$\Delta T = \frac{78,7}{0,32 \cdot 10^{-3} \cdot 84450} = 2,91 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Мощность трения зубчатой пары (Вт) можно определить по методике [76]

$$Q_{тр.зн} = \frac{\left(F_{OK} + \frac{2k}{d_k} f_k P \right) \cdot v}{1,02}; \quad (2.12)$$

где $F_{OK} = C_{OK} \cdot b \sqrt{v \cdot \mu}$ – сила трения на плече, равном радиусу начальной окружности колеса, Н (представляет постоянные потери);

$C_{OK} = (2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ – коэффициент, учитывающий условия смазки (при циркуляционной смазке);

b – ширина зубчатого колеса, мм;

v – окружная скорость колеса, м/с;

$\mu = (100 - 10)$ – вязкость масла, Па·с (при рабочей температуре от 25°C до 80°C);

$k = 1,02 \div 1,04$ – коэффициент трения качения;

$f_k = 0,07 \div 0,1$ – условный коэффициент трения [77];

d_k – диаметр зубчатого колеса, мм;

P – окружное усилие, Н.

Подставляя усредненные коэффициенты, для второй зубчатой пары:

$B = 86$ мм; $v = 20,4$ м/с; $\mu = 21,6$ Па·с; $d_k = 430$ мм; $P = 396512$ Н

$$F_{OK} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 86 \cdot \sqrt{20,4 \cdot 21,6} = 4,51 \text{ Н};$$

$$Q_{тр.зн} = \frac{\left(4,51 + \frac{2 \cdot 1,03}{430} 0,08 \cdot 396512 \right) \cdot 20,4}{1,02} = 3130 \text{ Вт}.$$

Суммарное тепловыделение от подшипников и зубчатых пар приводит к повышению температуры корпуса редуктора и нагреву смазочного масла.

Приближенную оценку температуры масла можно получить по формуле

$$T_m = \frac{P_{ном}(1 - \eta) \cdot 10^3}{k_{op} \cdot C \cdot A} + T_{окр} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.13)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность привода, кВт;

η – К.П.Д. редуктора;

k_{op} – коэффициент оребрения внешней поверхности редуктора;

$C = 15 - 35$ – коэффициент, учитывающий способ охлаждения редуктора; при принудительном независимом воздушном охлаждении $C = 25 - 30$;

A – площадь поверхности редуктора, м²;

$T_{окр}$ – температура окружающего воздуха, °С.

Для редукторов Moventas D3RST82XO: $P_{ном} = 500$ кВт; $\eta = 0,964$; $k_{op} = 1,92$; $A = 7,45$ м²; принимая $C = 27$, $T_{окр} = 14$ °С получим:

$$T_m = \frac{500(1 - 0,964) \cdot 10^3}{1,92 \cdot 27 \cdot 7,45} + 14 = 60,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Термограмма редуктора в установившемся режиме работы показывает максимальную температуру корпуса редуктора (при данной температуре воздуха) $T = 61,9$ °С (см. рисунок 2.14).



Рисунок 2.14. – Термограмма корпуса редуктора в установившемся режиме работы

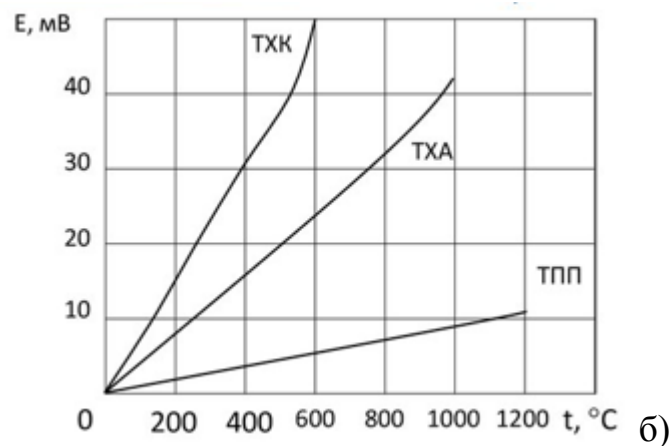
Температура смазочного масла может определяться контактными методами, с помощью установленного датчика температуры при непосредственном контакте масла с чувствительным элементом.

Измерение температуры термопарами. Этот метод характеризуется высокой точностью измерения ($\pm 0,01^\circ\text{C}$) и широким диапазоном (до 2000°C) (см. рисунок 2.14, а).

В качестве материалов для термопар, как правило, используются хромель (10% Cr+90%Ni); алюмель (95%Ni+5%Al); копель (56%Cu+44%Ni); платинородий (90%Pt+10%Rh). Характеристики термопар различных сочетаний сплавов представлены на рисунке 2.15, б) [78].



а)



б)

Рисунок 2.15. – Термопара взрывозащищенная а) – внешний вид;
б) – характеристики: TXK – хромель-копель; TXA – хромель-алюмель;
ТПП – платинородий-платина

Работа термопары основана на возникновении и изменении термо-ЭДС при изменении температуры спая разнородных металлов.

Использование термопар для контроля температуры смазочного масла редуктора рекомендуется для дистанционного вывода информации на компьютер горного диспетчера, как предупредительный сигнал в случае критического перегрева. Выявить причины перегрева не представляется возможным.

Измерение температуры термоиндикаторами. Рассматриваемый метод является одним из перспективных не только для регистрации, но и для измерения температуры.

Известно, что термоиндикаторы плавления содержат суспензию термочувствительных веществ и пигментов в синтетическом лаке. При плавлении термочувствительное вещество поглощается цветным пигментом, и индикатор резко меняет свой цвет. Точность невысока и составляет около 2°C .

Изменение состояния термоиндикатора на корпусе редуктора NORD представлено на рисунке 2.16 [79].

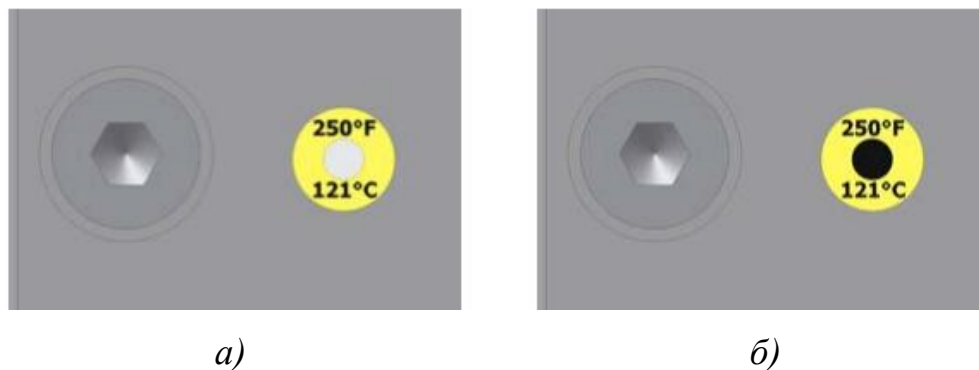


Рисунок 2.16. – Изменение цвета люминесцентного индикатора: а) – точка в центре белая, температура не превышает допустимую, б) – точка в центре черная, слишком высокая температура

Установлено, что применение индикаторов температуры, кроме оценки технического состояния редуктора, повышает безопасность обслуживающего персонала, предупреждая о высокой температуре, что особенно актуально во взрывоопасном производстве.

Известно, что бесконтактный метод контроля температуры, основанный на регистрации параметров собственного излучения корпуса редуктора, относят к

методу инфракрасной термографии. Достоинства этого метода приведены в разделе 2.1.

Плотность теплового потока от излучающего объекта с абсолютной температурой $T_{об}$ (К) к поверхности, средняя абсолютная температура которой равна T_c (температуре окружающей среды) определяется по формуле, основанной на законе Стефана – Больцмана [80]:

$$q_r = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{np} (T_{об}^4 - T_c^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (2.14)$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ($\sigma_0 = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$);

ε_{np} – коэффициент излучения (степень черноты).

Тепловой поток Q (Вт) представляет собой количество теплоты, передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность F (м).

Следовательно:

$$q = \frac{Q}{F}; Q = q \cdot F. \quad (2.15)$$

Редукторы ленточных конвейеров обдуваются потоком воздуха (газообразной средой), при этом теплообмен происходит как за счет излучения, так и за счет конвекции и результирующая плотность теплового потока:

$$q = q_{cv} + q_r = \alpha_{cv} (T_{об} - T_c) + \sigma_0 \cdot \varepsilon_{np} (T_{об}^4 - T_c^4), \text{ Вт/м}^2. \quad (2.16)$$

В тепловом контроле разница температур объекта и окружающей среды, как правило, мала, а коэффициент излучения ε_{np} близок к коэффициенту излучения абсолютно черного тела ($\varepsilon_{np} = \varepsilon \cong 1$). Принимая коэффициент комбинированного теплообмена объекта с окружающей средой α , $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ плотность теплового потока сводится к уравнению [42]:

$$q = \alpha (T_{об} - T_c), \text{ Вт/м}^2, \quad (2.17)$$

где значение α зависит в общем случае от размеров и геометрической формы объекта, а также от разницы температур объекта и среды $T_{об} - T_c$.

Практическое применение тепловизоров показывает, что выходной сигнал инфракрасного детектора зависит от многих параметров, некоторые из которых не

поддаются точному измерению и оцениваются в конкретном эксперименте с той или иной степенью точности [81].

Физические параметры, влияющие на инфракрасное изображение:

- температура объекта;
- температура внешних излучателей;
- коэффициенты излучения, отражения и пропускания;
- свойства передающей среды (атмосферы).

Термограммы редуктора и электродвигателя конвейера представлены на рисунке 2.17.

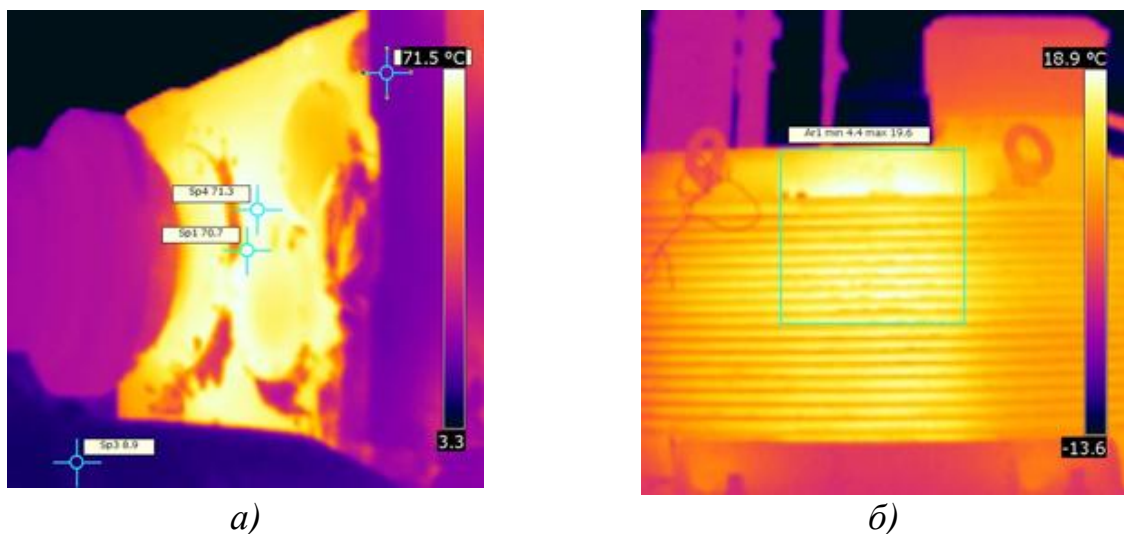


Рисунок 2.17. – Термограммы привода конвейера: а) – редуктор;
б) – электродвигатель

Тепловизор фиксирует так называемую радиационную температуру объекта, которая может быть как выше истинной (вследствие отражения излучения посторонних излучателей), так и ниже ее (при визировании теплых серых тел в отсутствие паразитных излучателей). Установлено, что инфракрасная термография наиболее эффективна:

- для объектов с высоким коэффициентом излучения ($\varepsilon \geq 0,8$);
- при отсутствии высокотемпературных посторонних объектов;
- на небольших расстояниях до объекта контроля.

Указанные условия вполне реализуются в подземных горных условиях для инфракрасного теплового контроля поверхности корпусов редуктора, электродвигателя и подшипников приводного барабана.

2.4. Исследование методов анализа смазочных материалов редукторов шахтных ленточных конвейеров

Из практики применения смазочных масел, обладающих высокими антифрикционными свойствами известно, что они не позволяют полностью исключить износ и усталостное выкрашивание в узлах трения редуктора. Продукты износа пар трения накапливаются в смазочном масле и могут характеризовать степень износа. Оценка технического состояния узлов трения методом трибодиагностики для каждого конкретного агрегата возможна на основании нормативов нормальных, повышенных и предельно допустимых значений диагностических параметров продуктов износа в масле.

Помимо механических примесей важнейшим показателем состояния масла является его вязкость. Система измерения вязкости по ISO (International Standards Organisation) для промышленного оборудования получила всеобщее распространение как средство классификации смазок. Изменение вязкости, неважно увеличение или уменьшение, может отражать химические и физические изменения в масле, которые могут стать причиной неисправности оборудования [82] или снижать энергоэффективность производства.

Учитывая сложные условия эксплуатации редукторов горного оборудования (наличие пыли, высокая влажность, переменный характер нагрузки) производители применяют масла с присадками, улучшающими противозадирные, противоизносные, противопенные, антикоррозионные и деэмульгирующие свойства.

Рассмотрим влияние других важных нормируемых показателей промышленных масел, применяемых в редукторах шахтных ленточных конвейеров.

Температура вспышки, при которой происходит воспламенение паров масла при поднесении открытого пламени, характеризует наличие в масле низкокипящих фракций. Определяется в приборах открытого или закрытого тигля.

Антиокислительная стабильность – характеризует стойкость масла к окислению его кислородом воздуха. Низкая антиокислительная стабильность масла приводит к ускоренному его окислению с образованием органических кислот,

смола и асфальтенов. Продукты окисления выпадают в осадок и могут нарушить циркуляцию масла в системе, а некоторые вызывают коррозию деталей горных машин [83].

Смазывающие свойства индустриального масла оцениваются противозадирными и антифрикционными свойствами. Наличие противозадирных присадок способно уменьшать трение и износ, путем создания на поверхностях трения защитных пленок.

Антипенные свойства оцениваются по способности масла препятствовать образованию пены, которая вызывает усиленное окисление масла и снижает его охлаждающие и антифрикционные способности. Современные масла легируются антипенными присадками, разрушающимися со временем.

Деэмульгирующие свойства характеризуют способность масла осуществлять быстрый отстой воды. Масла, имеющие низкие деэмульгирующие свойства, при попадании воды образуют стойкие водомасляные эмульсии. Это приводит к снижению вязкости масла, ухудшению смазывания пар трения и коррозии металлических поверхностей. Наличие воды в смазочном масле, таким образом, тоже является критерием его технического состояния.

Контроль параметров смазочного масла в редукторах шахтных ленточных конвейеров позволит повысить их эксплуатационную надежность и продлить срок службы.

Методы оценки кинематической вязкости.

Кинематическая вязкость характеризует сопротивление потоку под действием силы тяжести. Единица измерения – сантиметр квадратный в секунду, $[cm^2/s]$, также известная как Стокс (Ст) и обозначается греческой буквой ν (ню), в СИ $1\text{Ст} = 10^{-4} m^2/s$. Более распространенное обозначение – сантистокс, это миллиметр в квадрате в секунду (mm^2/s). Измерения проводятся при температурах $40^\circ C$ и $90^\circ C$. Кинематическая вязкость может быть определена через условную вязкость (ВУ), определяемую вискозиметром в условных градусах Энглера [84].

Условную вязкость испытуемого нефтепродукта при температуре $t^\circ C$ в условных градусах Энглера (ВУ) рассчитывают по формуле:

$$BY_t = \frac{\tau_t}{\tau_t^{H_2O}}, \quad (2.18)$$

где τ_t – время истечения испытуемого образца в объеме 200 см³ из вискозиметра при заданной температуре, с;

$\tau_t^{H_2O}$ – водное число вискозиметра, с.

При анализе кинематической вязкости чистых смазочных масел FUCS CLP320 и Gazpromneft CLP320 были выявлены незначительные отличия (см. рисунок 2.18).

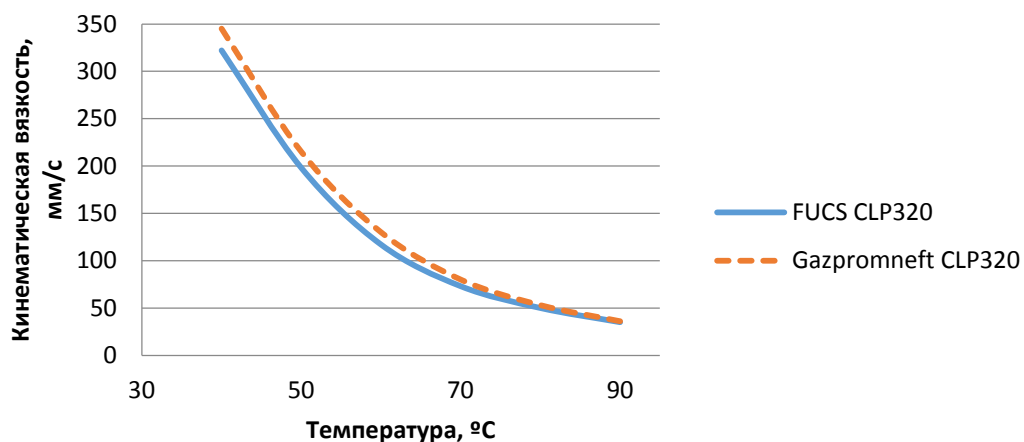


Рисунок 2.18. – Кинематическая вязкость чистого масла, используемого в редукторах конвейеров в зависимости от температуры

Возрастание вязкости масла может происходить от ряда причин, таких как полимеризация, окисление, испарение низкокипящих фракций и образование оксидов. Механические примеси, такие как угольная и породная пыль или продукты износа, наличие воды могут также быть причиной роста вязкости масла.

Полимеризация, то есть соединение между собой различных органических компонентов, составляющих базовое масло и некоторые присадки, происходит, если масло долгое время находится под воздействием высоких температур. Результатом химических реакций под действием высоких температур становятся высокомолекулярные тяжелые компоненты, увеличивающие вязкость и точку кипения масла.

Другой процесс, также являющийся следствием воздействия высокой рабочей температуры это окисление. При этом компоненты базового масла вступают в реакцию с кислородом воздуха. Окисление также может привести к полимеризации и образованию органических кислот, способных вызывать коррозию металлов. Воздух может находиться в масле в растворённом и свободном виде. При вращении шестерен редуктора воздух засасывается в масло и образует пену. Пена, или вернее газовая эмульсия, не в полной мере выполняет смазывающие и охлаждающие функции, для борьбы с пенообразованием используют специальные присадки [85]. Помимо этого, хорошо перемешанный с маслом воздух усиливает реакцию окисления, что опять же приводит к загущению масла.

Загрязнения водой также играют роль в росте вязкости. Вода, как правило, имеет более низкую вязкость, чем масло, но при работе редуктора масло и вода перемешиваются и могут формироваться стойкие эмульсии. Иногда, при возникновении реакции компонентов масла и воды образуются сгустки, наподобие пластичных смазок. Причины попадания воды в редукторы ленточных конвейеров связаны, чаще всего, с нарушением работы вентиляции картера редуктора. При работе редуктор нагревается и создается избыточное давление, при остывании происходит подсасывание рудничной атмосферы, насыщенной влагой. Иногда достаточно восстановить нормальную работу вентиляции редуктора и излишки воды испаряются. При образовании стойких эмульсий, остается один выход – полная замена масла.

Температура вспышки.

Опытным путем установлено, что компоненты базового масла имеют различные точки кипения и при длительном воздействии высокой температуры (даже не превышающей допустимую), часть низкокипящих фракций будет испаряться. Испаряющиеся компоненты имеют более низкую вязкость, таким образом, результирующая вязкость масла растёт. Испарение низкокипящих фракций происходит без присутствия кислорода, но также является результатом термической дегградации масла.

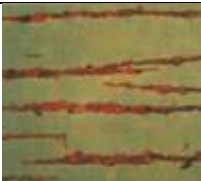
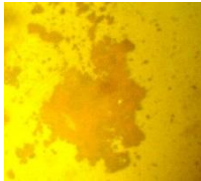
Определение температуры вспышки масла в открытом тигле (например, на приборе ТВО по методике [86]) позволяют оценить термическую деградацию и полимеризацию масла.

Анализ продуктов изнашивания.

Исследования показали, что абразивное изнашивание вызывается процессами микрорезания рабочих поверхностей твердыми частицами пыли (горных пород) или другими продуктами износа. На микрофотографии частицы абразивного износа имеют вид микростружки, а на поверхностях трения имеются царапины, ориентированные в направлении скольжения [87-89].

Характеристика видов изнашивания представлена в таблице 2.1 [87, 88].

Таблица 2.1. – Вид и характеристика частиц изнашивания элементов редуктора конвейера

Вид изнашивания (терминология на английском языке)	Характеристика частиц изнашивания	Форма и размеры частиц [87]
Окислительное (Oxidative wear)	Гладкие пластины размеры частиц 0,5...15 мкм, толщина частиц 0,15...1 мкм.	
Абразивное (Abrasive wear)	Частицы абразивного изнашивания стержневой или игольчатой формы длиной от 5 мкм и толщиной от 0,25 мкм.	
Адгезионное (Adhesive wear)	Сферические или чешуйчатые частицы, размеры до 20 – 50 мкм	
Усталостное (Fatigue wear)	Плоские хлопьевидные пластины с гладкой поверхностью и хаотичная, беспорядочная форма периферии. Размеры частиц 10...100 мкм и более	
Фреттинг-коррозия (Fretting corrosion wear)	Мелкодисперсные частички окислов железа Fe ₂ O ₃ от светло-коричневого до светло-красного цвета	

Фреттинг-коррозия возбуждается микроперемещениями поверхностей в пределах 0,02 мкм, при которых смазка выдавливается из области контакта. В результате фреттинг-коррозии отделяются микроскопические частицы окислов железа красно-коричневого цвета. Данный вид изнашивания происходит при колебательном процессе нагружения в ряде подвижных соединений, например, зубчатое колесо – вал.

Методы спектрального анализа.

Следует отметить, что эмиссионный спектральный анализ позволяет определить состав вещества по оптическим спектрам излучения атомов и ионов анализируемой пробы.

При проведении экспериментальных исследований использовался оптико-эмиссионный спектрометр МФС-11. Многоканальный спектрометр МФС-11 имеет оптимальную компоновку оптической системы, выполненной по схеме Пашена-Рунге с кругом Роуленда, имеющую 10 многоэлементных линейных детекторов с отдельными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), в которых используются линейные CCD детекторы. Детекторы CCD (Charge-Coupled Device) представляют собой светочувствительные элементы из множества фотодатчиков, которые позволяют регистрировать весь спектр целиком. Информация с CCD фотодатчиков считывается блоком обработки информации и поступает на вычислительное устройство (ВУ) [90].

Выявленные продукты износа и механические примеси в пробе масла позволили определить качественное состояние масла, и, тем самым, установить текущее техническое состояние редуктора.

2.5. Основные итоги и выводы

1. В результате анализа методов технической диагностики горных машин применительно к редукторам шахтных ленточных конвейеров можно сделать вывод, что единого универсального метода, однозначно определяющего все дефекты в ран-

ний период износа, не существует. Наиболее информативными являются вибродиагностика, тепловой контроль смазочного масла методом термопар и инфракрасной термографии подшипниковых узлов и устройств охлаждения, анализ параметров смазочного масла по вязкости, температуре вспышки и спектральному анализу продуктов износа.

2. Метод анализа вибрационного сигнала по спектрам колебательного процесса позволяет по характерным частотам выявлять дефектные элементы, например, подшипников, зубчатых передач, а также дефекты монтажа (расцентровку и дисбаланс). Возбуждающая частота колебаний соответствует гармоникам оборотной частоты вала электродвигателя, которая в управляемом электроприводе изменяется в соответствии с нуждами технологического процесса. При снижении частоты вращения приводного электродвигателя снижаются параметры общего уровня вибрации и область применения стандартных критериев. Это вызывает необходимость разработки новых критериев оценки технического состояния элементов редуктора, при работе на пониженных скоростях.

3. Анализ параметров смазочного масла позволит дополнить картину вибрационной диагностики. Наличие в пробе продуктов износа, характерных для материалов сепараторов подшипников, например, конкретизирует дефектный узел с учетом параметров вибрации.

4. В качестве дополнительного метода диагностики, позволяющего построить прогнозную модель деградации редукторов шахтных ленточных конвейеров необходимо использовать бесконтактный метод инфракрасной термографии.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

3.1. Анализ методов повышения надежности и прогнозирования технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров

Необходимость увеличения производительности с сохранением достаточного уровня безотказности шахтных ленточных конвейеров требует совершенствования процессов контроля их технического состояния. Вопросы повышения надежности горнотранспортного оборудования являются востребованными горнодобывающими компаниями.

При исследовании надежностных свойств оборудования и сложных технических систем можно выделить следующие виды надежности [91]:

- аппаратная надежность (характеризуется состоянием аппаратов и машин);
- функциональная надежность (обусловлена выполнением возлагаемых на систему функций);
- программную надежность (характеризуется точностью выполнения алгоритмов);
- эксплуатационная надежность (обусловлена качеством технического обслуживания и ремонта);
- надежность системы «человек-машина» (обусловлена компетенциями человека-оператора).

На стадии эксплуатации технических устройств повысить их надежность достаточно сложно. Задача эксплуатационников сохранять надежность техники как можно дольше, используя рациональные методы технического обслуживания, основанные на данных оценки фактического технического состояния, наработки и систематически повышая при этом компетенции технического персонала.

Прогноз деградации технического состояния горнотранспортных машин целесообразно осуществлять, используя вероятностный подход. При этом эффек-

тивность прогноза зависит от того, насколько хорошо известны и описаны моделью виды неисправностей и отказов для машин данного вида, как они зависят от срока службы и конструктивного исполнения конкретной машины. Отдельно следует учитывать скорость изменения контролируемых характерных параметров во времени.

Практика показывает, что одних результатов наблюдения характерных параметров для осуществления достоверного прогноза недостаточно. Для корректного прогнозирования необходимо реализовать следующий алгоритм [92]:

- определить предельное состояние объекта (момент вывода в ремонт);
- провести наблюдение изменения характерных параметров;
- выполнить оценку текущего технического состояния;
- проанализировать темпы развития неисправности;
- выявить тренд изменения характерного параметра;
- провести оценку остаточного ресурса объекта (времени до наступления отказа);
- внести коррективы в прогнозную модель при изменении скорости изменения контролируемых параметров.

Диагностирование и прогнозирование целесообразно свести в единую структурную схему, позволяющую корректировать темп развития будущих отказов, применяя методы мониторинга и профилактического технического обслуживания горной машины

На рисунке 3.1. представлена комбинированная структурная схема с блоками диагностирования и прогнозирования.



Рисунок 3.1. – Комбинированная структурная схема с блоками диагностирования и прогнозирования

Процесс прогнозирования включает следующие модели:

- построение причинно-следственных связей развития неисправностей и отказов;
- аналитические модели видов отказов и их последствий;
- модели развития неисправностей на основе построения трендов;
- модели всесторонней оценки рисков остановки технологического процесса с учетом внезапных отказов и плановых вмешательств.

Остановка хотя бы одного звена транспортной цепочки конвейеров для подземных горных предприятий, ведущих отработку длинными забоями, приводит к остановке всего технологического процесса. С целью исключения внезапных остановок необходимо оценивать как текущее техническое состояние, так и развитие вероятных неисправностей.

Оценка развития неисправностей базируется на моделях прогнозирования остаточного ресурса, представленных на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2. – Классификация моделей прогнозирования остаточного ресурса оборудования

Поскольку редуктор шахтного ленточного конвейера является сложной технической системой, для которой нецелесообразно получать аналитические модели, автором предложено использовать статистические модели.

Статистические модели. Статистические модели основаны на сборе информации о поведении множества однотипных элементов. Такие модели нашли широкое применение в анализе надежности. Поскольку в статистических моделях полученные оценки являются результатом усреднения по однотипному множеству, они не всегда столь же точны, как оценки, полученные при анализе реального состояния машины. Сущность метода состоит в замене математическим аналогом эксперимент с реальной системой. Статистические модели используют законы больших чисел и основываются на предельных теоремах Чебышева и Бернулли [93].

Теорема Чебышева: при неограниченном проведении опытов среднее арифметическое $\bar{y}$ по вероятности стремится к математическому ожиданию m_y :

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0, N \rightarrow \infty} p[|\bar{y} - m_y| < \varepsilon] = 1, \text{ при } \varepsilon > 0. \quad (3.1)$$

Теорема Бернулли: при неограниченном увеличении опытов частота события $\bar{q}$ сходится по вероятности к его вероятности p [93]:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0, N \rightarrow \infty} p[|\bar{q} - p| < \varepsilon] = 1, \text{ при } \varepsilon > 0. \quad (3.2)$$

Таким образом, теорема Бернулли позволяет находить вероятность появления некоторого события.

Модели на основе данных. Чисто эмпирические модели позволяют описать наблюдаемое поведение объектов, не вдаваясь в его физические основы. Эти модели строят с использованием методов распознавания образов, позволяющими сопоставить результаты измерений и полученные на их основе параметры оставшемуся сроку службы по обширной выборке данных об этой зависимости. Модели могут быть реализованы в форме анализа статистических связей, искусственных нейронных сетей и т.п.

Анализ моделей прогнозирования остаточного ресурса показывает, что наиболее точный метод будет опираться на физические явления, лежащие в основе развития неисправности. В случае отсутствия модели развития неисправностей, как это происходит с горнотранспортными машинами, целесообразно применять статистические методы оценки, дополняя их экспертными моделями.

3.2. Разработка математической модели деградации технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров

Определение фактического технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров требуется для планирования проведения технического обслуживания в целях его безотказной работы. Следует отметить, что даже однотипные редукторы, работающие примерно в одинаковых условиях эксплуатации, показывают различные значения ресурсов, а отказы могут происходить в случайные моменты времени. К однотипным редукторам следует относить ряд редукторов, конструктивно подобных, изготавливаемых из одинаковых материалов, по единому технологическому процессу и на одном производстве.

Основной количественной характеристикой безотказности объекта в заданном промежутке времени является вероятность безотказной работы [93]

$$P(t) = \frac{N_p(t)}{N} = 1 - Q(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \text{ при } t \geq 0 \quad (3.3)$$

где N_p – число работоспособных объектов на момент времени t ;

N – общее число наблюдаемых объектов;

$Q(t)$ – вероятность возникновения отказов;

$n(t)$ – число объектов, отказавших на момент времени t .

Если интегральная функция распределения случайной величины $Q(t)$ дифференцируема, то ее производная будет плотностью распределения случайной величины T – времени наработки объекта с момента монтажа до исчерпания ресурса [94]:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = f(t); \quad f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

Функция $f(t)$ также называется плотностью отказов.

Среднюю наработку на отказ (математическое ожидание) можно определить по формуле

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (3.5)$$

Гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma\%}$ – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентная наработка определяется из уравнения [95]

$$1 - Q(T_{\gamma\%}) = 1 - \int_0^{T_{\gamma\%}} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (3.6)$$

Интенсивность отказов – это отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, продолжающих исправно работать в данном временном промежутке:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_p \cdot \Delta t}, \quad (3.7)$$

где $\Delta n(t)$ – число отказов за промежуток времени Δt ;

N_p – число работоспособных объектов на момент времени t .

Средний остаточный ресурс определяют по выражению

$$\bar{T}_{осм}(t) = \int_0^{\infty} T_{\gamma\%}(t) dt. \quad (3.8)$$

где $T_{\gamma\%}(t)$ – гамма-процентный остаточный ресурс, γ принимаемый на практике $0,9 \div 0,95$.

Показатели надежности коническо-цилиндрических редукторов согласно [96], при $\gamma = 0,9$ должны быть не менее:

- для зубчатых передач и валов $T_{\gamma\%}(t) = 25000$ часов;
- для подшипников $T_{\gamma\%}(t) = 12500$ часов.

Наиболее часто для механических систем, в которых характерны износные процессы трения, используют закон распределения Вейбулла. При распределении Вейбулла вероятность безотказной работы на интервале $(0, t)$ имеет вид (рисунок 3.3) [97]:

$$P(t) = e^{(-\lambda \cdot t^{\delta})}; t \geq 0; \lambda > 0; \delta > 0. \quad (3.9)$$

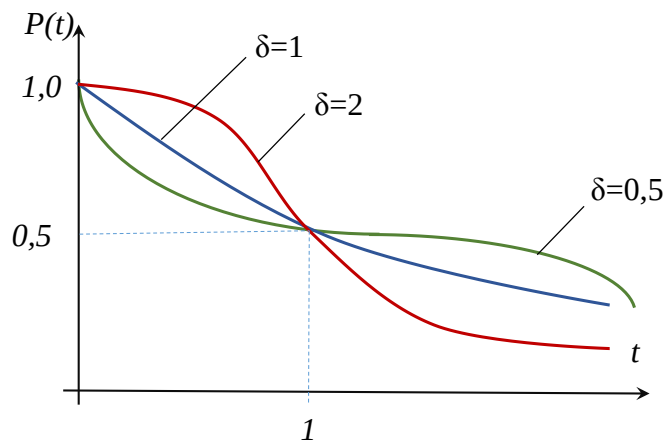


Рисунок 3.3. – Функция $P(t)$ для распределения Вейбулла

Среднее время наработки на отказ, согласно выражению (3.5):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{(-\lambda \cdot t^{\delta})} dt. \quad (3.10)$$

Интенсивность отказов для распределения Вейбулла

$$\lambda(t) = \lambda \cdot \delta \cdot t^{\delta-1}; t \geq 0; \lambda > 0; \delta > 0. \quad (3.11)$$

Таким образом, интенсивность отказов $\lambda(t)$ при $\delta < 1$ монотонно убывает, при $\delta = 1$ остается постоянной, при $\delta > 1$ – монотонно возрастает (рисунок 3.4) [98].

Форма закона распределения зависит от изменения структуры сигнала и оказывает влияние на процедуру создания диагностических признаков.

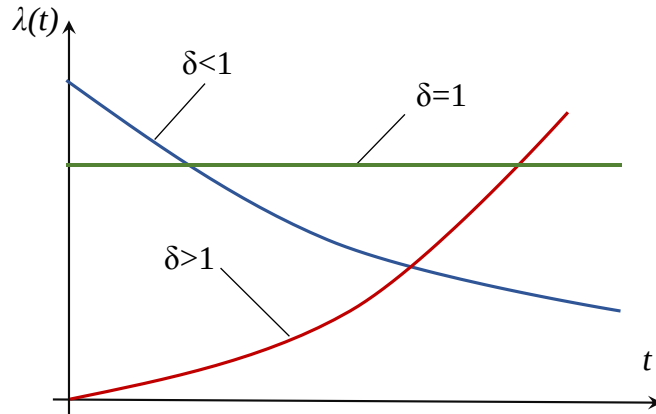


Рисунок 3.4. – Функция $\lambda(t)$ для распределения Вейбулла

Данный подход позволяет разработать математическую модель изменения ресурса редуктора шахтного ленточного конвейера.

Изменения значения характеризующего параметра K определяет ресурс машины или отдельного узла:

$$K = K_{ном} \pm k \cdot t_i^\alpha, \quad (3.12)$$

где $K_{ном}$ – номинальное значение характеризующего параметра;

k – коэффициент, учитывающий режим и условия эксплуатации;

t_i – фактическая наработка машины от момента ввода в эксплуатацию;

α – показатель степени изменения параметра во всем диапазоне наработки.

Таким образом, фактический остаточный ресурс редуктора конвейера определяется как разность наработок для предельного и фактического уровня контролируемого параметра

$$T_{ост} = \frac{\Delta t (\Delta K_{np}^{1/\alpha} - \Delta K_{\phi}^{1/\alpha})}{\Delta K_{np}^{1/\alpha} - \Delta K_{\phi-1}^{1/\alpha}}. \quad (3.13)$$

Достоверность прогнозной модели для оценки остаточного ресурса, определяется показателем степени α .

3.3. Проверка гипотезы о законе распределения экспериментальных результатов оценки работоспособного технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров

В диссертационной работе использованы физико-статистические методы для анализа показателей надежности редукторов шахтных ленточных конвейеров, учитывающие влияние возмущающих факторов, а также факторов управления при изменении частоты вращения привода. Проверка гипотезы о нормальности распределения результатов измерения позволяет использовать хорошо зарекомендовавший себя метод наименьших квадратов для построения трендов изменения параметров состояния редукторов.

Нормальное распределение (распределение Гаусса) достаточно широко применяется для решения задач теории надёжности. Параметрами этого распределения являются: μ – математическое ожидание случайной величины и σ – среднее квадратическое отклонение. Плотность нормального распределения определяется зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.14)$$

где X – наблюдаемое значение; n – число наблюдений;

$$\mu = \frac{\sum(x)}{n}; \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \mu)^2}{n - 1}}.$$

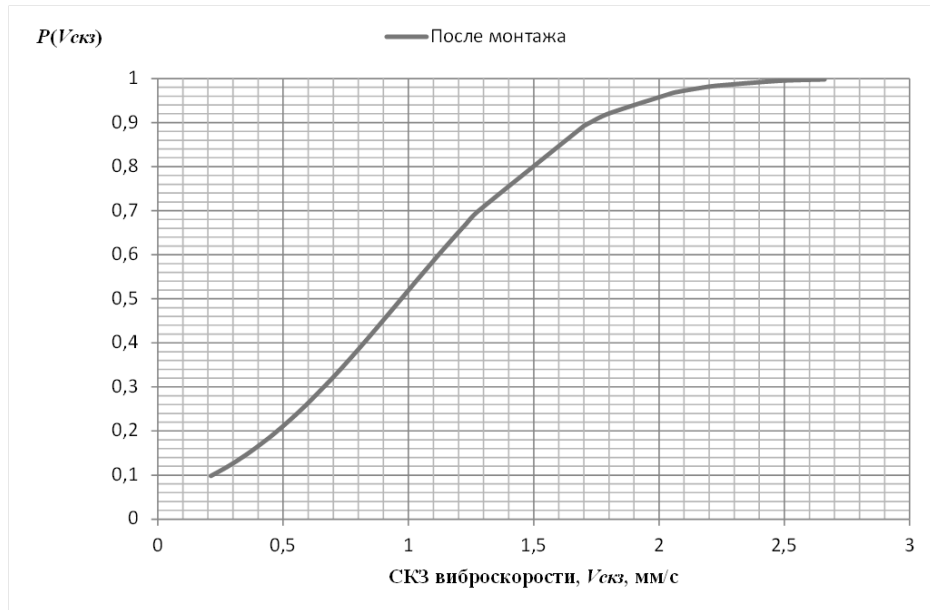
Рассмотрим данные параметра общего уровня вибрации (среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости) $v_{скз}$, мм/с измеренного для двенадцати однотипных редукторов после монтажа. Важно отметить, что вибрации снимались в одинаковых точках при одинаковой частоте вращения, соответствующей

номинальной. Данные и расчет вероятностей по (3.14) приведены в таблице 3.1 [99].

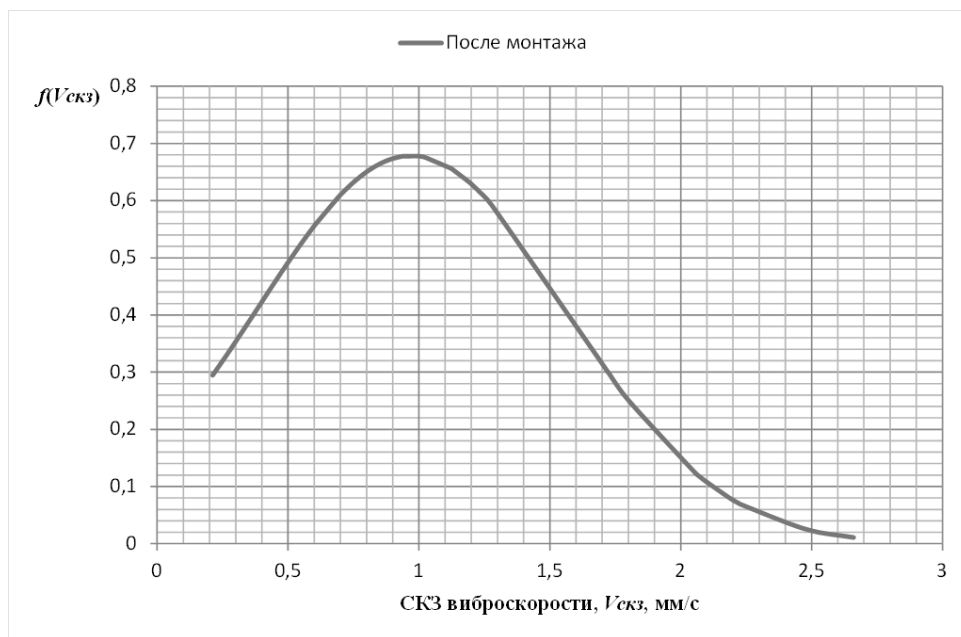
Таблица 3.1 – Данные СКЗ виброскорости на редукторах после монтажа и расчет вероятностей для проверки нормальности закона распределения

Номер наблюдения, k	Значение СКЗ виброскорости, $\nu_{скз}$, мм/с	Среднее квадратическое отклонение, σ	Номер наблюдения, k	Значение СКЗ виброскорости, $\nu_{скз}$, мм/с	Среднее квадратическое отклонение, σ
1	0,21158	-0,759596528	37	0,82356	-0,147616528
2	0,26858	-0,702596528	38	0,82938	-0,141796528
3	0,28571	-0,685466528	39	0,8297	-0,141476528
4	0,31874	-0,652436528	40	0,83023	-0,140946528
5	0,32419	-0,646986528	41	0,84157	-0,129606528
6	0,37061	-0,600566528	42	0,85019	-0,120986528
7	0,4349	-0,536276528	43	0,85202	-0,119156528
8	0,45751	-0,513666528	44	0,86304	-0,108136528
9	0,47527	-0,495906528	45	0,87719	-0,093986528
10	0,47676	-0,494416528	46	0,87938	-0,091796528
11	0,49783	-0,473346528	47	0,88349	-0,087686528
12	0,52793	-0,443246528	48	0,89945	-0,071726528
13	0,52902	-0,442156528	49	0,92729	-0,043886528
14	0,541	-0,430176528	50	0,94125	-0,029926528
15	0,54134	-0,429836528	51	0,9982	0,027023472
16	0,54148	-0,429696528	52	1,005	0,033823472
17	0,55509	-0,416086528	53	1,0205	0,049323472
18	0,5596	-0,411576528	54	1,1219	0,150723472
19	0,57974	-0,391436528	55	1,1265	0,155323472
20	0,5929	-0,378276528	56	1,1941	0,222923472
21	0,59448	-0,376696528	57	1,2152	0,244023472
22	0,60533	-0,365846528	58	1,2305	0,259323472
23	0,60568	-0,365496528	59	1,2769	0,305723472
24	0,60594	-0,365236528	60	1,7002	0,729023472
25	0,69198	-0,279196528	61	1,7018	0,730623472
26	0,70268	-0,268496528	62	1,7264	0,755223472
27	0,70427	-0,266906528	63	1,8033	0,832123472
28	0,71657	-0,254606528	64	2,0546	1,083423472
29	0,71878	-0,252396528	65	2,0751	1,103923472
30	0,74412	-0,227056528	66	2,0932	1,122023472
31	0,74892	-0,222256528	67	2,1844	1,213223472
32	0,75567	-0,215506528	68	2,221	1,249823472
33	0,78087	-0,190306528	69	2,2248	1,253623472
34	0,78273	-0,188446528	70	2,228	1,256823472
35	0,79827	-0,172906528	71	2,4768	1,505623472
36	0,8122	-0,158976528	72	2,6603	1,689123472

Графики значения вероятности событий, а) и плотности распределения, б) для значений, указанных в таблице 3.1. приведены на рисунке 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Графики: а) вероятности и б) плотности распределения параметров вибрации (СКЗ виброскорости) для редукторов после монтажа

Применение критерия проверки на отклонение от нормального распределения требуется в случае сомнения в нормальности закона распределения данных наблюдения. Например, для плотности распределения на рисунке 3.5 б) (приблизительно соответствует распределению Гаусса) отсутствует информация в левой части.

Для оценки нормальности закона распределения апостериорных данных автором использовался графический метод [100].

Метод заключается в следующем. Кумулятивная функция дает интегральную картину распределения вероятности и строится на специальной нелинейной шкале (бумаге для нормальных вероятностных графиков). Вертикальная ось размечена значениями кумулятивной относительной частоты события и имеет нелинейную шкалу. Ось абсцисс имеет размерность характеризующего параметра x и имеет линейную шкалу. Распределение переменной x будет нормальным, в том случае, если кумулятивная функция распределения приближается к прямой линии.

Графический метод, позволяет быстро и наглядно оценить, насколько близко полученное распределение к Гауссовому.

Данный метод не является строгим критерием проверки на отклонение от нормального, но является важным дополнением к пониманию функции распределения, что также помогает выявить начальную стадию возникновения дефекта.

Графическая процедура состоит в расположении данных наблюдения $x_1, x_2, \dots, x_n$ в неубывающем порядке и затем в нанесении значений вероятности P_k (кумулятивной относительной частоты события), рассчитанных по формуле

$$P_k = \frac{\left(k - \frac{3}{8}\right)}{\left(n + \frac{1}{4}\right)} \quad (3.15)$$

где n – число наблюдений;

$k = 1, 2, \dots, n$ – порядковый номер наблюдения

на бумагу для нормальных вероятностных графиков.

В таблице 3.2 приведены данные параметра среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости измеренного на редукторах ленточных конвейеров, после наработки 10800 часов и расчет вероятностей по (3.15) [99].

Таблица 3.2 – Результаты наблюдений СКЗ виброскорости на редукторах ленточных конвейеров после наработки 10800 часов и расчет вероятностей

Номер наблюдения, k	Значение СКЗ виброскорости, $\nu_{\text{СКЗ}}$, мм/с	Кумулятивная относительная частота P_k	Десятичный логарифм, $\lg(10 \cdot \nu_{\text{СКЗ}})$
1	1,2032	0,01497	1,080338
2	1,31	0,038922	1,117271
3	1,3539	0,062874	1,131587
4	1,3624	0,086826	1,134305
5	1,4572	0,110778	1,163519
6	1,4795	0,134731	1,170115
7	1,5334	0,158683	1,185655
8	1,6071	0,182635	1,206043
9	1,6807	0,206587	1,22549
10	1,8077	0,230539	1,257126
11	1,9066	0,254491	1,28026
12	1,9505	0,278443	1,290146
13	2,1847	0,302395	1,339392
14	2,2895	0,326347	1,359741
15	2,6844	0,350299	1,428847
16	2,7157	0,374251	1,433882
17	2,7876	0,398204	1,44523
18	2,8666	0,422156	1,457367
19	2,8763	0,446108	1,458834
20	3,0228	0,47006	1,480409
21	3,0863	0,494012	1,489438
22	3,1178	0,517964	1,493848
23	3,1488	0,541916	1,498145
24	3,179	0,565868	1,502291
25	3,2425	0,58982	1,51088
26	3,3274	0,613772	1,522105
27	3,5515	0,637725	1,550412
28	3,7325	0,661677	1,572
29	3,8647	0,685629	1,587116
30	3,8769	0,709581	1,588485
31	3,8772	0,733533	1,588518
32	4,1063	0,757485	1,613451
33	4,1753	0,781437	1,620688
34	4,282	0,805389	1,631647
35	4,3944	0,829341	1,6429
36	4,5386	0,853293	1,656922
37	4,616	0,877246	1,664266
38	4,7183	0,901198	1,673786
39	5,0661	0,92515	1,704674
40	5,3099	0,949102	1,725086
41	5,6925	0,973054	1,755303
42	5,9547	0,997006	1,77486

Построенный на соответствующей нелинейной шкале график представлен на рисунке 3.6. Распределение вероятностей близко к прямой линии, что подтверждает нормальность распределения.

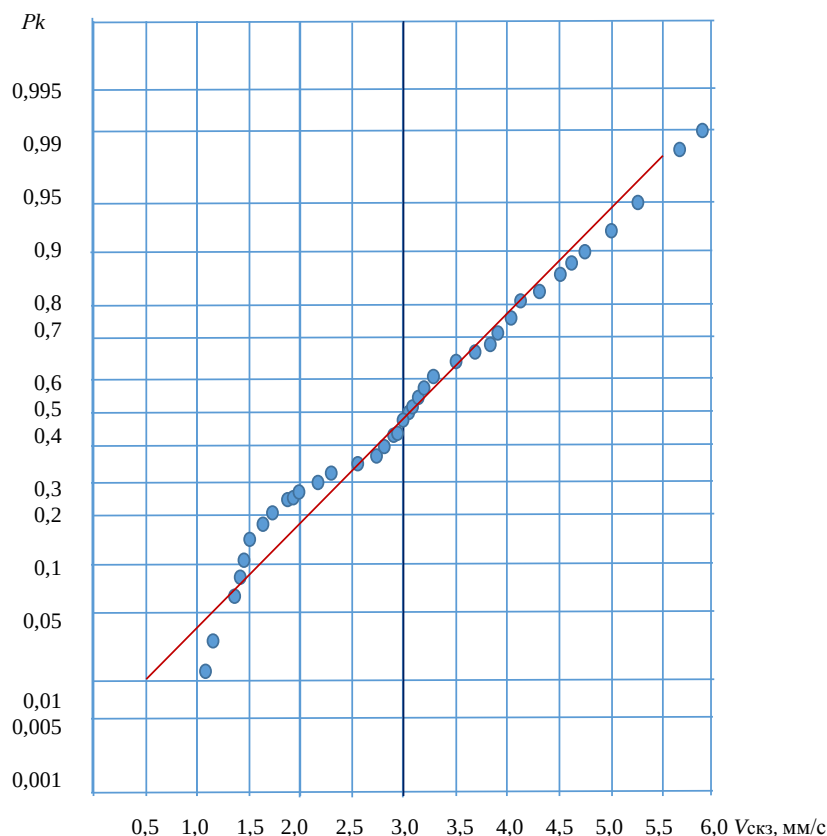


Рисунок 3.6 – График серии наблюдений (данных таблицы 3.2) на шкале для нормальных вероятностных графиков

Проверка гипотезы о нормальном распределении может быть выполнена с использованием критерия Пирсона. Задаемся уровнем значимости, как правило $\alpha = 0,05$. Для общности изложения параметры вибрации (или любые другие) в дальнейших расчетах будем именовать x . Для проверки гипотезы о нормальном распределении генеральной совокупности при заданном уровне значимости α необходимо [101]:

1. Вычислить среднее значение выборки $\bar{x}$ и среднее квадратическое отклонение;
2. Вычислить теоретические частоты

$$m_i^T = \frac{n \cdot h}{\sigma} \cdot \varphi(u_i), \quad (3.16)$$

где n – объем выборки (сумма всех частот);

h – шаг (разность между двумя соседними вариантами);

$$u_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}; \varphi(u_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}} - \text{функция Лапласа};$$

$\bar{x}$ – среднее значение выборки;

σ – среднее квадратическое отклонение.

3. Сравнить эмпирические m_i и теоретические m_i^T частоты с помощью критерия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона:

3.1. Расчетное значение критерия (данных наблюдения)

$$\chi_{расч}^2 = \sum_i^r \frac{(m_i - m_i^T)^2}{m_i^T}, \quad (3.17)$$

где r – число интервалов с шагом h .

Замечание. Для большей обоснованности выводов интервалы с совокупностью $m_i < 5$ лучше объединить с соседними интервалами.

3.2. Критическое значение по таблице критических точек [101] $\chi_{кр}^2(\alpha; k)$, по заданному уровню значимости и числу степеней свободы $k = r - s - 1$, где r – число интервалов после объединения;

s – число параметров распределения (в нашем случае $s = 2$, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение).

Если $\chi_{расч}^2 < \chi_{кр}^2$ – нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении совокупности, в противном случае гипотезу отвергают.

Для построения интервального вариационного ряда находят по формуле Стерджеса оптимальную ширину интервала

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 - 3,32 \cdot \lg n}, \quad (3.18)$$

где $x_{\min}, x_{\max}$ – соответственно наименьшее и наибольшее значения признака x ;

n – объем выборки.

Если закон распределения вероятности результатов измерения для других параметров (например, температуры, или смазочного масла) в дальнейшем будет

незначительно отличается от нормального, то рекомендуется использовать робастные оценки среднего значения.

3.4. Оценка влияния погрешности измерения на результаты диагностирования редукторов шахтных ленточных конвейеров

Несовершенство технических средств, влияние факторов внешней среды, некоторые упрощения модели (допущения) не позволяют получить истинное значение измеряемой величины в результате измерения.

Значение диагностического параметра может быть получено в результате измерения некоторой физической величины. Процедура измерения предполагает следующие этапы:

- выбор модели и постановка задачи;
- выбор метода измерения и конкретных средств измерения (СИ);
- поверка или калибровка средств измерения;
- непосредственно проведение эксперимента;
- обработка результатов.

Погрешность измерений, в единицах измеряемой величины, в общем случае равна

$$\Delta = \Delta_{СИ} + \Delta_M + \Delta_{ОТС} + \Delta_{СЛ}, \quad (3.19)$$

где $\Delta_{СИ}$ – погрешность средства измерений;

Δ_M – методическая погрешность;

$\Delta_{ОТС}$ – погрешность отсчета;

$\Delta_{СЛ}$ – случайная погрешность.

Для подавляющего большинства простых измерений хорошо выполняется нормальный закон случайных погрешностей (закон распределения Гаусса).

Среднее квадратическое отклонение σ характеризует процесс измерений и не является случайной величиной. Квадрат этой величины называют дисперсией измерений D . Чем меньше дисперсия, тем выше точность измерений.

Истинное значение средней квадратической ошибки σ , как и измеряемой величины μ , неизвестно. Согласно статистической оценке средняя квадратическая ошибка равняется средней квадратической ошибке среднего арифметического $S_{\bar{x}}$. Ее величина может быть вычислена по формуле

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3.20)$$

где x_i – результат i -го измерения;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое полученных значений;

n – число измерений.

Полагая истинное значение измеряемой величины μ , ее среднее арифметическое значение $\bar{x}$, а случайная абсолютная погрешность Δx , то результат измерений записывается в следующем виде $\mu = \bar{x} \pm \Delta x$.

Интервал значений от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$, в который попадает истинное значение измеряемой величины, называется доверительным интервалом. Так как погрешность Δx – величина случайная, считают, что истинное значение μ попадает в доверительный интервал с некоторой вероятностью P . Вероятность P называется доверительной вероятностью измерений.

При небольшом числе испытаний $n \leq 20$, что мы имеем при реальных измерениях параметров редукторов в подземных условиях, доверительный интервал погрешности измерений рассчитывается с использованием t – распределения Стьюдента

$$\bar{x} - t \cdot S_{\bar{x}} \leq \mu \leq \bar{x} + t \cdot S_{\bar{x}}, \quad (3.21)$$

где t – критическое значение распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha=1-P$ и числа степеней свободы k .

3.5. Разработка прогностической модели изменения технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров

Исследования показали, что прогностические модели изменения технического состояния редуктора включают в себя определение зависимости одной переменной y от переменной x . При этом величина x рассматривается как независимая переменная, а величина y – зависимая. Прогностические модели, основанные на вероятностно-статистических исследованиях, используют два подхода для оценки параметров нелинейных моделей.

Первый основан на линеаризации модели и позволяет с помощью метода замены переменных представить нелинейную зависимость в виде приближенного линейного соотношения между исследуемыми переменными.

Другой подход применяется в случае невозможности подбора соответствующего преобразования, и использует методы нелинейной оптимизации на основе исходных переменных [101 - 103].

Для нахождения линии регрессии (тренда) воспользуемся методом наименьших квадратов, полагая, что искомая величина y нормально распределена относительно своего математического ожидания μ .

Выражая под параметром (y) значение диагностического параметра K – характеризующего состояние редуктора ленточного конвейера, а под параметром (x) время t искомая зависимость тренда будет иметь линейный вид (рисунок 3.7)

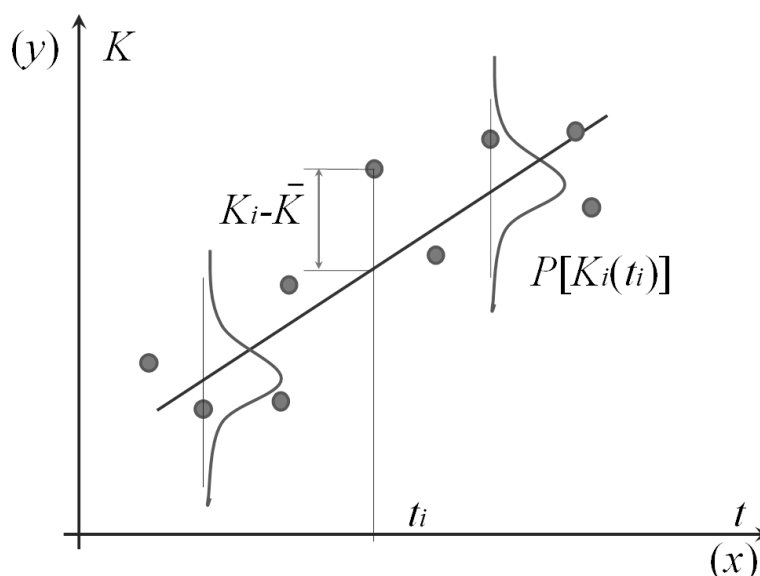


Рисунок 3.7 – Прямая регрессии $(K - \bar{K}) = b(t - \bar{t})$

При этом нормальное распределение K не зависит от переменной t и для некоторого i – го значения параметра t_i определяется законом $P[K_i(t_i)]$.

Прямую регрессии можно представить в виде $(K - \bar{K}) = b(t - \bar{t})$, где

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i; \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i.$$

Для большинства диагностических параметров $K \neq 0$ при нулевом значении аргумента t (как это видно на примере замера общего уровня вибрации в начальный момент времени, после монтажа редукторов).

В таком случае уравнение прямой регрессии представляют в виде

$$K = a + b \cdot t$$

где b – коэффициент регрессии;

a – свободный член искомой зависимости.

Коэффициент корреляции переменных определяется через сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми и вычисленными значениями:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (K_i - a - b \cdot t_i)^2, \quad (3.22)$$

коэффициенты a и b определяются из уравнений

$$\frac{ds}{da} = - \sum_{i=1}^n (K_i - a - b \cdot t_i) = 0, \quad (3.23)$$

$$\frac{ds}{db} = -\sum_1^n (K_i - a - b \cdot t_i) \cdot t_i = 0.$$

Погрешность коэффициента корреляции приближенно можно определить по формуле [103]:

$$m_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{n}}, \quad (3.24)$$

При небольшом числе наблюдений ($n \leq 20$) корреляционная связь считается значимой (с доверительной вероятностью P), если соблюдается условие $t_{расч} > t_\alpha$

$$t_{расч} = R \sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}}, \quad (3.25)$$

здесь $t_{расч}$ – расчетная величина коэффициента Стьюдента, а t_α – табличное значение коэффициента Стьюдента для уровня значимости $\alpha = (1-P)$ и числа степеней свободы $k = n - 2$.

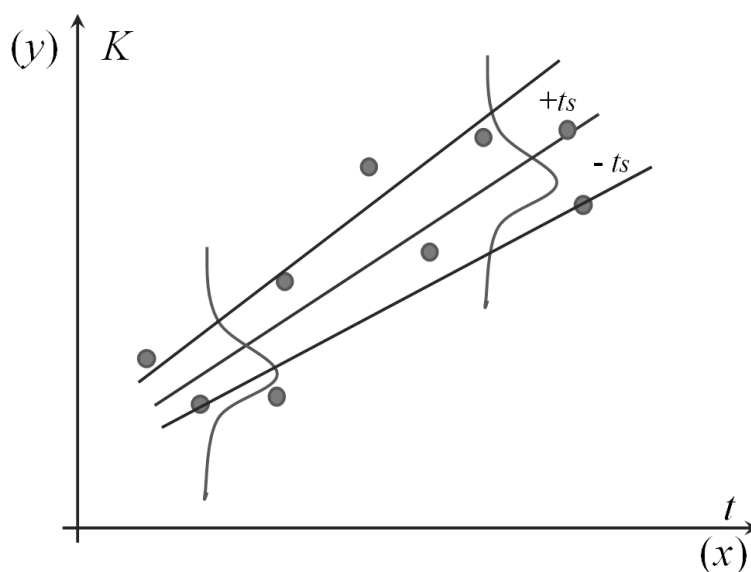


Рисунок 3.8 – Границы доверительного интервала при использовании критерия Стьюдента

Искомый тренд диагностического параметра, будет, таким образом, находиться в некотором интервале оценок (рисунок 3.8), определяемом одной из границ критерия Стьюдента t_s и заданной доверительной вероятностью P .

$$K = \bar{K} \pm t_s(P). \quad (3.26)$$

3.6. Основные итоги и выводы

1. Проанализированы существующие методы повышения надежности и прогнозирования технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров. На основании экспериментальных наработок и теоретических сведений предложена физико-статистическая модель деградации параметров сложных технических систем, с учетом внешних возмущающих факторов.

2. Проведена проверка гипотезы нормального распределения апостериорных данных, позволяющая использовать метод наименьших квадратов при построении прогностической модели.

3. Сформулирована задача оценки остаточного ресурса редукторов шахтных ленточных конвейеров и предложен метод построения прогнозного тренда диагностических параметров.

4. Проведен анализ требований к обработке экспериментальных данных, позволяющих с заданной доверительной вероятностью разрабатывать долгосрочные прогностические модели, описывающие процессы изменения технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

4.1. Описание и выбор объекта исследования

Для апробации методики оценки технического состояния редукторов в качестве объекта исследований были выбраны редукторы шахтных ленточных конвейеров 3ЛЛ-1600 коническо-цилиндрические фирмы Moventas Santasalo D3RST82ХО установленные в подземных горных выработках шахты «Талдинская-Западная 1» компании «СУЭК-Кузбасс».

Шахтный ленточный грузопассажирский конвейер 3ЛЛ 1600 предназначен для транспортирования горной массы крупностью кусков угля до 300 мм с отдельными включениями породы до 200 мм по прямолинейным в плане горным выработкам, с углами наклона от минус 3 до плюс 18° [104].

Привод включает в себя электродвигатели «Morley» GM 66 400/800 мощностью 500 кВт, напряжением 1140 вольт и числом оборотов 1500 об/мин, трехступенчатые коническо-цилиндрические редукторы «Moventas Santasalo» D3RST82ХО, которые в свою очередь жестко связаны с приводными барабанами. Электродвигатели запитываются от частотных преобразователей ЧСПШ-1250/6-0,69-УХЛ5.

Электродвигатель и редуктор соединяются при помощи быстроходной упругой муфты, сконструированной, чтобы снизить динамическую нагрузку на привод во время запуска. Передача мощности от приводных двигателей ленте осуществляется двумя приводными барабанами, привод можно навешивать с любой стороны приводных барабанов.

Техническая характеристика конвейера представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Техническая характеристика ленточного конвейера ЗЛЛ-1600

Наименование основных параметров и размеров	Норма
	ЗЛЛ 1600
Производительность, т/ч	3500
Приемная способность, м ³ /мин	75,12
Номинальная скорость ч движения ленты, м/с	0 – 4
Длина транспортирования, м	1400
Номинальная ширина ленты, мм	1600
Угол установки, градус	от -3° до + 18°
Мощность привода, кВт суммарная мощность, кВт	3х500 1500
Редуктор привода: тип	коническо-цилиндрический D3RST82XO
передаточное число, i	20,6128
Электродвигатели привода: тип	«Morley» GM66 400/800
Мощность, кВт	500
Напряжение, В	660/1140
число оборотов, об/мин	1493
Диаметр приводного барабана с футеровкой, мм	1012
Тип устройства главного запуска	частотный преобразователь
Диаметр поддерживающих роликов, мм	159,9
Тип ленты	ШТС (ШТГ)
Устройство натяжное	Активная лебедка
Исполнение электрооборудования	РВ

Каждый барабан крепится на раму при помощи крепежных болтов. Рама барабана представляет собой секцию, выполненную из стали, которая крепится на фундаментные опоры. Передача момента от редуктора к барабану осуществляется при помощи тихоходной фланцевой муфты, которая также снижает динамическую нагрузку на привод в момент пуска. Внешний вид приводной секции представлен на рисунке 4.1.

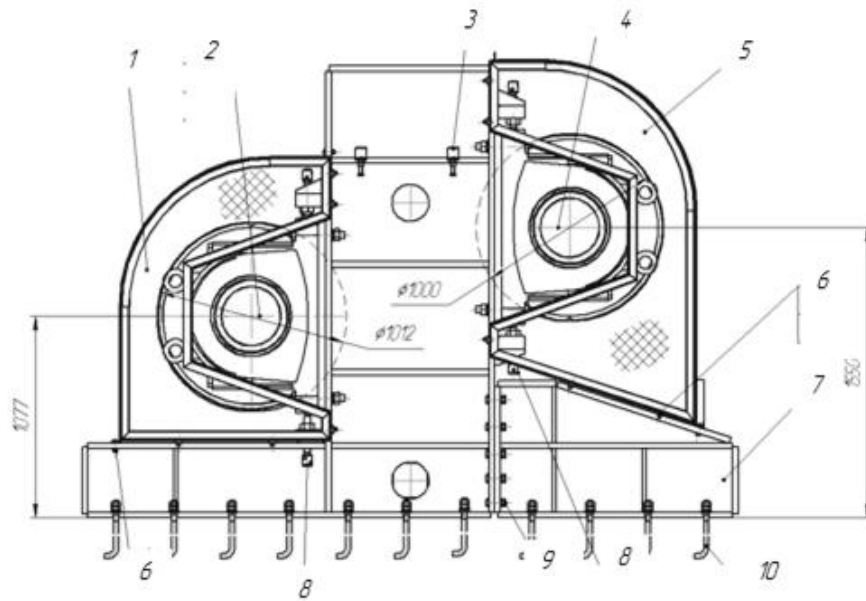


Рисунок 4.1. – Секция приводная: 1, 5 – ограждения, 2 – барабан привода $\varnothing 1012 \times 1800$, 3 – кронштейн для крепления кабелей, 4 – барабан привода $\varnothing 1000 \times 1800$, 6 – болт и гайка M12, 7 – рама, 8 – регулировочный винт с гайкой, 9 – болт и гайка M24, 10 – болт фундаментный

Схема обводки приводных барабанов лентой и место установки редуктора в схеме конвейера оказывает влияние на параметры его нагружения и износа [53] и приведены на рисунках 4.2, 4.3.

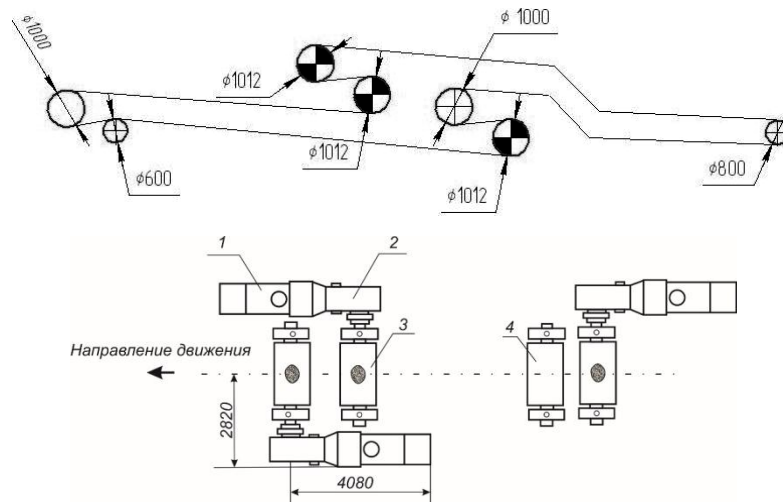


Рисунок 4.2. – Схема обводки приводных барабанов 1: а) обводка барабанов, б) расположение приводов 1 – двигатель, 2 – редуктор, 3 – приводной барабан, 4 – обводной барабан

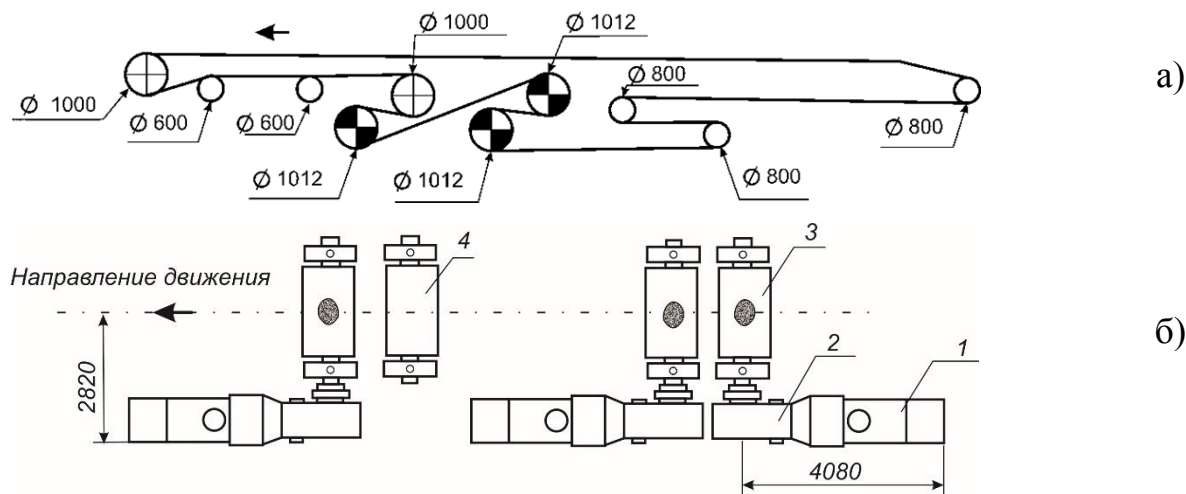


Рисунок 4.3. – Схема обводки приводных барабанов 2 а) обводка барабанов, б) расположение приводов 1 – двигатель, 2 – редуктор, 3 – приводной барабан, 4 – обводной барабан

Для определения характерных частот и последующего спектрального анализа параметров вибрации редукторов Moventas Santasalo DRST82XO необходимо руководствоваться кинематической схемой и номерами подшипников. Схема представлена на рисунке 4.4. Номера подшипников и числа зубьев приведены в таблице 4.2.

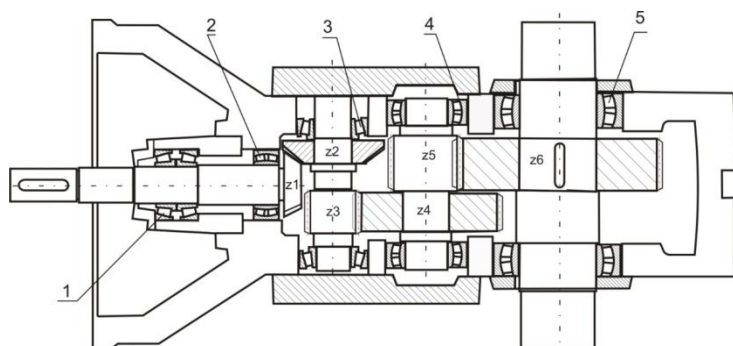


Рисунок 4.4. – Кинематическая схема с указанием номера подшипника (номера указаны в таблице 4.2)

Таблица 4.2. – Характеристики подшипников и числа зубьев передач редуктора

№ на схеме	№ подшипника	Диаметр тел качения	Диаметр внутренних	Диаметр наружный	Угол контакта	Число тел качения
1	23224	30,16	120	260	0	10
2	32224A	25	120	215	14	18
3	32321A	30	105	225	12	14
4	22326E	32	130	280	0	16
5	23048	27,7	240	360	0	20
Число зубьев 1 вала	Число зубьев 2 вала вход	Число зубьев 2 вала выход	Число зубьев 3 вала вход	Число зубьев 3 вала выход	Число зубьев 4 вала вход	
Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	
21	34	22	79	22	78	

4.2. Методика проведения вибродиагностических обследований редукторов шахтных ленточных конвейеров

Методика проведения вибродиагностических испытаний описывает порядок действий, приборную базу, алгоритм проведения обследования и диагностические признаки, на основании которых ведется оценка текущего технического состояния редуктора, а также прогнозируется его изменение.

Методика устанавливает периодичность, виды и точность измерений, необходимых для контроля и оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров при приемо-сдаточных испытаниях и в процессе последующей эксплуатации.

Методикой предусматривается проведение двух типов испытаний: предварительных (контрольных) и уточняющих (диагностических).

Контрольные измерения оценивают состояние узлов редуктора в целом, с учетом влияния режимов эксплуатации конвейера в соответствии с требованиями технологического процесса.

В результате диагностических измерений выявляются дефекты отдельных элементов и возможные причины их возникновения. Уточненные данные диагностических испытаний позволяют спрогнозировать степень дальнейшего развития дефектов. На основании результатов диагностических измерений разрабатываются рекомендации по их устранению, в целях поддержания эксплуатационной надежности привода.

Методика вибродиагностического обследования учитывает требования нормативных документов, регламентирующих:

1. Выполнение перечня работ по техническому обслуживанию узлов конвейера;
2. Порядок выполнения измерений конкретным анализатором;
3. Предельные уровни вибрации для машин данного класса.

Методика опирается на требования государственных, межотраслевых и отраслевых нормативно-методических материалов [36, 43, 105-107].

Для исследований параметров вибрации рекомендуется использовать взрывозащищенный виброанализатор двухканальный АГАТ-М, который совместно с программным обеспечением ДИАМАНТ-2 позволяет создать полноценную систему прогнозируемого обслуживания горно-шахтного оборудования (см. рисунок 4.5).

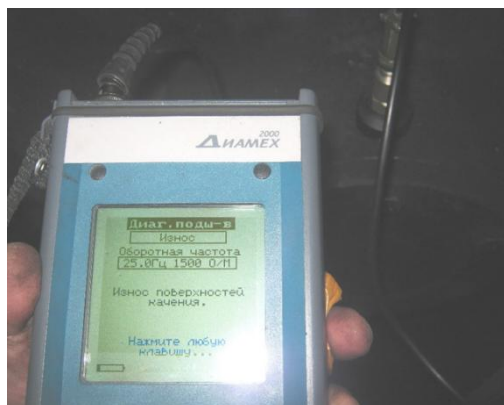


Рисунок 4.5. – Внешний вид двухканального виброанализатора АГАТ-М

Основным параметром вибрации, полно характеризующем энергию колебательного процесса, является среднее квадратическое значение виброскорости $v_{\text{СКЗ}}$, мм/с. Для оценки технического состояния элементов привода ленточных конвейеров кроме СКЗ виброскорости следует определять виброперемещение S , мкм и виброускорение A , м/с².

Согласно [43] агрегаты принадлежат ко второму классу машин. Общий уровень вибрации для второго класса машин не должен превышать аварийной установки 11,2 мм/с – неудовлетворительное состояние. Предупредительная установка соответствует 4,5 мм/с – годен ограниченное время.

Точки измерения параметров вибрации показаны на рисунке 4.6.

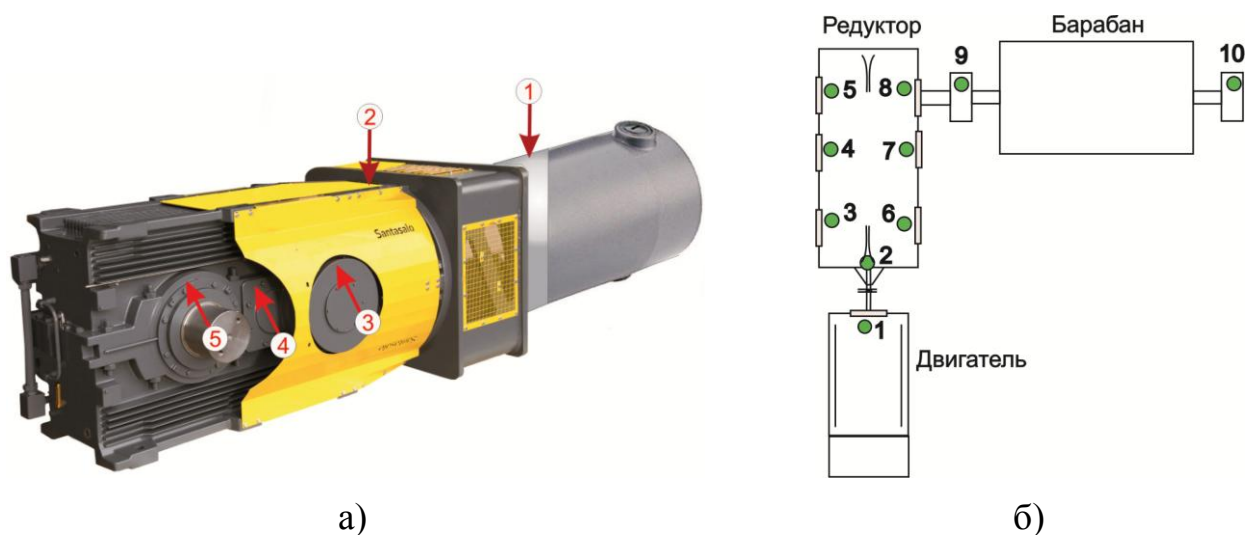


Рисунок 4.6. – Точки измерения вибрации привода: а) – натуральные точки редуктора D3RST82XO; б) – расположение на схеме

Измерение вибрации проводится в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях (рисунок 4.7) [43].

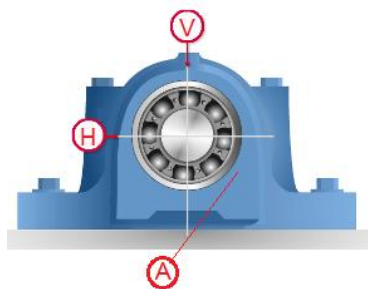


Рисунок 4.7. – Направления измерения вибрации агрегата: V – вертикальное, H – горизонтальное, A – осевое

Датчик необходимо устанавливать на массивную часть корпуса по возможности ближе к подшипниковому узлу. Недопустимо измерять вибрацию на тонкостенных участках корпуса и крышек редуктора, так как они часто колеблются в резонансном режиме.

Рекомендуется устанавливать датчики непосредственно на подшипниковых опорах или рядом с ними. Целесообразна установка датчиков и в других местах, в том случае если это обусловлено практическими соображениями и подкреплено опытом наблюдений за работой данной машины [107]. Например, в работе [108] показано, что наиболее полно характеризует вибрацию первой зубчатой пары осевая вибрация в точке 3 (Рисунок 4.6, б).

При последующих диагностических измерениях датчик устанавливается в одно и то же место, которое обычно маркируется перманентным водоустойчивым маркером.

Крепление датчиков при периодическом контроле вибрации выполняется при помощи неодимового постоянного магнита или щупа [109] (рисунок 4.8).

При креплении виброакселерометра с помощью постоянного магнита резонансная частота составляет около 10 – 20 кГц, реальные измерения можно проводить до частоты 5 кГц. Крепление с помощью ручного щупа дает резонансную частоту приблизительно около 2 кГц, однако на практике не применяется для диапазона свыше 1 кГц.

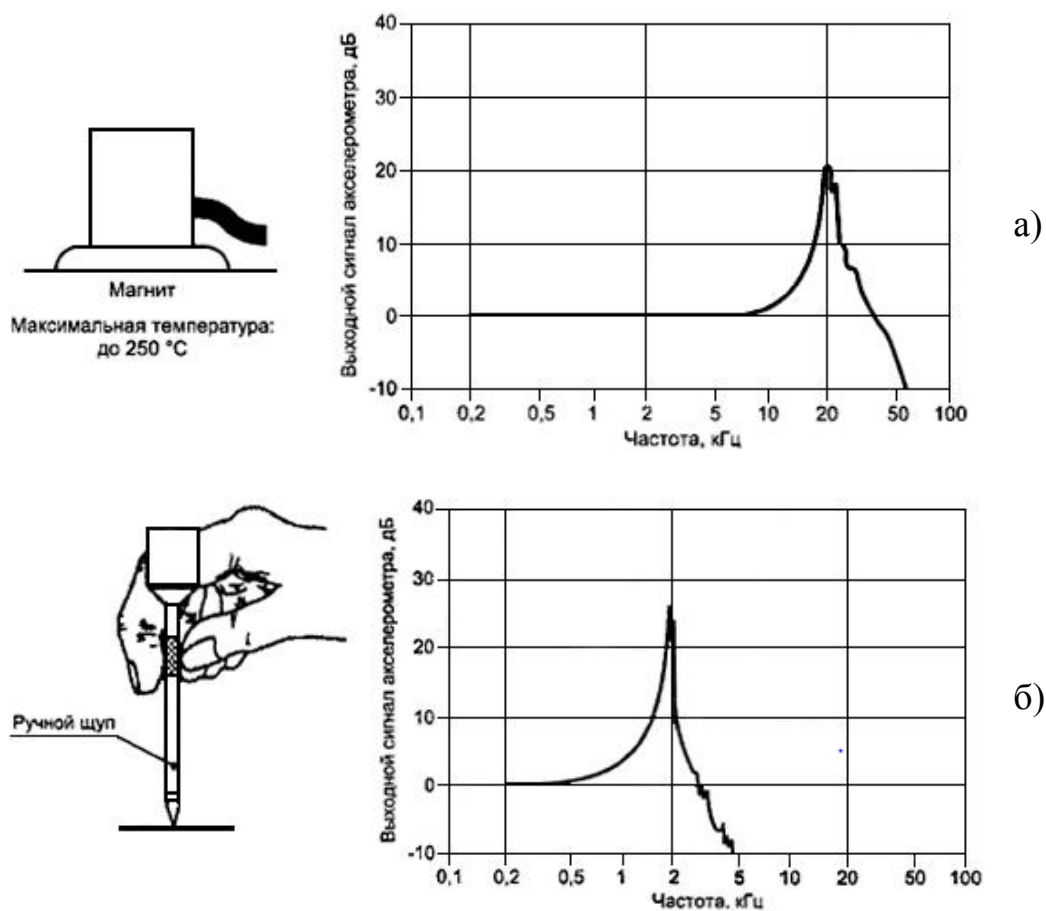


Рисунок 4.8. – Способы крепления датчиков вибрации:

а) – с помощью постоянного магнита; б) – с помощью ручного щупа

Методикой предлагается следующая периодичность проведения измерений:

1. После монтажа ленточного конвейера спустя 72 часа после пробного запуска и устранения выявленных замечаний в работе конвейера (регулировка боковых роликов, устранение перекосов ленты и т.п.) проводятся контрольные измерения.

2. В процессе эксплуатации периодичность последующих контрольных измерений после оценки технического состояния редуктора устанавливается собственником оборудования, при этом максимальный интервал не должен превышать:

- для уровня «требуется принятия мер» – не более 7 суток;
- для уровня «предельно допустимо» – не более 1 месяца;
- для уровня «допустимо без ограничения сроков» – не более 3 месяцев.

3. В случае выявления уровня «предельно допустимо», соответствующему удовлетворительному техническому состоянию, проводятся полные диагностические испытания, при которых замеряются:

- среднее квадратическое значение виброскорости ($v_{скз}$, мм/с) на корпусе редуктора, электродвигателя и приводного барабана;
- пиковое значение виброускорения корпусов подшипника редуктора;
- огибающей сигнала виброскорости;
- формы сигнала виброскорости.

Диапазоны значений виброскорости и соответствующая оценка технического состояния приводов ленточных конвейеров приведены в таблице 4.3 [43].

Таблица 4.3. – Допустимые уровни виброскорости на элементах привода конвейера

Допустимые уровни, $v_{скз}$ мм/с	Корпус подшипников редукторов, барабанов, электродвигателей ленточного конвейера
1,8 – 2,3	Зона А – приемо-сдаточные испытания или после ремонта
2,3 – 4,5	Зона В – пригодные для эксплуатации без ограничения сроков
4,5 – 7,1	Зона С – не пригодные для длительной эксплуатации, могут функционировать ограниченный срок до начала ремонтных работ
7,1 – 11,2	Зона D – опасно для эксплуатации, могут произойти серьезные повреждения машины
более 11,2	Зона Е – не рекомендуется эксплуатировать, повреждение машины может произойти в любой момент времени.

Для редукторов шахтных ленточных конвейеров, находящихся в условиях эксплуатации, настоящей методикой предполагается установление следующих уровней технического состояния и вмешательства персонала (таблица 4.4) [2].

Таблица 4.4 – Уровни вибрации, техническое состояние и необходимый уровень вмешательства персонала

Уровень вибрации, $\nu_{скз}$ мм/с	Техническое состояние	Уровень вмешательства персонала
Менее 4,5	Допустимо без ограничения сроков	Зеленый (не требуется)
4,5 – 7,1	Предельно допустимо (ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ)	Желтый (контроль дополнительными методами)
7,1 – 11,2	Опасно (требуется принятия мер)	Оранжевый (дополнительный контроль, планирование ремонта)
Более 11,2	Недопустимо (ОСТАНОВ)	Красный (незамедлительный останов)

Определены уровни вибрации ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ:

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ – показывает стадию развития дефектов, при котором уровень вибрации превысил определенное значение и в узле начались процессы деградации. При достижении уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ машина может эксплуатироваться некоторое время, в течение которого выполняются дополнительные исследования по определению причины износа и разрабатываются меры восстановительного воздействия. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ – зона С, в которой допустимый уровень виброскорости превышает $\nu_{скз} = 4,5$ мм/с.

ОСТАНОВ – показывает стадию развития дефекта, при которой отказ машины может произойти в любой момент. При достижении уровня ОСТАНОВ необходимо принимать оперативные меры по снижению вибрации или остановки для проведения ремонта. ОСТАНОВ – зона Е, в которой аварийный уровень виброскорости превышает $\nu_{скз} = 11,2$ мм/с.

Диаграмма Блейка для оценки виброускорения a , м/с² показана на рисунке 4.9 и показывает зоны вибрационного состояния в различных частотных диапазонах.

В области частот 1÷4 кГц допустимое интегральное значение виброускорения не должно превышать 160 м/с². Для отдельных гармонических составляющих в области частот 100÷1000 Гц значение виброускорения не должно превышать 16 м/с² [44].

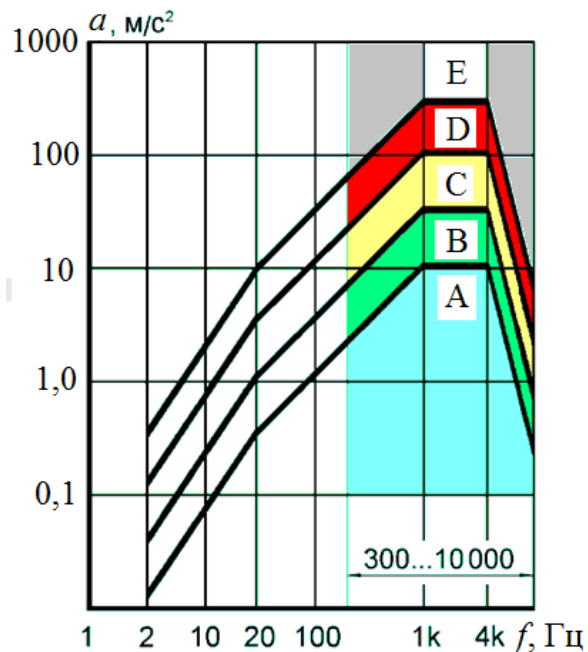


Рисунок 4.9. – Диаграмма Блейка для оценки пикового значения виброускорения на корпусах подшипников редукторов шахтных ленточных конвейеров

Уровни виброускорения по рисунку 4.9 соответствуют следующим зонам:

A – уровень вибрации при приемочных испытаниях;

B – уровень допустимой вибрации при нормальном режиме эксплуатации;

C – зона проведения дополнительного обследования по выявлению дефектов;

D – зона вибрации, при которой требуется вывод в ремонт;

E – зона недопустимого уровня вибрации – эксплуатация запрещена.

Многолетние экспериментальные данные, накопленные при оценке состояния оборудования по параметрам вибрации, доказывают необходимость введения ограничений для отдельных компонент спектра - спектральную «опорную маску», для которой устанавливаются границы: «предупреждение» и «тревога» [110-113].

В случае применения многодвигательного электропривода шахтного ленточного конвейера, возникают флуктуации оборотной частоты вращения ротора электродвигателя, управляемые автоматизированной системой с широтно-импульсным регулированием. Увеличенный фрагмент спектров виброскорости трех редукторов в одной и той же точке показывающий отклонения оборотной частоты f_r , Гц, представлен на рисунке 4.10.

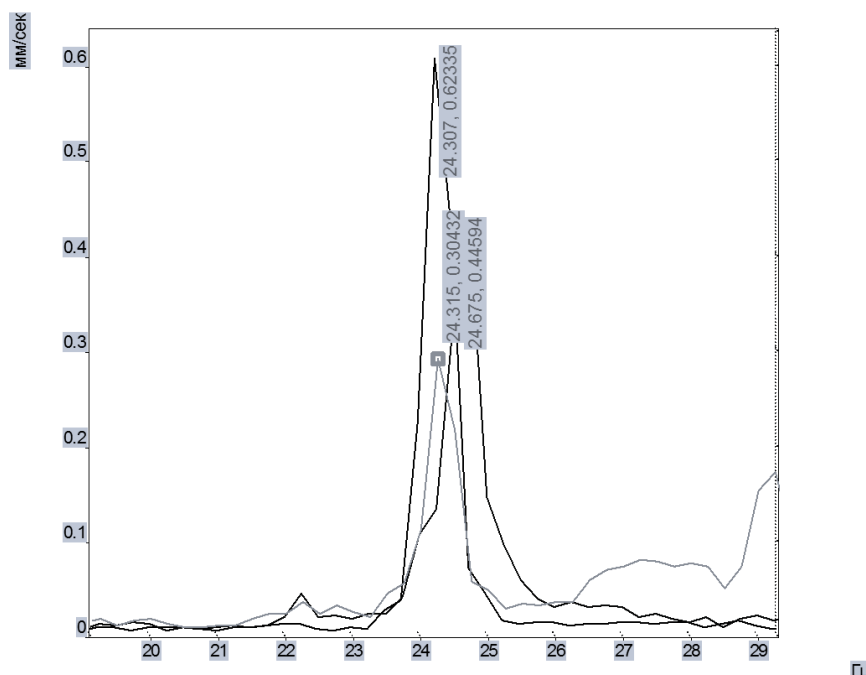


Рисунок 4.10. – Фрагмент трех спектров виброскорости на оборотной частоте электродвигателей одного привода.

Значения частот Гц: $f_{r1} = 24,307$; $f_{r2} = 24,675$; $f_{r3} = 24,315$

Настоящая методика учитывает особенности управляемого электропривода, при котором оборотная частота электродвигателя меняется в соответствии с технологическим процессом, введением так называемых «плавающих опорных масок» (floating spectrum mask). Плавающая опорная маска создается путем использования исходного спектра исправного механизма при соответствующей частоте вращения быстроходного вала f_r (будем называть ее оборотной частотой).

Выберем четыре основных режима работы конвейера, в процентах от номинальной частоты вращения привода. Примерное соответствие режимов и значения оборотной частоты приведено в таблице 4.5. Следует заметить, что указано значение синхронной частоты вращения поля статора (идеального холостого хода), реальные частоты будут меньше на величину скольжения, зависящую от фактической загрузки ленточного полотна (см. рисунок 4.10).

Таблица 4.5 – Обратная частота для различных режимов работы конвейера

Режим работы конвейера	Примерное обеспечение технологического процесса	Процент от номинальной частоты вращения, %	Значение обратной частоты, f_r , Гц
1	Максимальная производительность. Работают все подготовительные забои и очистной забой	100	25
2	Работает очистной забой	75	18,75
3	Работают два проходческих забоя	50	12,5
4	Работает один проходческий забой	25	6,25

При сравнении снятого спектра с «опорной маской» амплитуды вибрации, превышающие контуры маски могут рассматриваться как признак неисправности, при этом необходимо знать характерные частоты для идентификации неисправности. Доказано, что опорный спектр должен иметь расширение по частоте $4 \div 6$ %. Начальная опорная маска может быть принята за «обобщенный спектр» – спектр, соответствующий исправному состоянию однотипных редукторов [114].

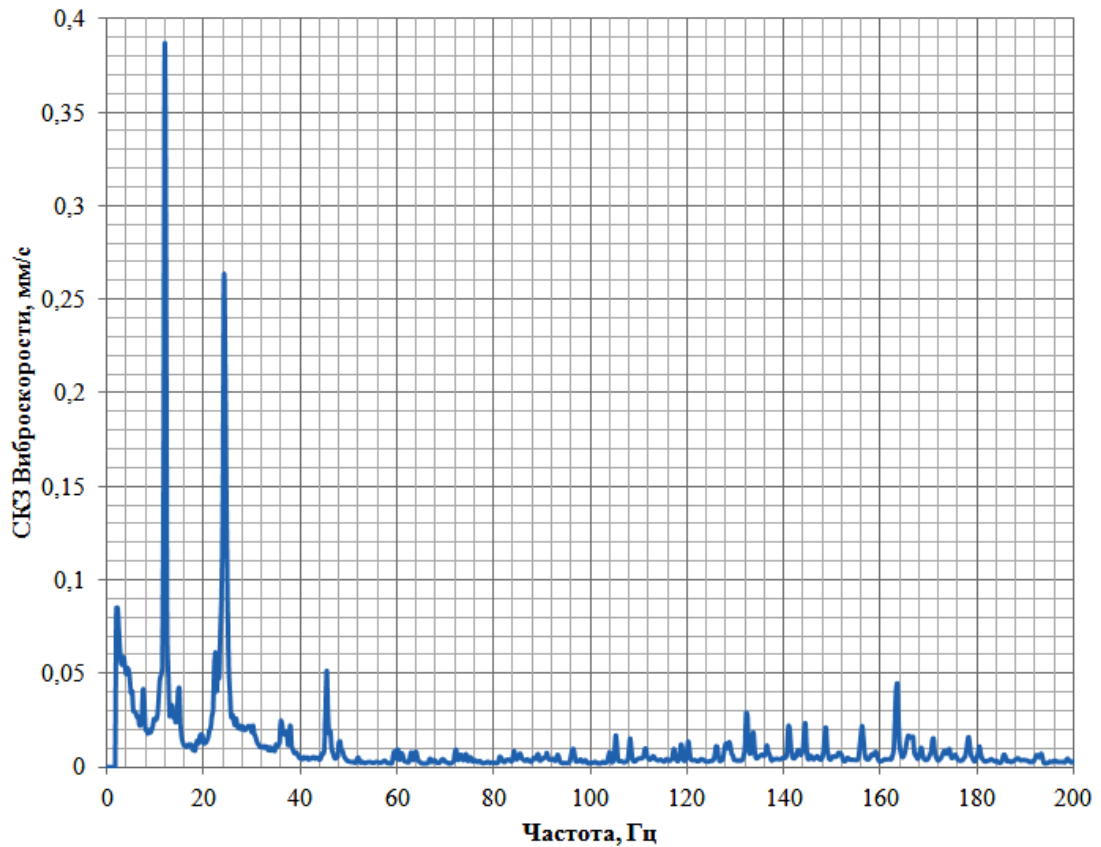
Обобщенный спектр получается нахождением средних значений амплитуд СКЗ виброскорости по соответствующим частотам. Опорная маска «Предупреждение» получается увеличением максимального значения виброскорости в 5% диапазоне частот в 2,5 раза. Опорная маска «Тревога» получается увеличением предупредительного значения в 2,5 раза, что соответствует принятому в стандартах [43, 106].

Обобщенные спектры СКЗ виброскорости для 12 редукторов а) и опорные маски б) для $f_r = 25$ Гц представлены на рисунке 4.11; для частоты $f_r = 12,25$ Гц на рисунке 4.12.

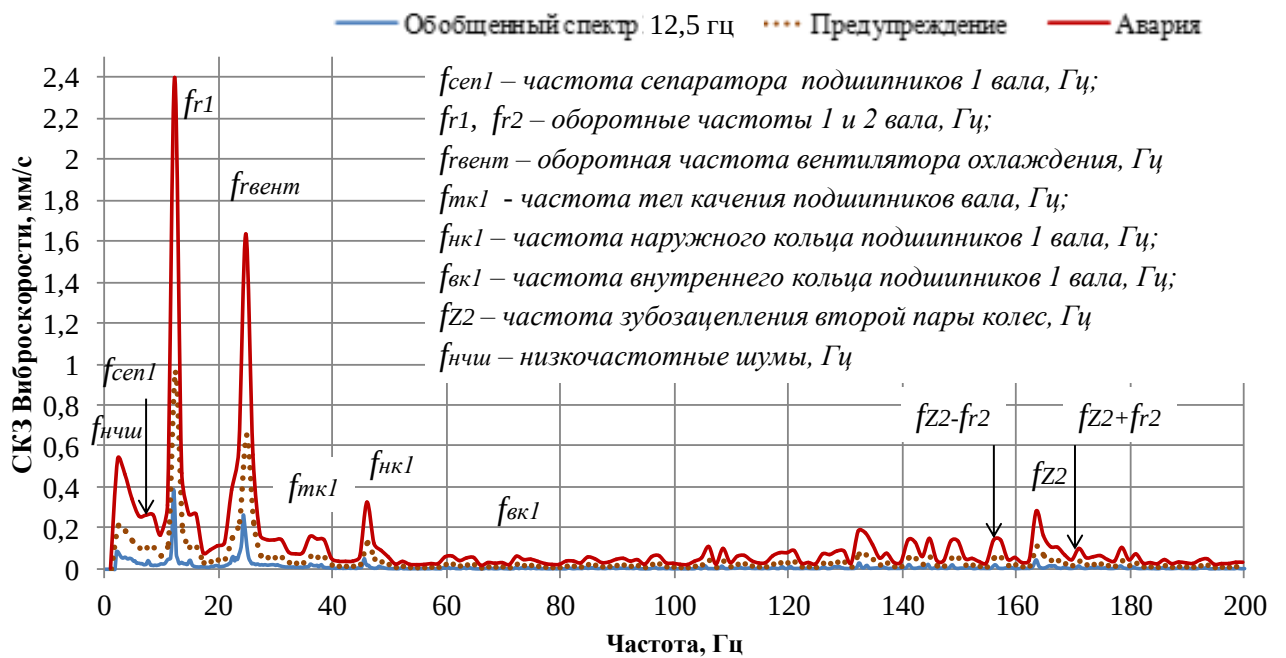
Характерные частоты, показывающие возможные дефекты, приведены на графике опорных масок. Следует заметить, что на данных электроприводах установлены вентиляторы принудительного охлаждения, для которых обратная частота равна 25 Гц, что следует учитывать при анализе спектров вибрации.



Рисунок 4.11 – Обобщенный спектр а), и опорные маски б), соответствующие обратной частоте 25 Гц



а)



б)

Рисунок 4.12 – Обобщенный спектр а), и опорные маски б), соответствующие обратной частоте 12,25 Гц

Методикой предусматривается проведение диагностических измерений на корпусах подшипников редукторов показывающих превышение уровней вибрации после предварительных контрольных измерений.

Измерение амплитуд и частот виброскорости в диапазоне частот 2 – 200 Гц, а также виброскорости и виброускорения в диапазоне частот 100 – 2000 Гц является основным методом диагностических измерений. Разбивка частот сделана для детализации линий спектра и выявления причины повышенного уровня вибрации [113, 114].

Данная методика позволяет не только находить дефектные элементы редуктора, но и указывать предположительные причины, вызывающие дефект. Системный подход, обуславливающий применение совокупности методов исследования позволяет прогнозировать развитие дефектов на ранней стадии их развития, а кроме того определять рациональные сроки оперативного вмешательства человека для проведения технического обслуживания или ремонта.

4.3. Методика проведения диагностических обследований редукторов шахтных ленточных конвейеров методом инфракрасной термографии

Инфракрасная термография основывается на измерении интенсивности теплового излучения объектов, которая зависит от пространственного распределения температуры и коэффициента излучения. Тепловизор преобразовывает результаты измерений в инфракрасное изображение – термограмму.

Интенсивность излучения температурного поля, обусловленного рассеянием энергии в узлах трения и рабочих средах машины, характеризует происходящие в ней процессы. Таким образом, с точки зрения оценки ее технического состояния, температура является важным параметром. Температурные аномалии, выявленные на поверхности обследования, показывают места возникновения зарождающихся неисправностей. Тепловой контроль методом инфракрасной термографии позволяет рассмотреть цельную картину распределения теплового поля,

бесконтактным способом, не оказывает влияние на объект контроля, предъявляет минимальные требования к аппаратуре измерения [115].

Автором предложен алгоритм проведения теплового контроля, представленный на рисунке 4.13.

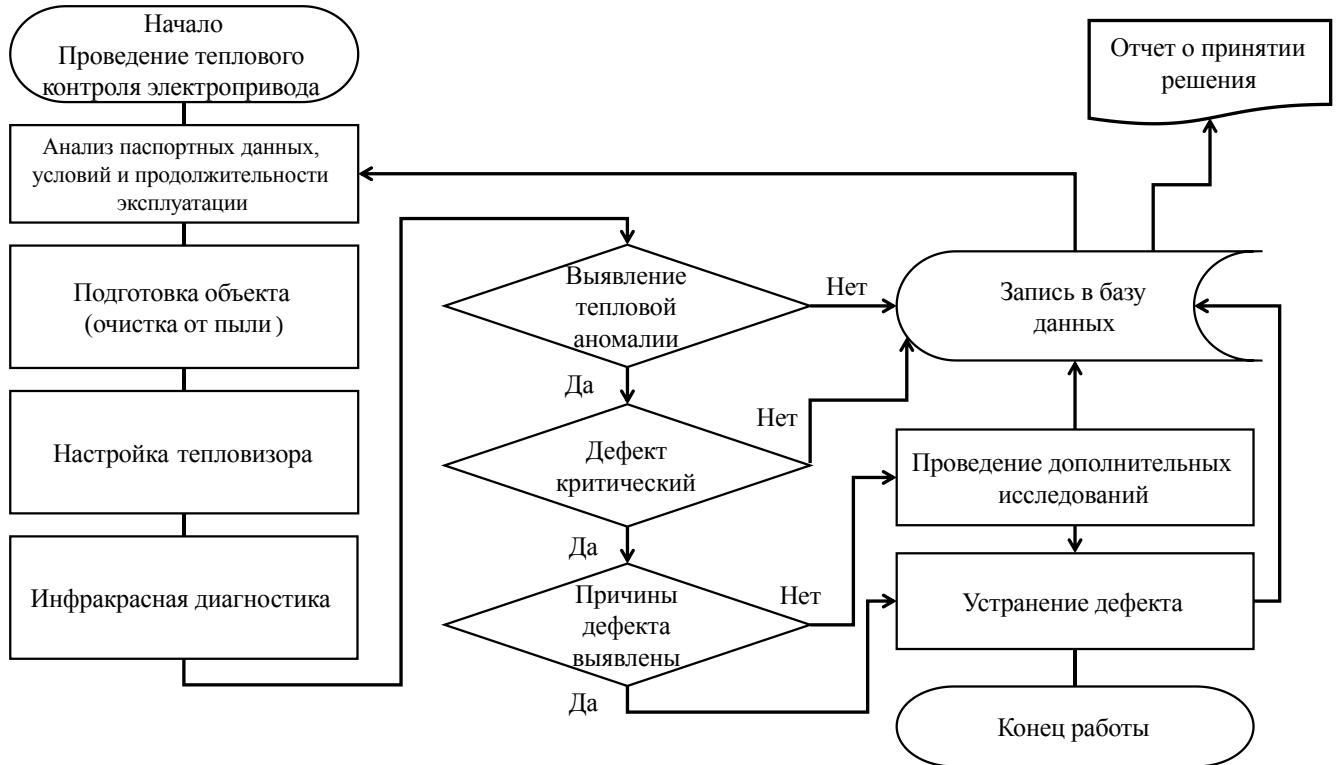


Рисунок 4.13. – Алгоритм проведения теплового обследования оборудования

Перед проведением обследования оператор-термографист проводит анализ паспортных данных оборудования, условий эксплуатации, и анализирует сведения о прошедших ремонтах.

Регламент проведения теплового обследования включает периодичность обследований группы однотипного оборудования, с учетом характера нагрузки. Тепловое обследование должно производиться на работающем оборудовании не ранее чем через 30 мин после запуска. Редукторы шахтных ленточных конвейеров перед обследованием должны быть очищены от угольной и инертной пыли.

Настройка тепловизора производится путем внесения коэффициента излучения ε , отраженной температуры посторонних источников (при наличии), и температуры окружающей среды. Настройка и подбор верного коэффициента излу-

чения проводится путем сравнения кажущейся температуры, воспроизводимой тепловизором и температурой измеренной контактным термометром.

После настройки параметров и фокуса объектива производится инфракрасная съемка под углом близким к нормали. Данные сохраняются с привязкой к объекту исследования. Обработка и анализ термограмм проводится в камеральных условиях в специализированной программе, например, FLIR QUICK REPORT.

В условиях горного производства для получения необходимой информации об изменении состояния машины достаточно использовать методы сравнительной термографии, без получения точного значения абсолютной температуры. Указанный метод позволяет обнаружить разницу в работе машины, при минимальных требованиях к условиям измерения. Качество и достоверность получаемой информации зависит как от применяемого инструмента и алгоритма обработки данных, так и от квалификации оператора [116].

Анализ температурных аномалий результатов инфракрасной термографии позволяет использовать критерии оценки технического состояния на основе определения разности температур, (критерий ΔT) а также на основе максимально допустимой температуры, (критерий T_{max}).

Предварительные оценки категории технического состояния, созданные на анализе термограмм редукторов ленточных конвейеров, исследованы в работах [2, 117 – 119] и приведены в таблице 4.6.

Внешний вид термограмм редукторов шахтного ленточного конвейера приведен на рисунке 4.14.

Таблица 4.6 – Категории технического состояния редукторов по результатам теплового контроля

Температурная аномалия, ΔT , °C	Фактическая температура смазки, T_{max} , °C	Категории технического состояния
0 – 5	Не более 80	Категория А – хорошее состояние
5 – 10	80 – 90	Категория В – ограниченно работоспособное
10 – 15	90 – 100	Категория С – критическое состояние, дополнительная диагностика
Более 15	Более 100 – 110	Категория D – недопустимое состояние, требуется оперативное вмешательство

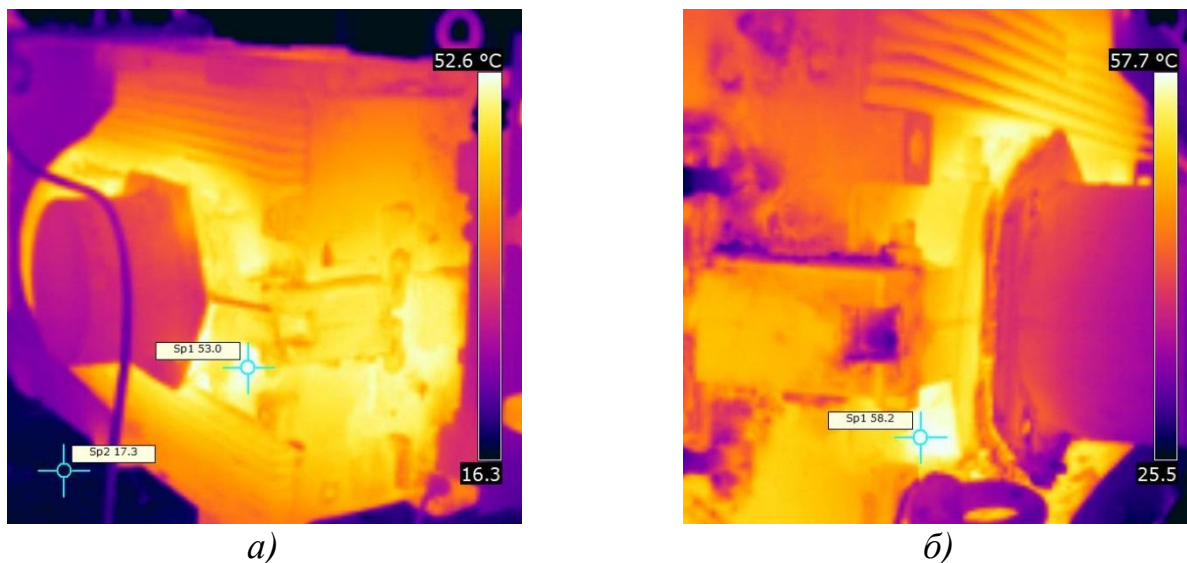


Рисунок 4.14 – Термограммы редукторов одного привода в хорошем техническом состоянии: а) – температура 53,0°C, б) – температура 58,2 °C

В случае выявления температурной аномалии, проводится оценка возникшего дефекта, если дефект признан критическим и ясна причина его возникновения, необходимо устранить дефект. Если причина не ясна, требуется провести дополнительное обследование методами вибрационной диагностики и провести анализ параметров смазочного масла. Информация поступает в базу данных для последующего анализа и корректировки критериев оценки термограмм, а также выводится отчет для принятия решения о необходимости проведения того или иного воздействия на редуктор ленточного конвейера, с целью предотвращения его аварийного выхода из строя.

4.4. Апробация методики оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров по параметрам вибрации, результатам инфракрасной термографии и параметрам смазочного масла

Диагностика или систематический мониторинг состояния позволяют не только выявлять дефекты на ранней стадии, что сокращает объемы, трудоемкость, и соответственно, травмоопасность восстановительных работ, но и обеспечивать стабильную безопасность персонала [120].

Применение методов неразрушающего контроля, в частности, вибродиагностики для определения фактического технического состояния горных машин, позволяет увеличить ресурс работы оборудования за счет исключения операций демонтажа и разборки, а также сопутствующих им режимов приработки [121]. Однако, в работе [122] Андреева Л.И. показывает, что на основе результатов только широкополосных измерений нельзя обнаружить изменения состояния машинного оборудования до того, как увеличивающаяся амплитуда определенной гармоникой достигнет уровня составляющей с самой большой амплитудой.

В работе [123] Реутов А.А. показывает, что, для ленточных конвейеров с несколькими приводными блоками в зависимости от наличия или отсутствия дуги относительного покоя на втором по ходу движения приводном барабане, реализуется различная сила тяги на каждом барабане. В итоге различную нагрузку будут воспринимать редукторы этих приводных барабанов.

На основании диагностических параметров возможно формирование подсистемы управления техническим состоянием машины, как части системы управления процессом добычи и транспортирования полезного ископаемого. Так в работе [124] авторы описывают создание подсистемы управления приводами проходческой горной машины, осуществляющей диагностику ее технического состояния, интегрированную в общую систему управления.

Таким образом, подтверждается необходимость проведения комплексного обследования, включая анализ спектров вибрации.

Результаты комплексного обследования параметров смазочного масла, вибрации и инфракрасного излучения редукторов Moventas Santasalo D3RST82XO приведены в работах [125–135].

Рассмотрим результаты мониторинга параметров смазочного масла для редукторов ленточного конвейера 3ЛЛ1600 с расположением приводных блоков Р3, Р4, Р5, представленном на рисунке 4.15.

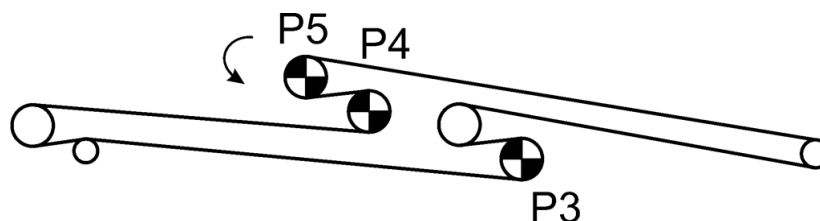


Рисунок 4.15. Схема расположения приводных блоков на конвейере 3ЛЛ1600

Параметры смазочного масла представлены в таблицах 4.8 – 4.12 и на рисунках 4.16 – 4.21.

Параметры смазочного масла представлены в таблицах 4.7 – 4.11 и на рисунках 4.16 – 4.21.

Таблица 4.7 – Значения кинематической вязкости масла, мм²/с

№ Редуктора	Температура, °С	Дата	15.03.13	15.04.14	18.09.14	04.12.14	17.06.15	20.10.15	13.04.17	10.10.17
	Наработка, ч		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
P3	40		320	321,9	317,3	324,2	377,5	380	386	383
	100		24,5	25,5	24,5	24,8	26,7	25,5	26	24
P4	40		297,5	321,9	343,2	329,9	371,5	346,1	411	345
	100		24,5	24,67	26	25,5	23,17	24,5	25	26
P5	40		328,5	336,9	345,4	361,5	350	340	350	340
	100		25,33	24,17	25	23,2	23,7	24	23,7	24

Таблица 4.8 – Значения температуры вспышки масла, град. С

№ Редуктора	Дата	15.03.13	15.04.14	18.09.14	04.12.14	17.06.15	20.10.15	13.04.17	10.10.17
	Наработка, ч	0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
P3		255	253	230	224	217	227	220	230
P4		255	245	238	225	216	224	222	219
P5		260	240	230	225	221	232	223	224

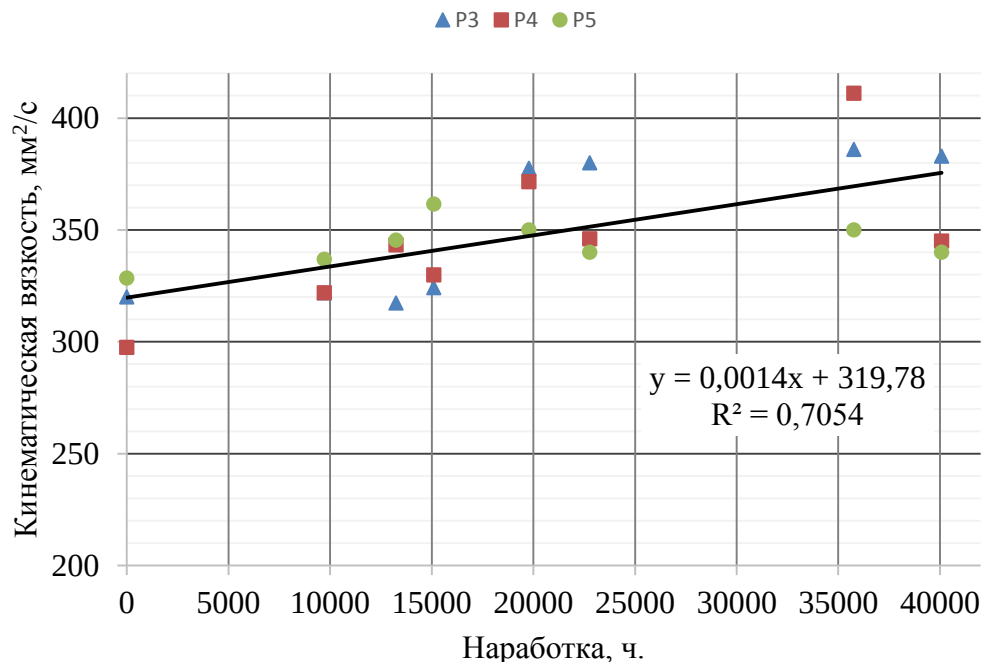


Рисунок 4.16. – График изменения кинематической вязкости масла в редукторах от наработки

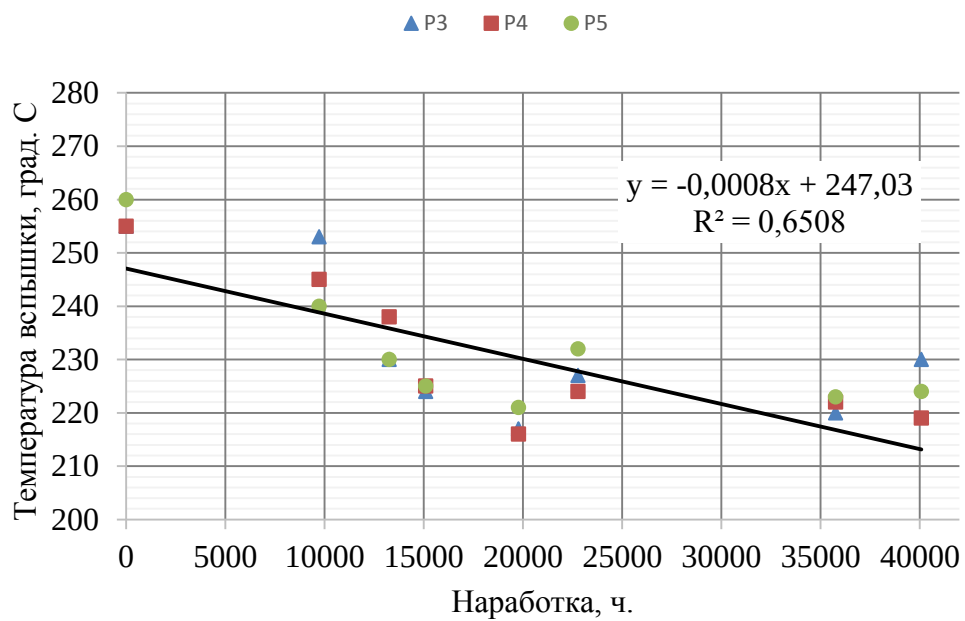


Рисунок 4.17. – График изменения температуры вспышки смазочного масла в редукторах от наработки

Таблица 4.9 – Содержание механических примесей в масле редуктора РЗ, г/т

Элементы	Дата	15.03.13	15.04.14	18.09.14	04.12.14	17.06.15	20.10.15	13.04.17	10.10.17
	Предельное содержание								
Наработка, ч		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
Fe	200	1,468	40,98	95,17	78,02	39,15	42,57	56,11	114,3
Si	30	6,134	33,41	35,19	41,48	37,02	38,92	35,73	39,68
Cu	15	2,92	12,48	7,03	0,32	6,47	9,41	0,45	11,14
Al	7	0,0678	1,48	1,41	1,84	1,44	1,53	2,61	3,689
Cr	5	0,1733	1,24	1,08	1,56	0,79	1,09	1,23	2,04
Pb	5	0	1,71	0,43	1,99	3,24	1,8	8,67	9,391
Sn	5	0	1,55	6,88	6,95	4,79	8,18	7,19	6,57

Таблица 4.10 – Содержание механических примесей в масле редуктора Р4, г/т

Элементы	Дата	15.03.13	15.04.14	18.09.14	04.12.14	17.06.15	20.10.15	13.04.17	10.10.17
	Предельное содержание								
Наработка, ч		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
Fe	200	2,486	71,94	93,43	37,17	45,625	104	145,5	267,1
Si	30	13,24	40,79	39,24	37,83	38,79	42,19	35,12	44,52
Cu	15	0,1784	7,01	5,39	2,54	13,88	4,4	4,12	17,48
Al	7	0,2416	1,54	1,69	1,8	1,698	1,77	2,6	3,13
Cr	5	0,0178	0,93	0,95	0,69	0,842	0,81	1,45	2,47
Pb	5	0	2,10	1,65	3,29	3,731	1,56	4,36	8,54
Sn	5	0,004	4,13	6,94	6,78	3,834	6,45	8,97	8,72

Таблица 4.11 – Содержание механических примесей в масле редуктора Р5, г/т

Элементы	Дата	15.03.13	15.04.14	18.09.14	04.12.14	17.06.15	20.10.15	13.04.17	10.10.17
	Предельное содержание								
Наработка, ч		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
Fe	200	0,678	37,98	64,9624	45,189	57,81	69,24	28,83	40,68
Si	30	10,141	41,06	42,41	34,52	37,29	41,68	32,65	37,65
Cu	15	4,12	6,098	6,285	0,58	7,612	9,874	1,07	5,347
Al	7	0,19	1,866	2,144	1,438	1,542	1,689	2,24	3,114
Cr	5	0,307	0,850	0,828	1,237	1,547	1,687	0,515	1,254
Pb	5	0	2,542	0,3913	3,334	2,149	3,981	4,28	6,325
Sn	5	0	2,675	8,036	5,677	6,983	8,111	6,73	4,359

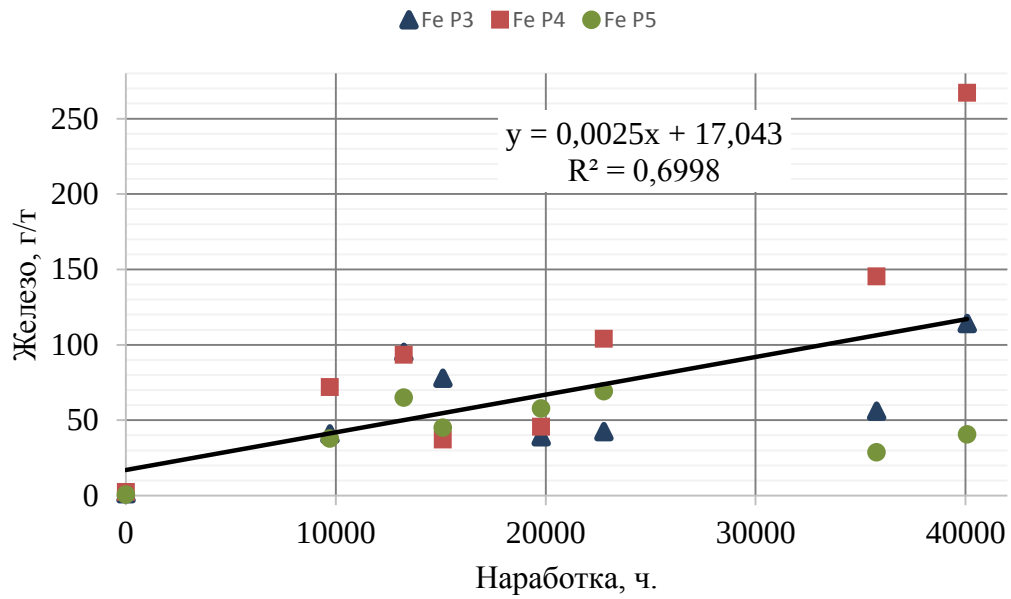


Рисунок 4.18. – График изменения содержания железа в масле редукторов

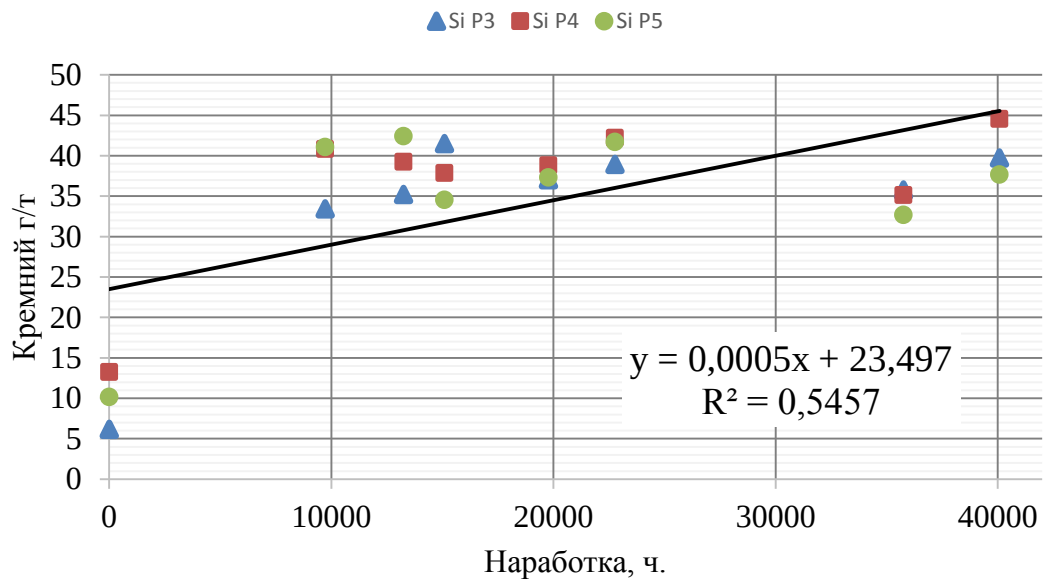


Рисунок 4.19. – График изменения содержания кремния в масле редукторов

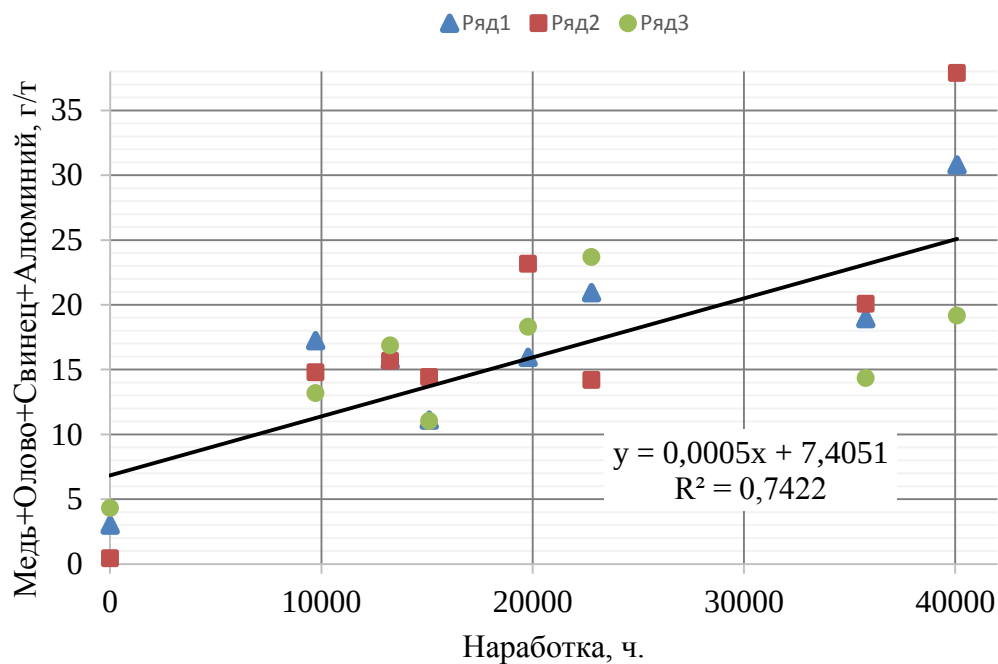


Рисунок 4.20. – График изменения содержания совокупности цветных металлов (медь, олово, свинец, алюминий) в масле редукторов

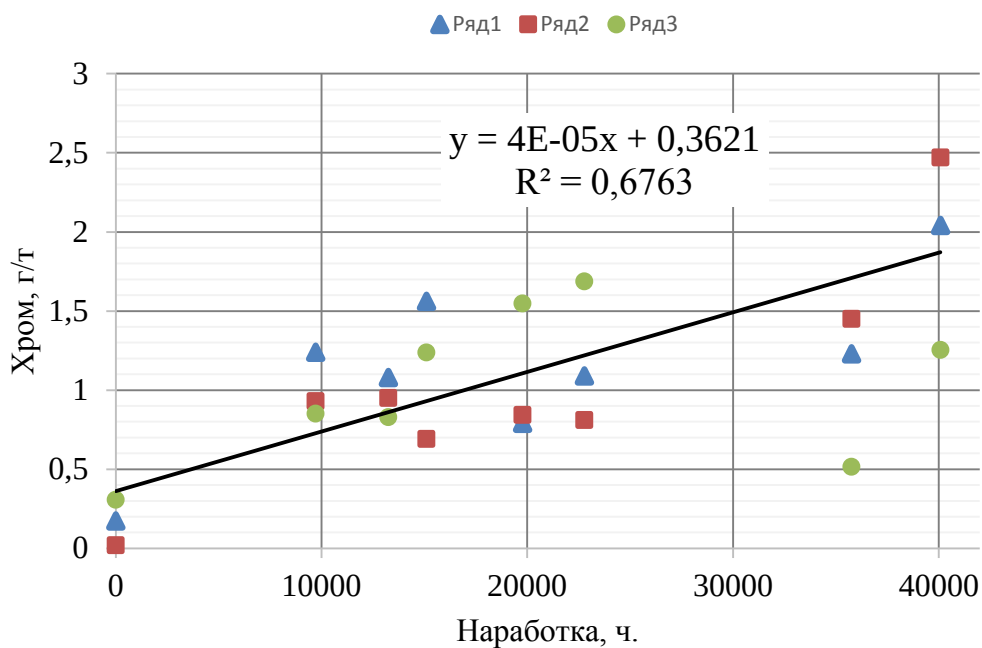


Рисунок 4.21. – График изменения содержания хрома в масле редукторов

Анализ графиков изменения характерных параметров масла и усредненных линий трендов (рисунки 4.16 – 4.21) показывает приемлемые коэффициенты детерминации (R^2 не менее 0,5) для накопления кремния и хрома и изменения тем-

пературы вспышки масла и хорошие (R^2 не менее 0,7) для накопления совокупности цветных металлов, железа и изменения кинематической вязкости.

Измерения параметров вибрации для регламентированных точек замера вибрации (см. рисунок 4.6) проводились в те же даты, что и отбор проб масла и представлены в таблицах 4.12 – 4.14 и на рисунках 4.22 – 4.25.

Таблица 4.12 – Изменение уровня виброскорости, мм/с на частотах, характеризующих определенный износ узлов редуктора РЗ от наработки

Параметры	Дата	15.03. 2013	15.04. 2014	18.09. 2014	04.12. 2014	17.06. 2015	20.10. 2015	13.04. 2017	10.10. 2017
Наработка, ч		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
На частоте сепаратора подшипника быстроходного вала		0,0822	0,0421	0,0683	0,0975	0,1093	0,2311	0,4835	0,4008
На частоте наружного кольца подшипника быстроходного вала		0,0136	0,0178	0,0271	0,0289	0,1936	0,0727	0,262	0,2368
На частоте зубозацепления 1 пары		0,1153	0,3581	0,6998	0,5202	0,9981	1,0045	1,6238	1,311
На частоте зубозацепления 2 пары		0,3193	0,2149	0,1419	0,1196	0,4202	0,1372	1,4875	1,2163

Таблица 4.13 – Изменение уровня виброскорости, мм/с на частотах, характеризующих определенный износ узлов редуктора Р4 от наработки

Параметры	Дата	15.03. 2013	15.04. 2014	18.09. 2014	04.12. 2014	17.06. 2015	20.10. 2015	13.04. 2017	10.10. 2017
Наработка		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
На частоте сепаратора подшипника быстроходного вала		0,0516	0,0617	0,1338	0,1576	0,1467	0,2555	0,588	0,5535
На частоте наружного кольца подшипника быстроходного вала		0,0669	0,116	0,2572	0,0875	0,0983	0,1227	0,0937	0,1657
На частоте зубозацепления 1 пары		0,0943	0,3439	0,8469	1,1753	2,7214	2,5429	2,1354	1,9577
На частоте зубозацепления 2 пары		0,1874	0,2571	0,1715	0,5755	0,8496	0,7926	0,7623	0,9811

Таблица 4.14 – Изменение уровня виброскорости, мм/с на частотах, характеризующих определенный износ узлов редуктора Р5 от наработки

Параметры	Дата	15.03. 2013	15.04. 2014	18.09. 2014	04.12. 2014	17.06. 2015	20.10. 2015	13.04. 2017	10.10. 2017
Наработка		0	9720	13248	15096	19776	22776	35760	40080
На частоте сепаратора подшипника быстроходного вала		0,0732	0,0778	0,0897	0,1086	0,3051	0,2987	0,1085	0,1215
На частоте наружного кольца подшипника быстроходного вала		0,0399	0,0476	0,0642	0,1061	0,249	0,1765	0,1447	0,1874
На частоте зубозацепления 1 пары		0,0900	0,4711	0,7253	1,1312	1,347	1,1422	1,0044	0,9971
На частоте зубозацепления 2 пары		0,0681	0,0896	0,2045	0,6079	1,356	0,9754	0,6839	0,7820

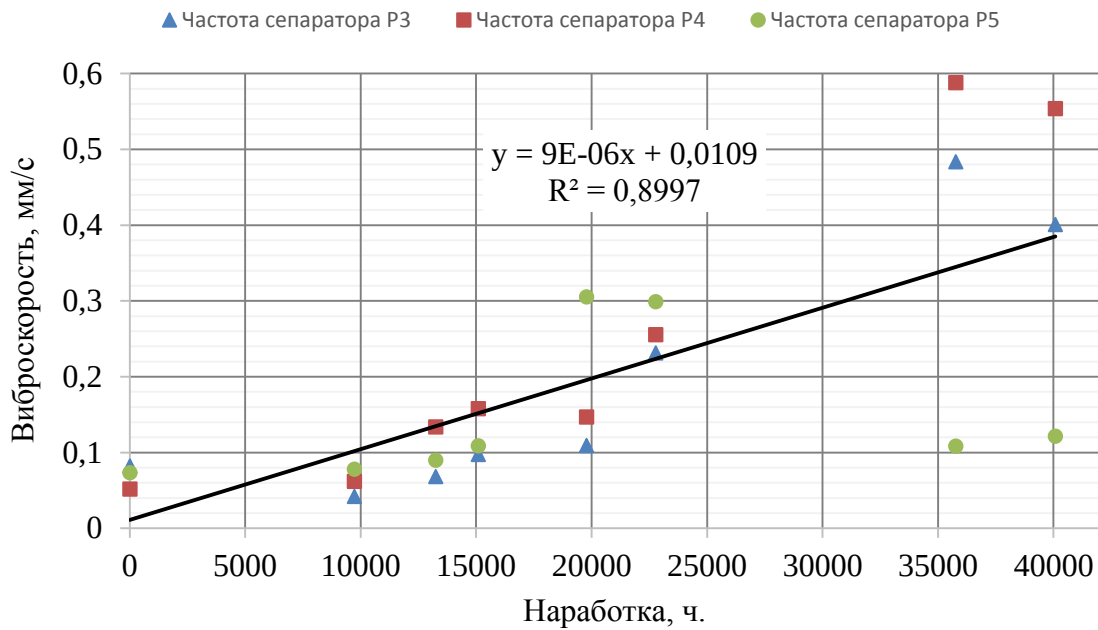


Рисунок 4.22 – График изменения уровня виброскорости на частоте сепаратора подшипника 1 вала от наработки

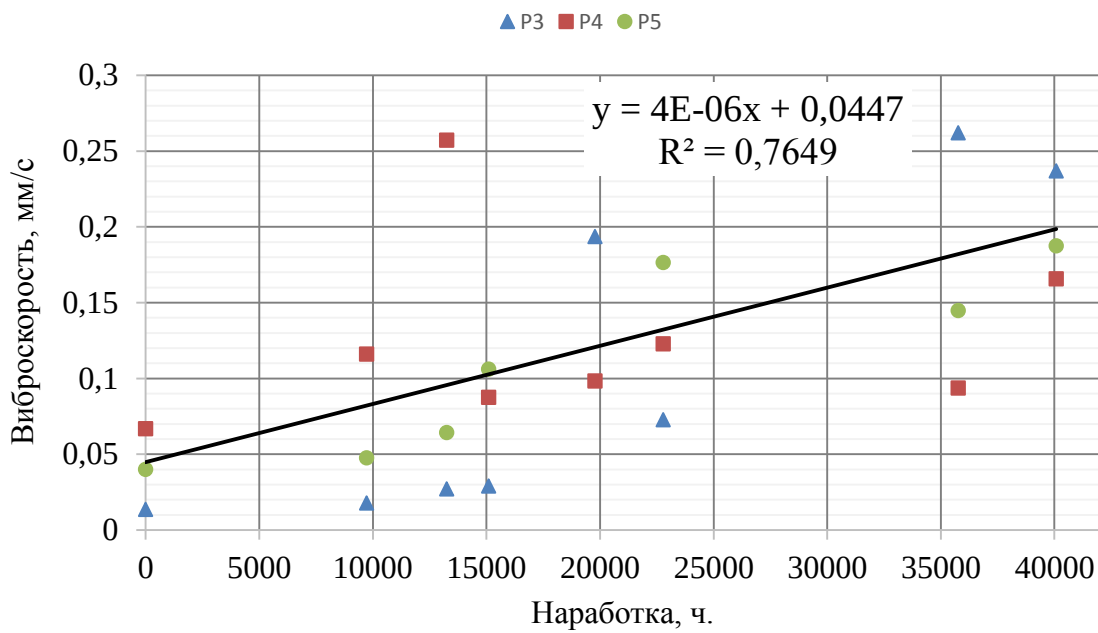


Рисунок 4.23 – График изменения уровня виброскорости на частоте наружного кольца подшипника 1 вала от наработки

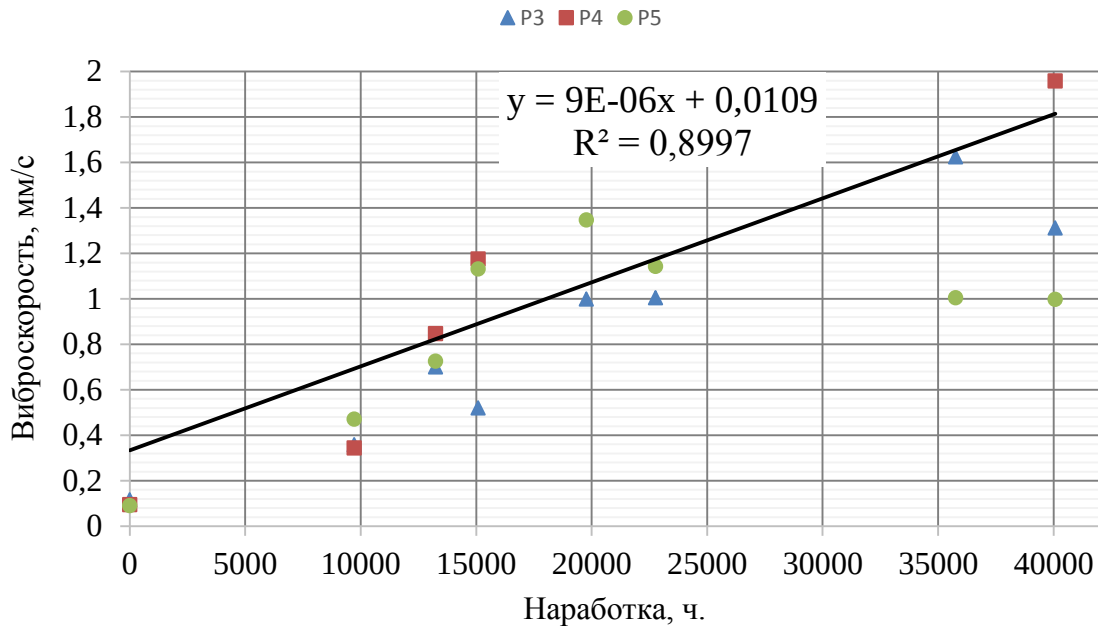


Рисунок 4.24 – График изменения уровня виброскорости на частоте зубозацепления первой зубчатой пары от наработки

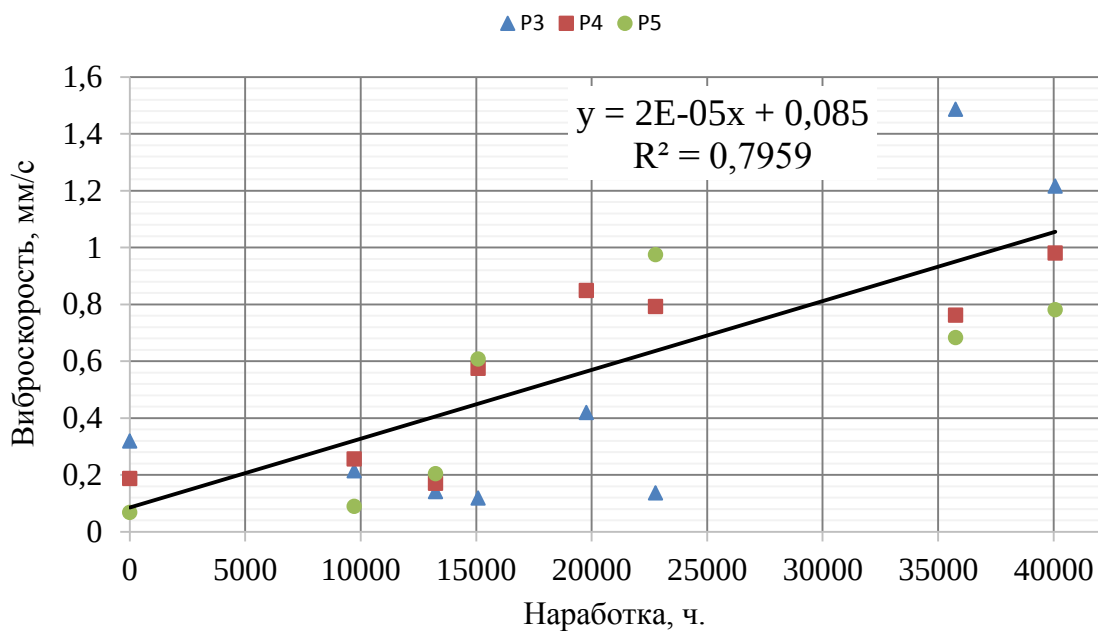


Рисунок 4.25 – График изменения уровня виброскорости на частоте зубозацепления второй зубчатой пары от наработки

Анализ графиков изменения уровней вибрации на характерных частотах от наработки и усредненных линий трендов (рисунки 4.22 – 4.25) показывает достаточно хороший уровень коэффициента детерминации (R^2 не менее 0,8) что подтверждает зависимость уровней вибрации от наработки.

На рисунках 4.26 – 4.28 представлены каскадные спектры изменения частотных компонент виброскорости, анализ спектров показывает увеличение уровня вибрации и расширение дополнительных боковых полос, что характерно для износа зубатой пары быстроходного вала. При этом интенсивность износа наименьшая у редуктора Р5, а наибольшая у редуктора Р4 [2]. Что показывает хорошую сходимость данных анализа вибрации с содержанием механических примесей в этих редукторах (см. таблицы 4.9 – 4.11).

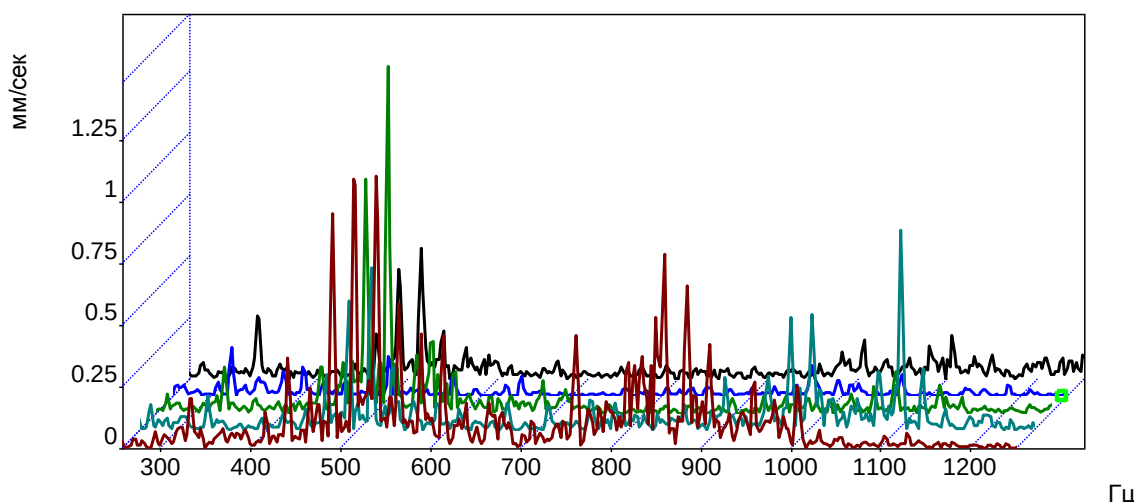


Рисунок 4.26 – Каскадный спектр виброскорости на частотах зубозацепления редуктора Р3

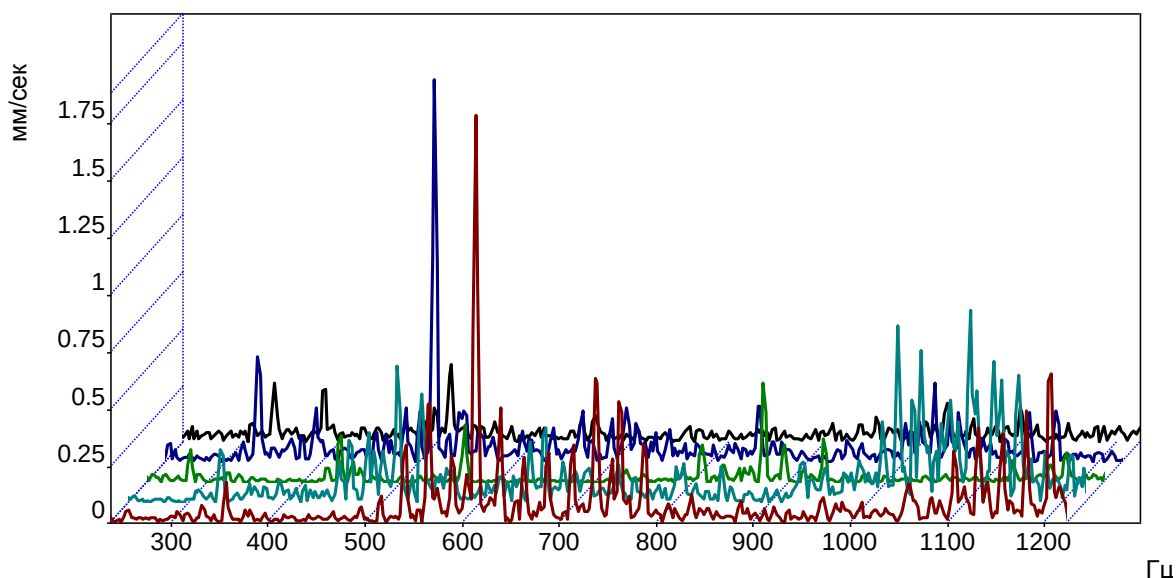


Рисунок 4.27 – Каскадный спектр виброскорости на частотах зубозацепления редуктора Р4

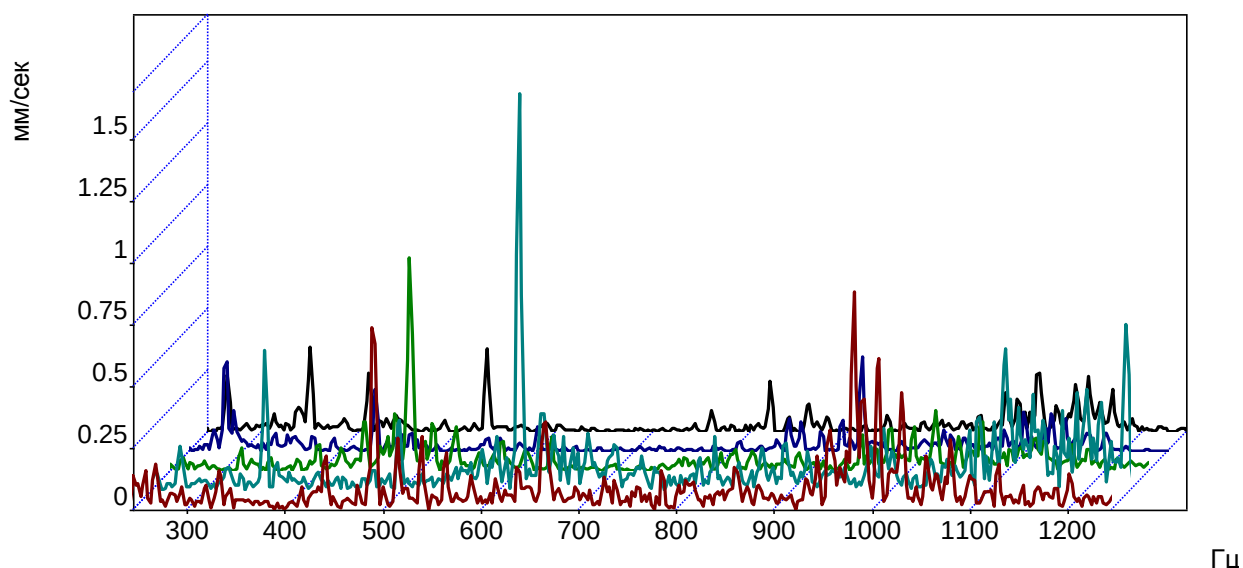


Рисунок 4.28 – Каскадный спектр виброскорости на частотах зубозацепления редуктора P5

Изменение параметров температуры редукторов приведено таблице 4.15. и на рисунке 4.29.

Анализ параметров теплового контроля показывает более высокую температуру и температурные аномалии для редуктора P4 (см. рисунок 4.29), а в общем состоянии редукторов по результатам инфракрасной термографии относится к зоне В (хорошее состояние).

Таблица 4.15 – Параметры теплового контроля редукторов P3 – P5

№ Редуктора	Параметры	Дата	15.04.2014	04.12.2014	20.10.2015	10.10.2017
	Наработка		9720	15096	22776	40080
P3	Температура масла $T_{\text{масла}}$, °C		55,2	48,8	66,0	48,6
	Температурные аномалии ΔT , °C		3,8	3,6	6,7	7,3
P4	Температура масла $T_{\text{масла}}$, °C		54,1	56,3	68,5	61,0
	Температурные аномалии ΔT , °C		4,2	4,1	7,1	10,2
P5	Температура масла $T_{\text{масла}}$, °C		52,4	54,5	59,2	47,1
	Температурные аномалии ΔT , °C		3,6	4,3	5,7	7,4

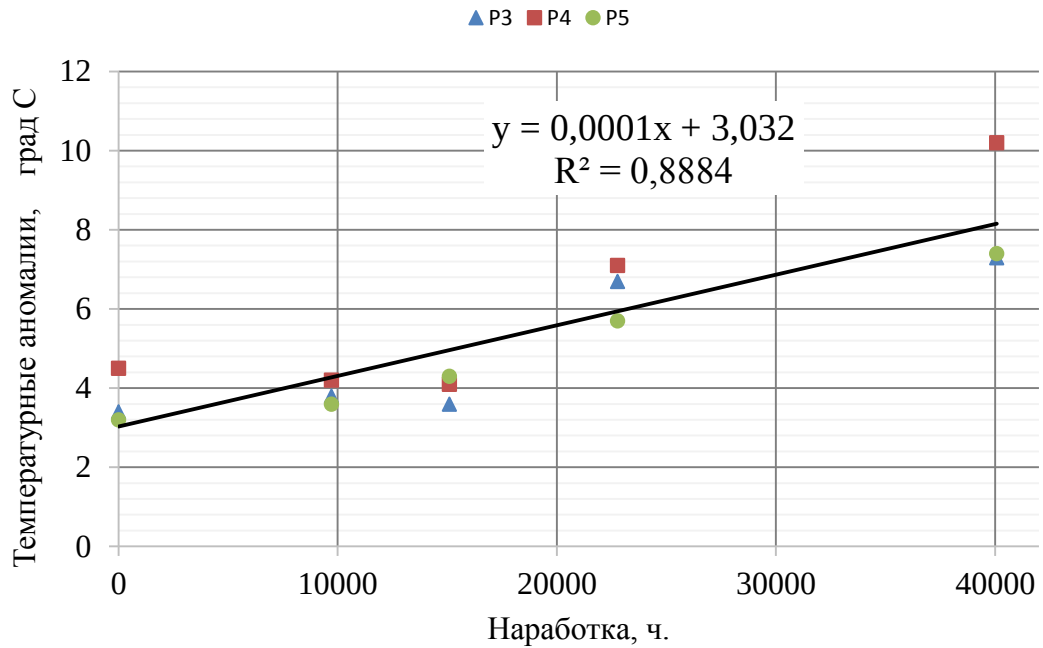


Рисунок 4.29 – График изменения температурных аномалий в редукторах от наработки

Анализ графиков изменения уровня температурной аномалии (ΔT , °C) от наработки и усредненной линии тренда (рисунок 4.29) показывает достаточно хороший уровень коэффициента детерминации (R^2 не менее 0,8) что подтверждает зависимость температурной аномалии от наработки.

Уровни значений диагностических параметров вибрации, смазочного масла и теплового контроля сведены в таблицу 4.16.

Первостепенное внимание требуется обращать на следующие параметры вибрации: общий уровень виброскорости, мм/с; уровень виброскорости на оборотной частоте f_r , и ее гармониках $2 \times f_r$, $3 \times f_r$ мм/с; уровни виброскорости на подшипниковых ($f_{сеп}$, $f_{нк}$) и зубовых частотах (f_{z1} , f_{z2}) мм/с.

Таблица 4.16 – Уровни значений диагностических параметров редуктора

Зона	Общий уровень вибрации $V_{скз}$, мм/с	Виброскорость на частоте сепаратора $f_{сеп}$, мм/с	Виброскорость на частоте наружного кольца $f_{нк}$, мм/с	Виброскорость на зубцовой частоте 1 вала f_{z1} , мм/с	Виброскорость на зубцовой частоте 2 вала f_{z2} , мм/с
A	0-2,8	0-0,25	0-0,05	0-0,5	0-0,25
B	2,8-4,5	0,25-0,5	0,05-0,15	0,5-0,8	0,25-0,5
C	4,5-7,1	0,5-0,75	0,15-0,25	0,8-1,5	0,5-0,75
D	7,1-11,2	0,75-1,0	0,25-0,5	1,5-2,0	0,75-1,0
E	>11,2	>1,0	>0,5	>2,0	>1,0
	Fe, г/т	Si, г/т	Cu, г/т	Al, г/т	Cr, г/т
A	0-20	0-5	0-3,75	0-1,7	0-1,25
B	20-50	5-10	3,75-7,5	1,7-3,5	1,25-2,5
C	50-100	10-20	7,5-11,25	3,5-5,0	2,5-3,75
D	100-200	20-30	11,25-15	5,0-7,0	3,75-5,0
E	>200	>30	>15	>7,0	>5
	Sn, г/т	Отклонение вязкости $\Delta\nu$, (мм ² /с)	Температура вспышки масла $T_{всп}$, °C	Температура масла T_m , °C	Температурная аномалия ΔT , °C
A	0-1,25	8	255-250	80	0-5
B	1,25-2,5	16	250-240	80-90	5-10
C	2,5-3,75	24	240-230	90-100	10-15
D	3,75-5,0	32	230-220	100-110	15-20
E	>5	>32	<220	>110	>20

Методом множественной корреляции были выявлены наиболее значимые диагностические параметры при одновременном их сокращении для анализа деградации подшипниковых узлов и зубчатых передач редуктора.

Для прогноза деградации подшипниковых узлов используется критерий суммарного уровня вибрации на частотах сепаратора и наружного кольца подшипника

$$K_b = f_{сеп} + f_{н.к}, \quad (4.1)$$

После расчета множественной корреляции и построении регрессионной модели были выявлены наиболее значимые факторы и построено линейное уравнение регрессии для трех факторов (см. формулу 4.2).

$$K_b = -0,369 + 0,002 \cdot x_1 + 0,124 \cdot x_2 + 0,0059 \cdot x_3; \text{ при } x_2 \geq 5 \quad (4.2)$$

где параметры x_i – представлены в таблице 4.17.

Коэффициент множественной корреляции составляет $R=0,969$.

Коэффициент детерминации $R^2=0,939$.

Таблица 4.17 – Параметры регрессионной модели износа подшипников редуктора

x_1	x_2	x_3
Суммарное содержание механических примесей Cu+Al+Pb+Sn, г/т	Температурная аномалия ΔT , °C	Наработка, тыс. ч

График зависимости критерия деградации K_b от наработки представлен на рисунке 4.30

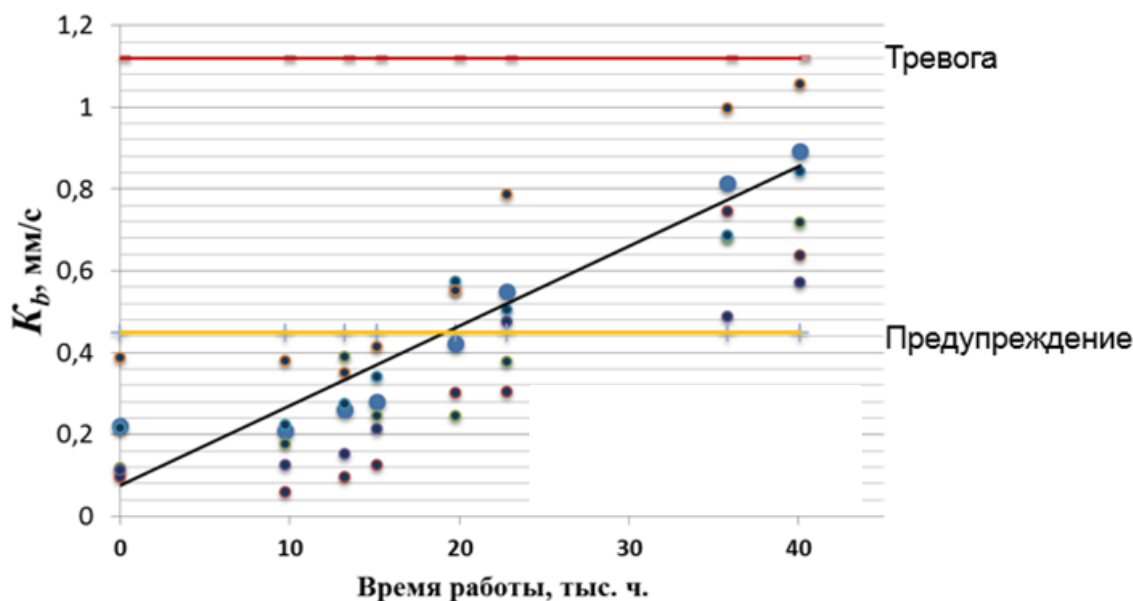


Рисунок 4.30. – График тренда износа подшипников редуктора

Для прогноза деградации зубчатых передач используется критерий суммарного уровня вибрации на частотах зубозацепления первой и второй зубчатых пар

$$K_g = f_{z1} + f_{z2}, \quad (4.3)$$

После расчета множественной корреляции и построении регрессионной модели были выявлены наиболее значимые факторы и построено линейное уравнение регрессии для трех факторов (см. формулу 4.4).

$$K_g = -0,331 + 0,0344x_1 + 0,0198x_2 + 0,0129x_3, \text{ при } x_1 \geq 8; \quad x_2 \geq 5, \quad (4.4)$$

где параметры x_i – представлены в таблице 4.18.

Коэффициент множественной корреляции составляет $R=0,962$.

Коэффициент детерминации $R^2=0,925$.

Таблица 4.18 – Параметры регрессионной модели износа зубчатых пар редуктора

X_1	X_2	X_3
Отклонение вязкости Δv , $\text{мм}^2/\text{с}$	Содержание механических примесей кремния Si , г/т	Наработка, тыс. ч

График зависимости критерия деградации K_g от наработки представлен на рисунке 4.31.

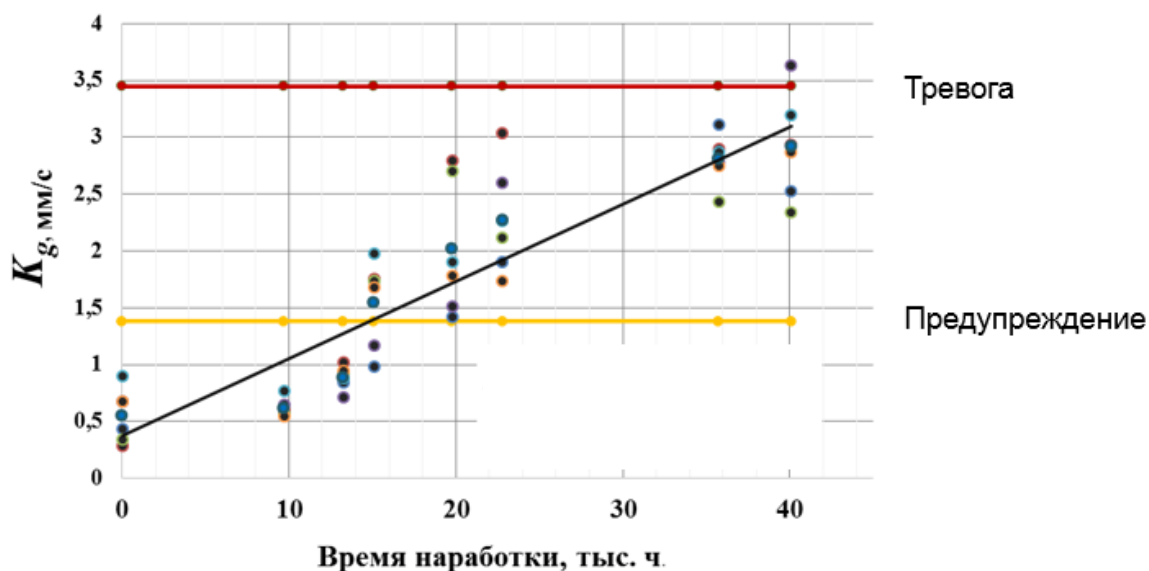


Рисунок 4.31. – График тренда износа зубчатых пар редуктора

Таким образом, разработанная прогностическая модель позволяет определять с доверительной вероятностью 90% переход состояния редуктора шахтного ленточного конвейера в неисправное состояние, для предотвращения его unplanned остановки из-за отказа.

Диаграмма технического состояния по основным диагностическим признакам и необходимое ремонтное воздействие при превышении параметров приведены на рисунках 4.32, 4.33.

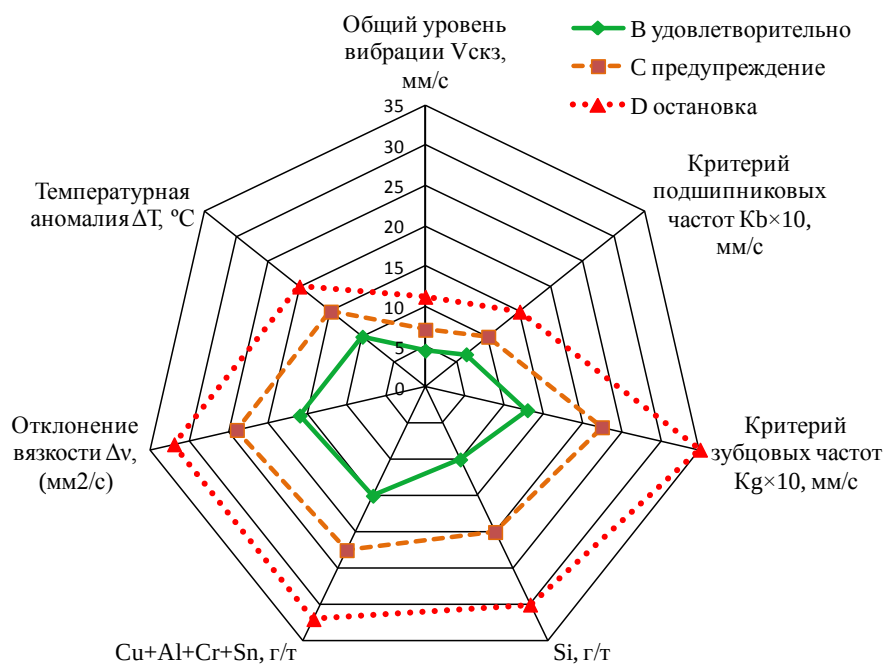


Рисунок 4.32. – Диаграмма технического состояния редуктора по основным диагностическим признакам

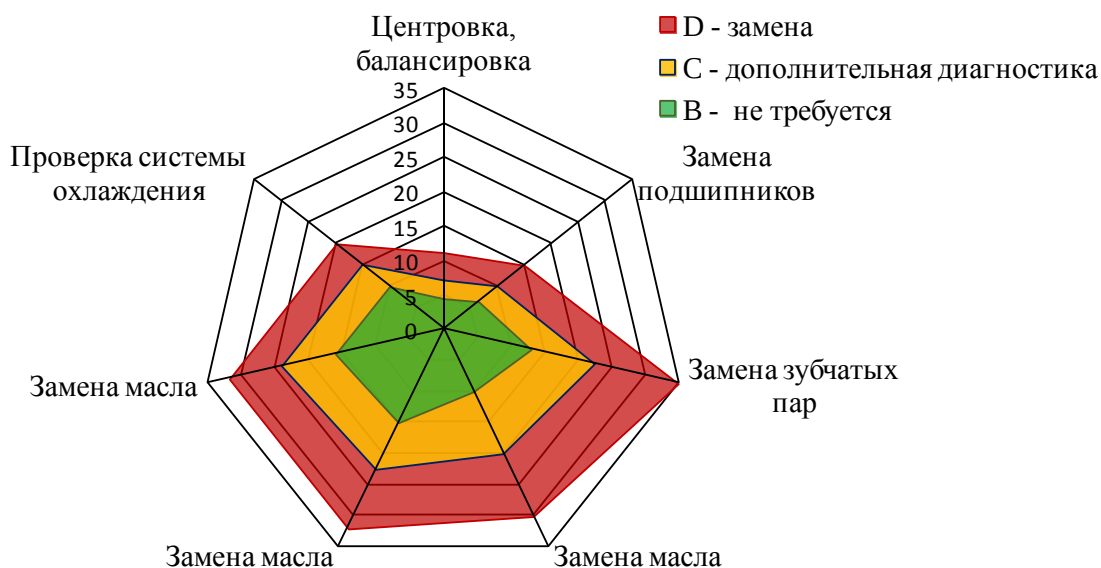


Рисунок 4.33. – Диаграмма ремонтного воздействия при превышении параметров

Техническое и ремонтное воздействие, проводимое по фактическому техническому состоянию элементов системы, позволяет повышать эксплуатационную надежность. Так, своевременная замена смазочного масла, проведение центровки и балансировки, очистка элементов системы охлаждения, корректируют диагностические параметры и позволяют повысить остаточный ресурс системы.

Методика оценки технического состояния редукторов используется на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» см. приложение.

4.5. Основные итоги и выводы

1. Рассмотрены параметры редукторов шахтных ленточных конвейеров Moventas Santasalo D3RST82XO для оценки их технического состояния методом анализа параметров вибрации с использованием плавающих опорных масок.

2. Разработана методика оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров по параметрам виброакустического сигнала, смазочного масла и температуры масла и подшипниковых узлов, обеспечивающая при требуемой достоверности (90%) построение трендов диагностических параметров износа подшипников и зубчатых передач для прогнозирования остаточного ресурса.

3. Получены прогностические модели изменения фактического технического состояния для редукторов P3, P4, P5 по комплексным показателям K_b и K_g .

4. Определены сроки проведения технического обслуживания редукторов P3, P4, P5.

5. Проведена промышленная апробация методики на шахте «Талдинская-Западная 1» для редукторов D3RST82XO ленточных конвейеров ЗЛЛ-1600.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненного автором исследования, установлена зависимость фактического технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров от параметров вибрации, теплового контроля, смазочного масла, позволяющая прогнозировать их остаточный ресурс, дается решение актуальной научной задачи повышения эксплуатационной надежности редукторов шахтных ленточных конвейеров, имеющей существенное значение для горнодобывающей отрасли.

Основные выводы, практические и научные результаты сводятся к следующему:

1. Установлено, что простои ленточных конвейеров из-за отказов редукторов составляют около 12%, а среднее время восстановления составляет 21,2 часа, таким образом, высокая аварийность и низкая ремонтпригодность редукторов требуют внедрения систем технического обслуживания по фактическому техническому состоянию.

2. Определены методы диагностирования и разработаны критерии оценки фактического технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров, включая «плавающие опорные маски» вибрационного сигнала для частотно-регулируемых приводов, аномалии в температурах сопряженных элементов и содержание примесей в смазывающих материалах.

3. Установлены предельные уровни критериев износа составляющие: для подшипников $K_b = 1,15$ мм/с, для зубчатых передач $K_g = 3,5$ мм/с.

4. Установлена предельно допустимая температурная аномалия при контроле поверхности корпуса редуктора методом инфракрасной термографии $\Delta T = 15$ °C.

5. Доказано, что наиболее приемлемым методом оценки технического состояния редукторов является комплексный метод, учитывающий параметры вибрации, с учетом изменения частоты вращения приводного двигателя в соот-

ветствии с нуждами технологического процесса, характеристики смазочного масла и аномалии температуры. Тем самым увеличивается глубина диагностического подхода связанная с отличительными особенностями приводов конвейера.

6. Установлены параметры регрессионных моделей определяющих факторов с показателями достоверности не менее 90%, пригодные для прогнозирования остаточного ресурса подшипниковых узлов и зубчатых передач редукторов.

7. Разработана методика оценки технического состояния редукторов по параметрам виброакустического сигнала, смазочного масла и температуры масла и подшипниковых узлов, обеспечивающая при требуемой достоверности (90%) построение трендов диагностических параметров подшипниковых узлов и зубчатых передач для прогнозирования их остаточного ресурса, позволяющая назначать соответствующее техническое и ремонтное обслуживание.

8. Проведена промышленная апробация методики на шахте «Талдинская-Западная 1» для редукторов D3RST82XO ленточных конвейеров 3ЛЛ-1600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин, В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запенин, Е.Е. Шешко // 2-е изд. – М.: «Горная книга», – 2011. – библиография: с. 539. – ISBN 978-5-98672-209-2.
2. Кузин, Е.Г. Мониторинг технического состояния редукторов частотно-регулируемого электропривода шахтных ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин, Б.Л. Герике // Горные науки и технологии. – 2016. – № 1. – С. 13-18.
3. Галкин В.И. Транспортные машины: Учебник для вузов: / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко – 2010 – 585 с.
4. Семенча, П. В. Редукторы горных машин. Конструкции, расчет и испытания [Текст]: монография / П.В. Семенча, Ю.А. Зислин. – Москва: Недра, 1990. – 237 с.: ил + табл. – Библиогр: с. 232-233 ISBN 5-247-00414-0.
5. Спиваковский, А.О. Теория ленточных конвейеров / А.О. Спиваковский – М.: 1982.
6. Дьяков, В.А. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, И.В. Запенин, А.О. Спиваковский. – М.: Недра 1982. – 349 с.
7. Потапов, М.Г. Направления развития карьерного транспорта / М.Г. Потапов // Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/napravleniya-razvitiya-kariernogo-transporta>.
8. Галкин, В.И. Определение динамических нагрузок на роlikоопорах ленточных конвейеров / Сб. Шахтный и карьерный транспорт. – М., Недра, 1986, С. 112-116.
9. Галкин, В.И. Ленточные конвейеры на современном этапе развития горной техники / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко // Горный журнал. – 2017. – № 9. – С. 85-90.
10. Галкин, В.И. Методы расчета и оценка показателей надежности ленточных конвейеров горных предприятий. Дисс. докт. техн. наук: 05.05.06: Галкин Владимир Иванович. – М. 2000 – 421 с. Режим доступа:

<https://www.dissercat.com/content/metody-rascheta-i-otsenka-pokazatelei-nadezhnosti-lentochnykh-konveierov-gornyx-predpriyati/read>.

11. Галкин, В.И. Уточнение расчёта коэффициента сопротивления движению ленточных конвейеров / В.И. Галкин, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев // «Сб. Конвейерный транспорт». – Киев, «Наукова думка АНУССР», 1978, – С. 83-87.
12. Шахмейстер, Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев // – М.: Машиностроение, 1978. – 392 с. : ил.
13. Захаров, А.Ю. Вибрация ленты и рабочие процессы конвейера / А.Ю. Захаров, Н.В. Ерофеева // Вестник КузГТУ. – 2015. – №6. – С. 78-82.
14. Захаров, А.Ю. Системы магнитного подвеса в ленточных конвейерах для транспортирования крупнокусковой горной массы. Дисс. докт. техн. наук: 05.05.06: Захаров Александр Юрьевич – Кемерово, 2001. – 382 с.
15. Чепиков, П.В. Влияние геометрических параметров на выбор магнитного материала в системе магнитного подвеса / П.В. Чепиков, А.Ю. Захаров // В сборнике: Россия молодая Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. 2015. – С. 95.
16. Захаров, А.Ю. Определение критической величины сопротивления вращению конвейерных роликов / А.Ю. Захаров, Д.А. Ширямов // Горное оборудование и электромеханика. 2016. – № 1 – (119). – С. 3-8.
17. Юрченко, В.М. Совершенствование узлов ленточного конвейера для уменьшения износа ленты / В.М. Юрченко // В сборнике: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс. Сборник материалов XVI международной научно-практической конференции. 2016. – С. 57.
18. Юрченко, В.М. Центрирование конвейерных лент / В.М. Юрченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. – № S48. – С. 329-335.
19. Yurchenko V. Belt Aligning Revisited / V Yurchenko // В сборнике: E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. 2017.
20. Хачатрян, С.А. Анализ надежности конвейерных лент на ОАО «Воркутауголь» / С.А. Хачатрян. Неделя горняка 2002. Семинар №16. Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-nadezhnosti-konveyernyh-lent-na-shahtah-oao-vorkutaugol> Заглавие с экрана. Дата обращения 21.09.2012.

21. Богданов, А.А. Надежность узлов загрузки ленточных конвейеров для угольных шахт. Дисс. канд. техн. наук 05.05.06. Богданов Алексей Александрович. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/nadezhnost-uzlov-zagruzki-lentochnykh-konveierov-dlya-ugolnykh-shakht#ixzz5erb2XTk8>.

22. Дьяченко, В.П. Исследование и повышение надежности роlikоопор ленточных конвейеров при транспортировании крупнокузовых грузов на горных предприятиях / В.П. Дьяченко – М., 1981. – 159 с. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/nadezhnost-uzlov-zagruzki-lentochnykh-konveierov-dlya-ugolnykh-shakht#ixzz5ercbiCuK>.

23. Кочнева, О. В. Повышение надежности загрузочных секций распределительных конвейеров обогатительных фабрик. Дисс. канд. техн. наук 05.05.06. Кочнева Ольга Владимировна. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-nadezhnosti-zagruzochnykh-sektsii-raspre-delitelnykh-konveierov-obogatitelnykh-fab#ixzz5ere9kXz1>.

24. Реутов, А.А. Разработка методов расчета и проектирования соединений лент конвейеров горных предприятий. Дисс. докт. техн. наук 05.05.06. Реутов Александр Алексеевич – Брянск, 2000 – 379 с.: ил.

25. Гери́ке, Б.Л. Распознавание технического состояния редукторов горно-транспортного оборудования / Гери́ке, Б.Л., В.И. Клишин, Е.Г. Кузин // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. – № 3. – С. 184-192.

26. Obuchowski, J et al., "Recent Developments in Vibration Based Diagnostics of Gear and Bearings Used in Belt Conveyors", Applied Mechanics and Materials, Vol. 683, pp. 171-176, 2014.

27. Bartelmus, W. "New Focus on Gearbox Condition Monitoring for Failure Prevention Technology", Key Engineering Materials, Vol. 588, pp. 184-191, 2014.

28. Mohanty, A.R. Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. XIX, 232 p.

29. Zhao, Ming & Jia, Xiaodong. (2017). A novel strategy for signal denoising using reweighted SVD and its applications to weak fault feature enhancement of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 94. 129-147. 10.1016/j.ymssp.2017.02.036.
30. Bartelmus, W. Computer-aided multistage gearbox diagnostic inference by computer simulation [Text] / W. Bartelmus. – Wrocław: Oficyna wydaw. politech. Wrocławskiej, – 2002. – 120 p.: ill.
31. Кузин, Е.Г. Прогнозирование остаточного ресурса редукторов подземных конвейеров / Е.Г. Кузин, Б.Л. Герике // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Россия молодая». Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/RM/2019/RM19/pages/Articles/10306.pdf>.
32. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.
33. Ящура, А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования / А.И. Ящура. – Справочник. 2006 г.
34. ГОСТ Р ИСО 13372-2013 Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения (с Поправкой).
35. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ. (с изменениями на 29 июля 2018 года).
36. РД 15-04-2006. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26 февраля 2006 г. №125.
37. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Серия 03. Выпуск 39 / Колл. авт. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.

38. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
39. ГОСТ 23483–79. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования.
40. РД 13-04-2006. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
41. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.: ил. И цветная вкладка 16 с.
42. Нестерук, Д.А. Тепловой контроль и диагностика, Учебное пособие / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. – Томск: Томский политехн. ун-т, 2007. – 104 с.
43. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
44. Герике, Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие / Б.Л. Герике, Г.И. Козовой, В.С. Квагинидзе, А.А. Хорешок, П.Б. Герике // Москва, 2012. – 400 с.
45. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. В41 В.Н. Челомей (пред). – М.: Машиностроение, 1980 – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов // Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. 1980. – 544 с, ил.
46. Русов, В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Русов. – Пермь, 2012. – 252 с.
47. Соколов, А. И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла. Учебное пособие / А. И. Соколов, Н. Т. Тищенко, В. А. Ахметов // Томск: Изд. Томского университета 1991. – 200 с.
48. Ковалев, В. А. Диагностика технического состояния редукторов проходческого комбайна см-130к по результатам анализа работающего масла / В.А. Ковалев, А.А. Хорешок, Б.Л. Герике, С.Г. Мухортиков // Вестник КузГТУ. 2014. №1 (101). Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tehnicheskogo->

sostoyaniya-reduktorov-prohodcheskogo-kombayna-sm-130k-po-rezultatam-analiza-rabotayuschego-masla (дата обращения: 11.06.2017).

49. Мухортиков, С. Г. Разработка методики оценки фактического технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия: диссертация кандидата технических наук, Мухортиков, Сергей Григорьевич: 05.05.06 / Кемерово, 2014. – 134 с.

50. Гаврилин, А.Н. Диагностика технических систем: Учебное пособие. Часть 2 / А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес // Томский политехнический университет. Томск: 2014. – 124 с.

51. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей, И. И. Артоболевский, А. Н. Боголюбов, В. В. Болотин (и др.) // М.: Машиностроение, 1978 – Т. 1. Колебания линейных систем/Под ред. В. В. Болотина. 1978. – 352 с, ил.

52. Герике, Б.Л. Диагностика оборудования карьерных экскаваторов / Б.Л. Герике, Е.Г. Кузин // В сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции. под редакцией В.И. Клишина; З.Р. Исмагилова; В.Ю. Блюменштейна; С.И. Протасова; Г.П. Дубинина. 2012. – С. 140-144.

53. Кузин, Е.Г. О влиянии расположения приводных редукторов в схеме конвейера на степень их износа / Е.Г. Кузин // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. 2014. – С. 49-52.

54. Вибродиагностика подшипников качения. Режим доступа: <http://vibrosmart.ru/index.php/allvibro/18-2013-09-11-11-10-01>.

55. Бейкер, Ричард. Введение в теорию виброиспытаний. Режим доступа: http://asm-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Allbook1_RU.pdf.

56. Чуйков, Р.И. Разработка системы диагностики состояния подшипников качения методом «пик-фактор» / Р.И. Чуйков, Ю.Р. Никитин // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. – 2016. – № 24–1. – С. 167-173.

57. Кузин, Е.Г. Диагностика горно-шахтного оборудования в целях повышения безопасности эксплуатации. / Е.Г. Кузин // В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем Труды IV Всероссийской конференции. В 2-х томах. Научн. ред. В. В. Москвичев. – 2012. – С. 102-105.
58. Кузин, Е.Г. Тепловизионная диагностика ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин // Сборник статей участников VIII Международной научно-практической конференции: в 5 частях. – 2015. – С. 291-294.
59. Приказ от 19 ноября 2013 года №550. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" (с изменениями на 8 августа 2017 года).
60. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
61. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения (с Изменением №1).
62. Силин, А.А. Трение и мы / А.А. Силин // М.: Наука, 1987. – 192 с.
63. Основы трибологии: Учебник для технических вузов / Под ред. А.В. Чичинадзе // М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
64. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский // М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
65. Сагиров, С.Н. Исследование и моделирование процесса движения полимера в одношнековом экструдере / С.Н. Сагиров // Фундаментальные исследования №12, 2011, – С. 179-183.
66. Harris, T.A. Advanced concepts of bearing technology / T.A., Harris, M.N. Kotzalas // CRC Press, 2007. – 352 p.
67. Bearing damage and failure analysis, SKF Group, PUB BU/I3 14219EN, 2014.
68. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинтер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе // М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

69. Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор / Л.Я. Перель // М.: Машиностроение, 1983. – С. 543.
70. Ячиков, И.М. Моделирование тепловыделения в подшипнике качения при использовании эмпирических формул и эластогидродинамической теории / И.М. Ячиков, А.В. Востриков // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах №1, 2015. С. 27 – 32.
71. Кузин, Е.Г. Организация теплового контроля роликов ленточного конвейера в целях энергосбережения / Е.Г. Кузин, М.О. Бочеров // В сборнике: Современные тенденции и инновации в науке и производстве Материалы IV международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 40-41.
72. Кузин, Е.Г. Экспресс оценка состояния роликов ленточных конвейеров с применением инфракрасной термографии / Е.Г. Кузин, М.О. Бочеров // В сборнике: Инновации в технологиях и образовании. Сборник статей участников VIII Международной научно-практической конференции: в 5 частях. – 2015. – С. 287-290.
73. ГОСТ 32305-2013 (ISO 15312:2003) Подшипники качения. Номинальная тепловая частота вращения. Расчет и коэффициенты.
74. Петров, Н.И. Сравнение различных методик расчёта тепловыделения в радиально-упорных шарикоподшипниках / Н.И. Петров, Ю.Л. Лаврентьев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, – № 2. – С. 154-163. – DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-154-163.
75. Rolling Bearing Lubrication, FAG, Publ. No. WL 81 115/4 EA 2012 Edition.
76. Денисенко, Ф.А. Расчет и конструирование станков: Метод. указ. к практическим занятиям / А.Ф. Денисенко // Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2013.
77. Крагельский, И.В. Трение, изнашивание и смазка. Справочник / Под ред. И.В. Крагельский, В.В. Алисин; в 2-ух кн., кн. 2 // М.: Машиностроение, – 1979.
78. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / Под общ. ред. А.В. Каржавина. – Изд. 2-е доп. // Обнинск. – 2004. – 84 с.

79. Взрывозащищенные промышленные редукторы NORD. Руководство по эксплуатации и монтажу. /Инструкция В2050/. Режим доступа: https://www.nord.com/cms/ru/documentation/manuals/details_1139/detail_44743.jsp.
80. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979, – 416 с.
81. Нестерук, Д.А. Тепловой контроль и диагностика / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов – Томск, Изд-во ТПУ. 2008. – 111 с.
82. How to calculate the effect OIL ANALYSIS has on the BOTTOM LINE ISSUE 29 by John S. Evans, B.Sc. Режим доступа: <http://www.wearcheck.co.za/downloads/bulletins/bulletin/tech29.pdf>.
83. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник. / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др.; под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.: ил.
84. ГОСТ 6258-85 Нефтепродукты. Метод определения условной вязкости (с Изменением №1). Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200005796>.
85. Gear and Transmission lubricants. C. J. Boner. Reinhold Publishing Corporation, New York Chapman a. Hall, Ltd. London, 1964.
86. ГОСТ 4333-2014 (ISO 2592:2000) Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле (с Поправкой).
87. АНСИ/АГМА 1010: E95 (ANSI/AGMA 1010: E95) Внешний вид зубьев зубчатых колес. Терминология износа и отказа (Appearance of gear teeth – terminology of wear and failure)
88. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий // ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
89. Доценко, А.И. Основы триботехники: Учебник / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 336 с.: 60х90 1/16. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/405409>.
90. Другов, Ю.С. Экологическая аналитическая химия / Ю.С. Другов – М.: Москва, 2000. – 216 с.

91. Костиков, В.А. Надежность технических систем и техногенный риск. Учебное пособие / В.А. Костиков. – М. 2008., – 136 с.
92. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство.
93. Бир, Стаффорд. Кибернетика и менеджмент / С. Бир. – Изд. 2-е. М.: 2006. – 274 с.
94. Антонов, А.В. Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие/ А.В. Антонов, М.С. Никулин // М.: Абрис, 2012. – 390 с.: ил.
95. Острейковский, В.А., Теория надежности [Электронный ресурс]: Учебник для вузов / В.А. Острейковский // М.: Абрис, 2012. – 463 с. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200605.html>
96. ГОСТ 31592-2012 Редукторы общемашиностроительного применения. Общие технические условия.
97. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
98. ГОСТ Р ИСО 5479-2002 Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
99. Кузин, Е.Г. Проверка закона распределения экспериментальных данных параметров вибрации редукторов шахтных ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин // В сборнике: Инновации в технологиях и образовании Сборник статей участников XII Международной научно-практической конференции. 2019. С. 232-236.
100. Гмурман, В.Е. Руководство по решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие. – 11-е изд., перераб. / В.Е. Гмурман. – М.: Высшее образование, 2006. – 404 с.
101. Эконометрика в схемах и таблицах. Под ред. Орехова С.А. М.: ЭКСМО, 2008 – 224 с.
102. Ещеркин, П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: дисс. канд. техн. наук: 05.05.06: Ещеркин Павел Владимирович / Кемерово, 2012. – 149 с.

103. Шпаков, П. С. Статистическая обработка экспериментальных данных: Учебное пособие. / П. С. Шпаков, В. Н. Попов // М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 268 с.
104. Конвейер шахтный ленточный грузопассажирский ЗЛЛ 1600 Руководство по эксплуатации ЗЛЛ 1600.35.000 РЭ. 2011 г.
105. ГОСТ Р ИСО 5348-2002 Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров.
106. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть III. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹.
107. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы.
108. Кузин, Е.Г. Мониторинг технического состояния горно-шахтного оборудования в целях снижения экологической нагрузки на окружающую среду / Е.Г. Кузин, В.А. Бакин, Д.М. Дубинкин // В сборнике: Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения сборник трудов II Всероссийской молодежной научно-практической конференции. – 2017. – С. 117.
109. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации.
110. Kuzin, E., Shahmanov V., Dubinkin D. Technical diagnostics of ventilation units for energy efficiency and safety of operation / E. Kuzin, V. Shahmanov, D. Dubinkin // E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. – 2017. – DOI: 10.1051/e3sconf/20172103006.
111. Вибродиагностика: Моногр. / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др.; Под ред. Г.Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.
112. Кузин, Е.Г. Мониторинг технического состояния редукторов частотно-регулируемого электропривода шахтных ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин, Б.Л.

Герике // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 82-88.

113. Герике, Б.Л. Распознавание дефектов подшипников качения в редукторах горных машин по параметрам вибрационного сигнала /Б.Л. Герике, Ю.В. Дрозденко, П.Б. Герике, Е.Г. Кузин, А.А. Мокрушев // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5 (132). – С. 43-48.

114. Клишин, В.И. Интеллектуальное обслуживание редукторов горных машин / В.И. Клишин, Б.Л. Герике, Е.Г. Кузин, А.А. Мокрушев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 538. – С. 369-392.

115. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы.

116. ГОСТ Р ИСО 18436-7-2012. Контроль состояния и диагностика машин. Требования к квалификации и оценке персонала. Часть 7. Термография.

117. Лунегов, М.В. Применение инфракрасной термографии при обследовании ленточных конвейеров / М.В. Лунегов, Е.Г. Кузин // В сборнике: Кузбасс: образование, наука, инновации материалы Инновационного конвента. Департамент молодежной политики и спорта Кемеровской области, Кузбасский технопарк, Совет молодых ученых Кузбасса. – 2016. – С. 42-44.

118. Лунегов, М.В. Возможности инфракрасной термографии при оценке технического состояния элементов ленточных конвейеров / М.В. Лунегов, Е.Г. Кузин // В сборнике: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – 2017. – С. 14006.

119. Хорешок, А.А. Оценка энергоэффективности транспортных установок по результатам технической диагностики / А.А. Хорешок, Е.Г. Кузин, А.В. Шальков, М.С. Мамаева, М.Г. Лупий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. Кемерово: –2017. – № 5 (123). – С. 79-85.

120. Кузин, Е.Г. Особенности вибродиагностики технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин, Б.Л. Герике // В сборнике:

Перспективы инновационного развития угольных регионов России Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы Пудов Е. Ю., Клаус О. А. Прокопьевск: – 2016. – С. 137-142.

121. Андреева, Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии / Л.И. Андреева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 5. – С. 136-143.

122. Андреева, Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии / Л.И. Андреева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 4. – С. 78–85.

123. Реутов, А.А. Выбор схемы приводов ленточного конвейера с использованием нечетких значений критериев / А.А. Реутов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (63). – С. 4–11.

124. Aksenov, V Substantiation of the necessity for design of geohod control system / V. Aksenov, I. Chicherin, I. Kostinez, A. Kazantsev, A. Efremenkov // E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. – 2017. – 21, – P. 03001 DOI.org/10.1051/e3sconf/20172103001.

125. Кузин, Е.Г. Диагностика технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров / Е.Г. Кузин, Б.Л. Герике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 47–55.

126. Gerike, B. Formation of comprehensive service system of belt conveyor gear-boxes / B. Gerike B., Yu. Drozdenko, E. Kuzin, I. Ananyin, D. Kuziev // E3S Web of Conferences Electronic edition. – 2018. – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103011.

127. Kuzin, E. Mining equipment technical condition monitoring / E. Kuzin, V. Bakin, D. Dubinkin // E3S Web of Conferences Electronic edition. – 2018. – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103020.

128. Кузин, Е.Г. Совершенствование технического обслуживания редукторов на основании мониторинга параметров эксплуатационных материалов / Е.Г. кузин // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России

Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы Пудов Е. Ю., Клаус О. А. Прокопьевск: – 2018. – С. 47–52.

129. Kuzin, E.G. Diagnostics of technical condition of gear units of belt conveyors for the aggregate of methods of nondestructive testing / E.G. Kuzin, B.L. Gerike, Yu.V. Drozdenko, M.G. Lupiy, N.V. Grigoryeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – С. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/253/1/012013.

130. Gerike, B.L. Identification of mine rescue equipment reduction gears technical condition / B.L. Gerike, V.I. Klishin, E.G. Kuzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер. "International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, KTDMUR 2017" – 2017. – С. 012022. – DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012022.

131. Gerike, B. Development of the preventive maintenance system for belt conveyors reducers / B. Gerike, I. Panachev, E. Kuzin // E3S Web of Conferences. – 2017. – С. 03008. – DOI: 10.1051/e3sconf/20171503008.

132. Кузин, Е.Г. Диагностика приводов ленточных конвейеров по совокупности методов неразрушающего контроля / Е.Г. Кузин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК–2017) сборник трудов Международной научно-практической конференции. Кемерово: – 2017. – С. 259–266.

133. Герике, Б.Л. Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования. / Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 68–73. – DOI: 10.17580/gzh.2017.12.13.

134. Kuzin, E. Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks / E. Kuzin, B. Gerike, M. Mamaeva and K. Singh // E3S Web of Conferences 105, 03011 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910503011>.

135. Mamaeva, M. Development of innovative methods for the assessment of the technical condition of the gearboxes of the mine belt conveyors in the parameters of the lubricating oil / M. Mamaeva, E. Kuzin // MATEC Web of Conferences The conference proceedings (ISPCIME-2019). 2019. С. 03006.

Приложение



Шахта им. В.Д. Ялевского

СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Кузина Евгения Геннадьевича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Кузина Евгения Геннадьевича «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ» используются при определении технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров. Техническое обслуживание редукторов проводится на основании результатов оценки параметров вибрации, температуры и смазочного масла по указанной методике. Результатами работы являются рекомендации по срокам замены смазочного масла и проведению необходимых ремонтных работ для редукторов шахтных ленточных конвейеров.

КОПИЯ

Директор
Шахты им. В.Д. Ялевского
АО «СУЭК-Кузбасс»



А.А. Кавардаков