

На правах рукописи



КУЗИН ЕВГЕНИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

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

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» на кафедре «Горные машины и комплексы»

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Герике Борис Львович

Официальные оппоненты: **Андреева Людмила Ивановна**
д-р техн. наук, руководитель отдела эксплуатации и ремонта горно-шахтного оборудования ООО «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства (г. Челябинск);

Ефременков Андрей Борисович
д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» (г. Великий Новгород).
Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва).

Защита состоится «08» сентября 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс: (384-2) 68-23-23, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2020/kuz/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «__» июля 2020 г.
Ученый секретарь диссертационного совета,

д.т.н., доц.



И. Ю. Семькина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 надежности 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 контроля, 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 Рос-

сии» (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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и идея работы, поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрена роль конвейеров в горной промышленности, проанализированы проблемы, возникающие при транспортировании горной массы ленточными конвейерами, рассмотрены современные типы редукторов. Выполнен анализ простоев ленточных конвейеров на пяти шахтах Кемеровской области в период с 2014 по 2017 годы.

Показано, что внезапная остановка конвейера по причине поломки зуба шестерни является результатом развития нескольких событий. Основными являются нарушение геометрии пар трения (перекосы вала и шестерни) фрикционный износ, несоосность валов электродвигателя и редуктора (расцентровка), наличие дисбаланса.

Рассмотрены показатели надежности и проанализированы стратегии технического обслуживания и ремонта горных машин, и предложено внедрение технического обслуживания по фактическому техническому состоянию на основании мониторинга состояния редуктора. Мониторинг диагностических параметров редуктора и своевременное вмешательство ремонтного персонала: очистка смазочного масла (либо его полная замена); устранение выявленных проблем дисбаланса и расцентровки сможет продлить срок службы подшипников и зубчатых передач.

При создании методики требуется учесть разнообразие горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации подземных конвейер-

ров, резкопеременный характер нагрузки, наличие запыленной атмосферы и помех от работающего оборудования.

Во **второй главе** приводится аналитический обзор существующих методов неразрушающего контроля и технической диагностики горно-шахтного оборудования, оцениваются их достоинства и недостатки применительно к редукторам шахтных ленточных конвейеров, оснащенных управляемыми частотно-регулируемыми электроприводами.

Показано, что для оценки фактического технического состояния оборудования и элементов ленточных конвейеров необходимо анализировать результаты функциональной диагностики, проводимой в рабочих условиях на различных эксплуатационных режимах. Наиболее информативными и оперативными являются: тепловой и вибродиагностический контроль, а также контроль параметров эксплуатационных материалов (смазочного масла).

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. Дефектным считается механизм, вибрации которого превышают допустимую норму, определяемую ГОСТ ИСО 10816-1-97. Данный метод подходит для диагностики предаварийного состояния оборудования по уровню допустимой вибрации.

Анализ частотного спектра вибросигнала позволяет определять по характерным частотам дефектные элементы, например, подшипников и зубчатых пар редуктора. Использование спектрального анализа позволяет выделить опасные компоненты вибросигнала и построить зависимости их изменения во времени, что используется при разработке прогностических моделей деградации элементов редукторов, с учетом изменения частоты вращения приводного двигателя.

Из всего многообразия методов теплового контроля выбраны метод контактного измерения температуры масла искробезопасными взрывозащищенными термопарами, метод использования термоиндикаторов (предупреждает о возникшем чрезмерном перегреве, обеспечивая безопасность обслуживающего персонала); метод инфракрасной термографии.

Для раннего прогнозирования изменения технического состояния редуктора следует дополнить указанные методы данными анализа смазочного масла. Важными диагностическими параметрами, как для оценки состояния самого масла, так и работающего редуктора, являются вязкость масла, температуры вспышки и накопленные механические примеси.

Как показывает практика диагностики редукторов горных машин, проводимая в рамках экспертного обследования их технического состояния, достоверность заключения по результатам вибродиагностики составляет около 80%, а привлечение дополнительной информации о тепловом состоянии редукторов и характеристиках работающего масла позволяет увеличить достоверность диагноза до 90%.

В **третьей главе** приводится обзор методов повышения эксплуатационной надежности и методов прогнозирования изменения технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров.

Была разработана математическая модель изменения состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров, основанная на вероятностном подходе.

Вероятность наступления отказа оценивается по характерным контролируемым параметрам. Однако, для составления прогноза недостаточно одних лишь данных наблюдения. Для корректного прогнозирования необходимо: определить предельное состояние элементов редуктора; выделить тренд изменения характеризующего параметра; проанализировать темпы развития неисправности. По мере накопления данных в разработанную прогностическую модель следует вносить коррективы, учитывающие проведенное техническое и ремонтное обслуживание.

На рисунке 1 представлена комбинированная структурная схема с блоками диагностирования и прогнозирования.



Рисунок 1 – Комбинированная структурная схема с блоками диагностирования и прогнозирования

В настоящей работе применяется физико-статистический метод для анализа показателей надежности редукторов, учитывающих 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 редуктора.

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

$$X = X_{ном} \pm k \cdot t_i^\alpha, \quad (1)$$

где $X_{ном}$ – 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

$$T_{ост} = \frac{\Delta t (\Delta X_{np}^{1/\alpha} - \Delta X_{\phi}^{1/\alpha})}{\Delta X_{np}^{1/\alpha} - \Delta X_{\phi}^{1/\alpha}}. \quad (2)$$

Проведена проверка подтверждающая нормальность распределения среднего квадратического значения виброскорости $v_{скз}$, измеренного для двенадцати однотипных редукторов после монтажа.

Выражая под параметром (y) значение диагностического параметра K – характеризующего состояние привода ленточного конвейера, а под параметром (x) время t искомая зависимость тренда будет иметь линейный вид (рисунок 2)

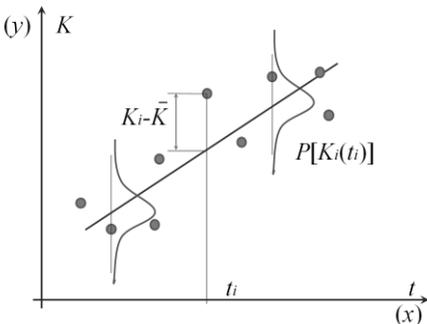


Рисунок 2 – Прямая регрессии
 $(K - \bar{K}) = b(t - \bar{t})$

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.

Предложенный метод построения прогнозного тренда диагностических параметров позволяет с заданной доверительной вероятностью строить долгосрочные прогнозные модели, описывающие процессы изменения технического состояния редукторов.

В **четвертой главе** приводятся основные положения методики оценки технического состояния редукторов по совокупности диагностических признаков и ее промышленная апробация для редукторов коническо-цилиндрических фирмы Moventas Santasalo D3RST82XO шахтных ленточных конвейеров ЗЛЛ-1600.

Измерения и регистрация контролируемых параметров вибрации должно проводиться на всех штатных точках привода ленточного конвейера, определяемых в зависимости от конструкции привода (рисунок 3).

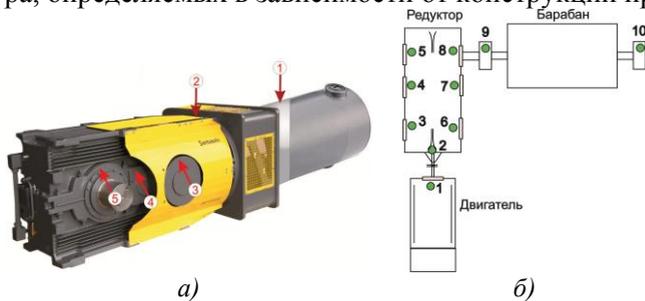


Рисунок 3 – Точки измерения вибрации привода: а) – натуральные точки редуктора D3RST82XO; б) – расположение на схеме

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.

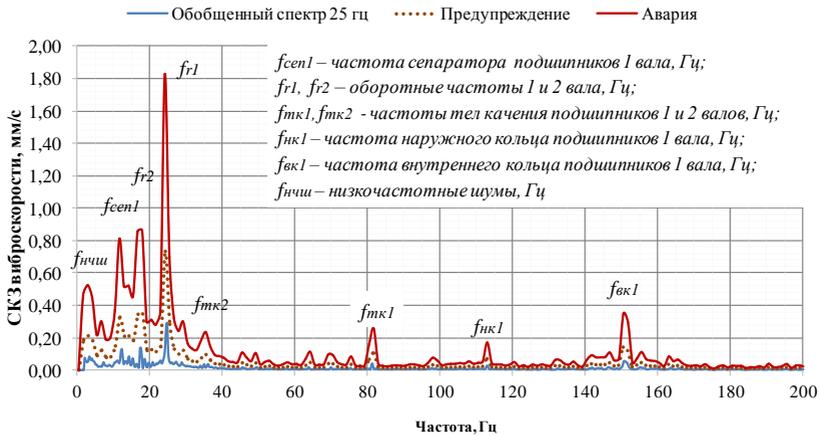
2. В процессе эксплуатации периодичность последующих контрольных измерений после оценки технического состояния редуктора устанавливается собственником оборудования, при этом максимальный интервал не должен превышать:

- для уровня «требуется принятие мер» – не более 7 суток;
- для уровня «предельно допустимо» – не более 1 месяца;

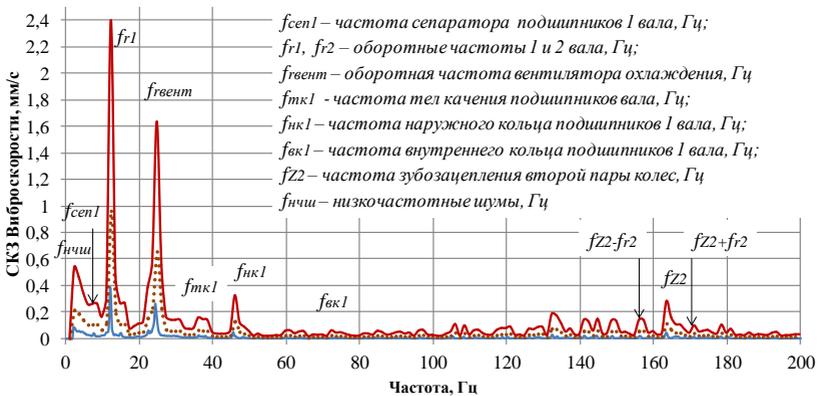
– для уровня «допустимо без ограничения сроков» – не более 3 месяцев.

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

- среднее квадратическое значение виброскорости на корпусе редуктора, электродвигателя и приводного барабана;
- пиковое значение виброускорения корпусов подшипника редуктора;
- спектр огибающей сигнала виброскорости;
- формы сигнала виброскорости.



а)



б)

Рисунок 4 – Обобщенный спектр и опорные маски: а) - соответствующие оборотной частоте 12,5 Гц, б) - соответствующие оборотной частоте 25 Гц

Настоящая методика учитывает особенности управляемого электропривода, при котором оборотная частота электродвигателя меняется в соот-

ветствии с нуждами технологического процесса, 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).

При сравнении новых спектров с «опорной маской» любые уровни амплитуд вибрации, превышающие контуры маски (так называемый «прокол маски») могут рассматриваться как признак неисправности, при этом используются знания частот, на которых проявляются неисправности.

Обобщенные спектры СКЗ виброскорости для 12 редукторов и опорные маски для частоты $f_{r1} = 25$ Гц на рисунке 4, а); для частоты $f_{r1} = 12,25$ Гц представлены на рисунке 4, б).

Внешний вид термограмм редукторов шахтного ленточного конвейера приведен на рисунке 5.

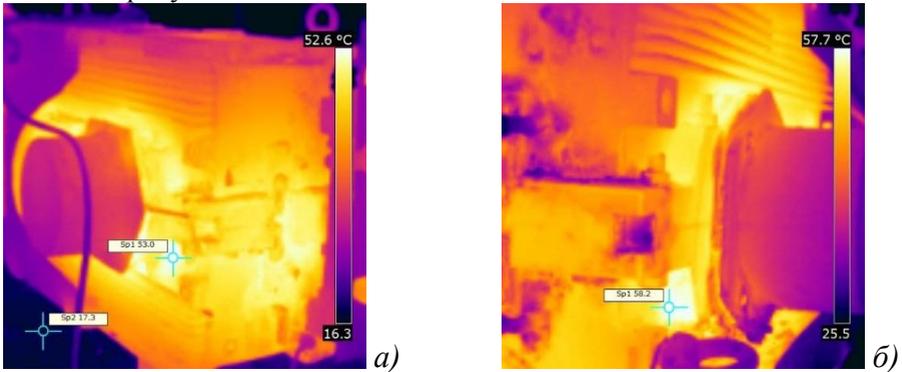


Рисунок 5 – Термограммы редукторов одного привода в хорошем техническом состоянии: а) – температура 53,0 °С, б) – температура 58,2 °С

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

Для прогноза деградации подшипниковых узлов использовался критерий суммарного уровня вибрации K_b на частотах сепаратора f_{cen} и наружного кольца подшипника $f_{нк}$

$$K_b = f_{cen} + f_{нк}, \quad (3)$$

После расчета множественной корреляции и построения регрессионной модели были выявлены наиболее значимые факторы и построено линейное уравнение регрессии для трех факторов (см. формулу 7).

$$K_b = -0,369 + 0,002x_1 + 0,124x_2 + 0,0059x_3, \quad \text{при } x_2 \geq 5 \quad (4)$$

где параметры x_i – представлены в таблице 3.

Таблица 3 – 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 , °С	Наработка, тыс. ч

График зависимости критерия деградации K_b от наработки представлен на рисунке 6.

Для прогноза деградации зубчатых передач использовался критерий суммарного уровня вибрации K_g на частотах зубозацепления первой f_{z1} и второй зубчатых пар f_{z2}

$$K_g = f_{z1} + f_{z2}, \quad (9)$$

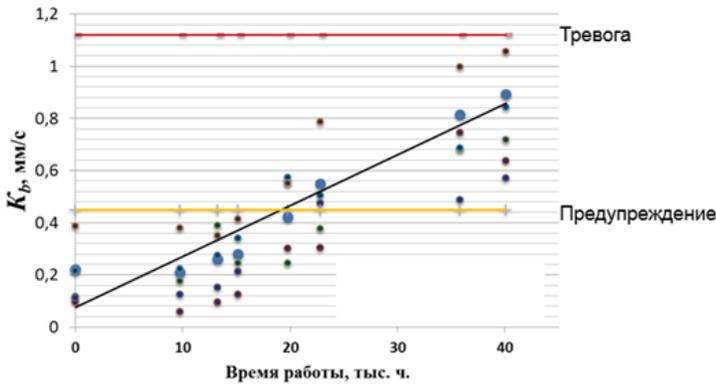


Рисунок 6 –
График тренда
износа
подшипников
редуктора

После расчета множественной корреляции и построения регрессионной модели были выявлены наиболее значимые факторы и построено линейное уравнение регрессии для трех факторов (см. формулу 9).

$$K_g = -0,331 + 0,0344x_1 + 0,0198x_2 + 0,0129x_3, \text{ при } x_1 \geq 8; \quad x_2 \geq 5 \quad (10)$$

где параметры x_i – представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры регрессионной модели износа зубчатых пар редуктора

x_1	x_2	x_3
Отклонение вязкости Δv , мм ² /с	Содержание механических примесей кремния Si, г/т	Наработка, тыс. ч

График зависимости критерия деградации K_g от наработки представлен на рисунке 7.

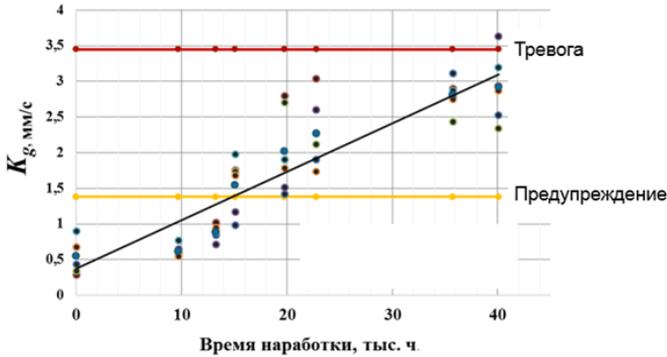


Рисунок 7 – График тренда износа зубчатых пар редуктора

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

Диаграмма технического состояния по основным диагностическим признакам и необходимое ремонтное воздействие при превышении параметров приведены на рисунках 8, 9.

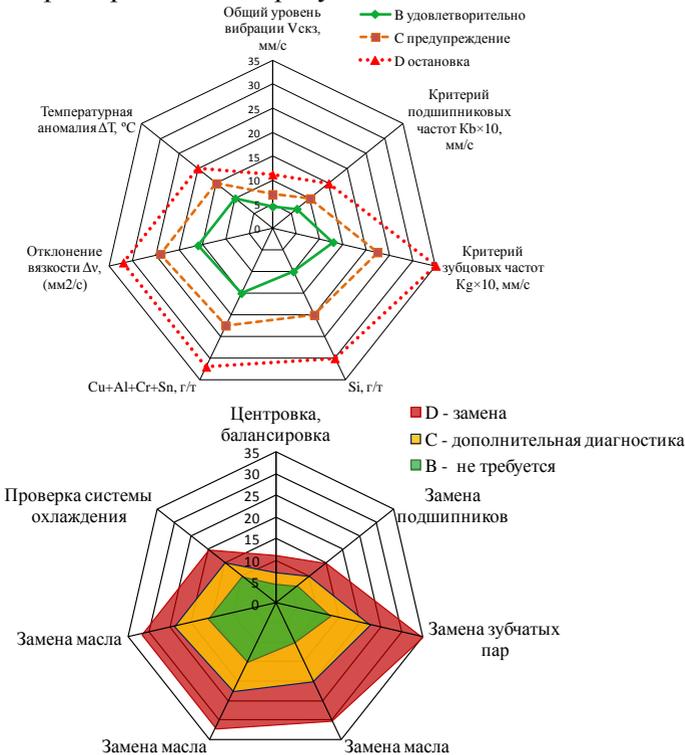


Рисунок 8. – Диаграмма технического состояния редуктора по основным диагностическим признакам

Рисунок 9. – 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.

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 $\Delta T = 15$ °С.

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

гнозирования 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 D3RST82ХО ленточных конвейеров ЗЛЛ-1600.

Основные положения диссертации опубликованы:

в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. **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.

в изданиях Scopus, Web of Science:

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

6. **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. – p. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/253/1/012013.

7. **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.

8. 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 Cep. "International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, KTDMUR 2017" – 2017. – p. 012022. – DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012022.

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

10. **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>.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1], [2], [4], [8], [9] – проведение экспериментальных исследований диагностических параметров, обработка и анализ полученных результатов, формирование выводов;

[3] – разработка критериев теплового контроля элементов ленточных конвейеров;

[5 - 7] – обоснование диагностических критериев оценки технического состояния и методов неразрушающего контроля элементов редуктора;

[10] – разработка плавающих опорных масок вибрационной диагностики, формулировка выводов.

Сверстано и отпечатано в филиале КузГТУ в г. Прокопьевске 653039,
г. Прокопьевск, ул. Ногрaдская, 19a

Подписано в печать 03 июля 2020 г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 1,1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 337.

