

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЁВА

На правах рукописи

МУХОРТИКОВ СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.05.06
«Горные машины»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
В.А. Ковалев

Кемерово 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ СООРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ ОАО «СУЭК – КУЗБАСС»	9
1.1 Технология проведения горных выработок	9
1.2 Техника, используемая для сооружения выработок	13
1.3 Показатели надежности эксплуатации проходческого ком- байн с исполнительными органами избирательного дей- ствия.....	23
.....	23
1.4 Системы обслуживания горной техники, эксплуатирующей- ся на предприятиях ОАО «СУЭК-Кузбасс».....	26
1.5 Основные итоги и выводы.....	39
ГЛАВА 2 ДИАГНОСТИКА ГОРНОПРОХОДЧЕСКОГО ОБОРУ- ДОВАНИЯ	41
2.1 Обзор и анализ методов диагностики технического состоя- ния горнопроходческого оборудования.....	41
2.2 Анализ методов вибродиагностики применительно к элек- тромеханическим приводам проходческих комбайнов ...	48
2.3 Методы спектрального анализа смазочных материалов, используемых в узлах и агрегатах проходческих комбайнов .	57
2.4 Сравнительный анализ различных методов диагностики	70
2.5 Основные итоги и выводы	73
ГЛАВА 3 ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕ- СКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙ- НОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ	73
3.1 Обзор и анализ методов прогнозирования технического состояния горнопроходческого оборудования	73
3.2 Построение математической модели изменения техническо- го состояния проходческого комбайна.....	76
3.3 Проверка гипотезы закона распределения эксперименталь- ных результатов оценки работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия.....	79

3.4	Влияние погрешностей измерения и средств измерения на результаты оценки работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия	84
3.5	Построение прогностической модели по результатам экспериментальных наблюдений за потерей работоспособности.....	89
3.6	Основные итоги и выводы.....	92
ГЛАВА 4 ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ.....		93
4.1	Выбор объекта и места испытаний	93
4.2	Методика проведения диагностических обследований проходческих комбайнов избирательного действия по параметрам механических колебаний	96
4.3	Методика проведения диагностических измерений проходческих комбайнов избирательного действия по параметрам эмиссионного спектрального анализа масла.....	103
4.4	Апробация методики оценки технического состояния проходческих комбайнов по параметрам вибрации и работающего масла.....	110
4.5	Направления дальнейших исследований.....	119
4.6	Основные итоги и выводы.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		123

ВВЕДЕНИЕ

Развитие подземного способа добычи полезных ископаемых идет по пути увеличения производственной мощности горного предприятия. Для обеспечения высокой производительности необходимо увеличивать темпы проходки подготовительных горных выработок, а это невозможно осуществить без оборудования, обладающего высокой эксплуатационной надежностью.

Проведенные исследования показали, что значительное время простоев вызвано не только по причине возникновения отказов, но и низким технологическим уровнем технического обслуживания.

Одним из направлений решения задачи повышения качества ремонта и технического обслуживания на основан на знании фактического технического состояния отдельных узлов и агрегатов. Эта информация может быть получена из результатов вибрационного обследования и спектрального анализа состава примесей в смазывающей жидкости. Данные два метода функциональной диагностики позволяют получить практически всю информацию о процессах, протекающих в контактирующих узлах и деталях. Достоверная информация о техническом состоянии проходческого комбайна, позволит наиболее полно использовать ресурс деталей и узлов и снизить время простоев за счет внедрения прогрессивных стратегий технического обслуживания и ремонта. Поэтому разработка метода оценки, основанного на современных методах неразрушающего контроля, является актуальной задачей.

Цель работы. Разработать методику оценки фактического технического состояния проходческого комбайна избирательного действия.

Идея работы заключается в согласовании параметров вибрации и качественной и количественной оценке примесей в рабочей жидкости с фактическим техническим состоянием проходческого комбайна избирательного действия для перехода на систему обслуживания по фактическому состоянию.

Объект исследований: проходческие комбайны избирательного действия со стреловидным исполнительным органом СМ-130К.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ состояния проходческого оборудования на предприятиях ОАО «СУЭК - Кузбасс», оценка его надежности и эффективности применяемых стратегий технического обслуживания и ремонта.
2. Выявление наиболее эффективных методов и оборудования диагностирования проходческого комбайна для оценки его фактического технического состояния.
3. Построение физико-статистической модели изменения технического состояния и построение долгосрочной прогностической модели, описывающей постепенные процессы деградации редукторов проходческих комбайнов избирательного действия.
4. Разработка методов диагностирования узлов проходческих комбайнов избирательного действия в процессе их эксплуатации и проверка достоверности разработанной прогностической модели.

Методы исследований. При выполнении работы использовались методы хронометрических наблюдений, статистической обработки данных, системный анализ, методы математического моделирования и теории вероятности при построении прогностических моделей деградации узлов и агрегатов.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. диагностические признаки технического состояния узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия должны базироваться на одновременном использовании нескольких диагностических методов и результатах комплексного анализа всей имеющейся информации о вибрационной активности и содержании примесей в работающем масле;
2. прогностическая модель изменения технического состояния узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия, построен-

- ная с учетом вида технического обслуживания, имеет вероятностный характер и должна учитывать доверительную вероятность заключения;
3. мониторинг технического состояния узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия позволяет учитывать изменение параметров вибрационной активности и содержание механических примесей в работающем масле и на основе установленных регрессионных зависимостей определять текущее техническое состояние, а также прогнозировать остаточный ресурс узлов и агрегатов с заданным уровнем достоверности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается использованием апробированных теоретических положений по оценке работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия, выполненных с применением современных методов неразрушающего контроля и математического моделирования и позволяет прогнозировать момент наступления отказа с высокой доверительной вероятностью.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Установлены факторы, влияющие на количество отказов и продолжительность простоев проходческого оборудования.
2. Определены методы диагностирования и разработаны требования для оценки фактического технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия.
3. Определены значения доверительной вероятности и коэффициента регрессии для построения прогностической модели для оценки остаточного ресурса проходческих комбайнов избирательного действия.
4. Разработана методика оценки технического состояния проходческого комбайна избирательного действия на основании данных о вибрации и составе примесей в смазывающей жидкости.

Практическая значимость работы заключается в разработке механизма объективной оценки фактического технического состояния проходче-

ских комбайнов избирательного действия. Разработанная методика позволяет научно-обоснованно определять остаточный ресурс и планировать сроки проведения ремонтов и технического обслуживания.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования и разработке методов их решения; выполнении аналитических и экспериментальных исследований; определении факторов влияющих на отказы; разработке математической модели для оценки остаточного ресурса проходческого комбайна; а также разработке методики для оценки технического состояния проходческого комбайна избирательного действия.

Научное значение работы заключается в разработке методики оценки работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия с учетом особенностей условий и режимов эксплуатации, базирующейся на использовании методов и средств неразрушающего контроля.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Основные научные результаты диссертационной работы внедрены и находят практическое применение в учебных заведениях высшего профессионального образования (КузГТУ г.Кемерово) и эксплуатирующих организациях (ОАО «СУЭК - Кузбасс»). К их числу относятся материалы по оценке технического состояния проходческого оборудования, рекомендации по использованию средств неразрушающего контроля для оценки остаточного ресурса деталей и узлов, разделы лекционных курсов.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на II Международной научно-практической конференции (Прокопьевск, 2009); XII Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2010); IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2012); Международной научно-практической конференции «Неделя горняка» (Москва, 2013, 2014 г.) Международной научно-практической конференции «Перспективы развития горно-транспортного

оборудования» (Москва, 2013); II Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Междуреченск, 2013).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 научных работах, из них 9 – в изданиях рекомендуемых ВАК РФ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 131 страница, таблиц 14 и 28 рисунков, библиографический список включает 101 наименование.

1. ПРОБЛЕМЫ СООРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ ОАО «СУЭК – КУЗБАСС»

1.1. Технология проведения горных выработок

В развитых горнодобывающих странах основными средствами разрушения горной массы при проведении горных выработок являются проходческие комбайны избирательного и фронтального действия, а также буровзрывные работы.

Из известных конструкций проходческих комбайнов фронтального действия особый интерес представляет проходческий комплекс «Союз-19», несколько модификаций которого прошли испытания и были приняты за базовую модель. Комплекс позволяет проводить магистральные выработки арочной формы по породам крепостью до $f=10$ с сечением выработки в свету $15,5 \text{ м}^2$ и механизировать не только основные, но и вспомогательные процессы в проходческом забое.

Однако подобные машины применимы только для проведения горнокапитальных выработок большого сечения и протяженностью более 3 км. Это связано с большими затратами на монтаж и демонтаж комплекса. В связи с этим комбайны фронтального действия получили ограниченное применение.

Для проведения выработок по породам выше средней крепости практически единственным является буровзрывной способ. Однако этот традиционный и универсальный способ имеет существенные недостатки, основными из которых являются ограничения по безопасному ведению работ, малая возможность интенсификации процесса, нарушение устойчивости пород в окрестностях выработки, что, в свою очередь, ведет к значительному увеличению давления на крепь, особенно ощутимого в неустойчивых и легкообрушающихся породах.

Поэтому в России и за рубежом ведутся интенсивные работы, направленные на изыскание способов и средств эффективного разрушения массива с высокими прочностными свойствами. Ниже перечислены работы, посвященные рассмотрению тех способов и средств, применение которых в принципе возможно в условиях угольных шахт.

1. Работы по определению эффективности использования для интенсификации разрушения крепких пород низкотемпературного носителя (перегретого водяного пара). Несмотря на эффективность разрушения, результат не компенсирует усложнения конструкции рабочего органа и машины в целом, увеличивая стоимость проходки.

2. Работы по исследованию ударных механизмов большой мощности для разрушения крепких горных пород. Ударный способ разрушения характеризуется высокой производительностью при низкой энергоемкости процесса и позволяет разрушать породы значительной крепости. Созданные за рубежом проходческие комбайны ударного действия нашли применение при проведении горных выработок, а также для разрушения негабаритов на карьерах [1, 2].

3. Работы по исследованию процесса разрушения массива горных пород с наложением на рабочий инструмент механических колебаний. На их основе были спроектированы и испытаны активные режущие головки проходческих комбайнов, оснащенные виброрезцами, в которых статические усилия заменяются динамическими. Испытания различных видов инструментов на вибрационных стендах показали их эффективность в диапазоне частот 80-4000 Гц при крепости пород $f = 7-11$ [3, 4]. Однако необходимы дальнейшие исследования по применимости этого метода и разработка вибраторов достаточной возмущающей силы.

4. Работы по комбинированному разрушению горного массива высоконапорной струей воды и тангенциальными резцами. Результаты использования высоконапорных струй на рабочих органах проходческих комбайнов, полученные на полноразмерном стенде, свидетельствуют об эффективном

резании породы при давлении воды 100-250 МПа. По сравнению с резанием породы без высоконапорных струй удалось получить снижение усилий на 60% [5, 6]. Применение высоконапорных струй способствует, кроме всего прочего, более эффективному пылеподавлению и устранению искрообразования. Эту же систему водоснабжения с требуемой дозировкой подачи воды низкого давления можно использовать для интенсивного внутреннего орошения.

5. Интенсивно велись работы по разрушению пород комбинированным методом – прорезанием щели алмазным или резцовым диском и разрушение целиков отрывным или ударным механизмами [7, 8].

Породный резцово-алмазный комбайн «Караганда ПРА» имел сменные резцовый и алмазный диски, устанавливаемые в зависимости от крепости пород, и гидроотрывник.

Для повышения скорости отработки породного забоя был разработан проект породопроходческого комбайна «Алмаз 5ПП», оснащенного двумя спаренными консольными стрелами с четырьмя алмазными дисками и гидроотрывниками.

6. Совершенствование конструкций проходческих комбайнов со стреловидными исполнительными органами и разрушающими элементами в виде коронок, оснащенных радиальными или тангенциальными резцами для расширения области их применения на более крепкие породы.

Достаточно сказать, что в каменноугольной промышленности за рубежом имеется тенденция к отказу от имевших ранее исключительное применение легких машин массой до 40 т, установленной мощностью привода исполнительного органа до 100 кВт и использованию машин более тяжелого типа (75 т) и мощностью привода режущей головки до 300 кВт. Вследствие этого расширяется область применения горных комбайнов избирательного действия. Так, еще в 1982 г. на шахтах ФРГ начали эксплуатироваться комбайны типа E200 фирмы «Паурат», с помощью которых успешно пройдено более 3400 м полевых выработок. Масса комбайна около 110 т, установлен-

ная мощность привода исполнительного органа 350 кВт. В СССР был создан и испытан проходческий комбайн избирательного действия 4ПП-5. Комбайн имеет производительность по отбойке горной массы 0,6 м/мин, предназначен для проведения выработок сечением до 30 м² с присечкой породы с коэффициентом крепости до $f = 6$. Этот комбайн имел суммарную мощность установленного электрооборудования 400 кВт, в том числе мощность рабочего органа 200 кВт, общая масса комбайна составляла 75 т [9].

Применение комбайнов с навесным буровым оборудованием позволяет уменьшить трудоемкость и продолжительность обуривания забоя, расширить область применения комбайновой проходки по пластам с наличием твердых включений или со значительной присечкой боковых пород. Однако этому способу присущи все недостатки буровзрывного проведения выработок.

7. Совершенствование органов механического разрушения путем установления поперечных либо продольных головок. Изменение конфигурации резцов, шага и углов их установки.

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены проходческие комбайны с наиболее распространенными конструкциями исполнительных органов.



Рис 1.1. Комбайн с исполнительным органом барабанного типа



Рис. 1.2. Комбайны с исполнительными органами корончатого типа (избирательного действия)

1.2. Техника, используемая для сооружения выработок

Необходимость обеспечения высоких темпов ведения проходческих работ требует внедрения современной передовой и надежной техники.

В таблице 1.1 представлены модели проходческих комбайнов, используемых на предприятиях «СУЭК-Кузбасс» для проведения подготовительных выработок с 2006 по 2010 г.г.

Таблица 1.1.

Проходческие комбайны, применяемые в ОАО «СУЭК-Кузбасс»

№ п/п	Тип оборудования, зав. №	Инвентарный номер	Дата поступления	Дата ввода в эксплуатацию	Местонахождение оборудования				Место установки
					в работе	в ремонте	в монтаже	в резерве	
ОАО «Шахта Польшаевская»									
1	1ГПКС-01 №472	35027	2004	06.2004		-	-		
2	СМ-130К №3	36164	2005	2005	1		-		18-2-бис в/у
3	СМ-130К №4	36263	2006	2006	1		-		18-8 в\ш
4	КП-21 №136	7Н0003165	2010	09.2010	1				17-3 В/укл
5	КП-21 № 62	36386	2007	07.2007	1				Накл. вен. в-г №3
ОАО «Комсомолец»									
1	1ГПКС №267	50439	2000	07.2000					МДРЗО
2	1ГПКС №294	50660	2000	12.2000					МДРЗО
3	1ГПКС № 395	60099	2002	09.2002		1			МДРЗО
4	П-110 №403057	60793	2004	06.2004		1			МДРЗО
5	1ГПКС №478	60809	2004	04.2004				1	В/Ш 1927
6	П-110	61837	2005	12.2005	1				1740 В/Ш

	№405067								
7	КП-21 №58	62252	2007	04.2007	1				1740 К/Ш
8	КП-21 №116	62497	2009	01.2009	1				Конв.конц.штрек
9	КП-21 №125		2009	09.2009	1				1741К/Ш
10	КП-21 №133		2010	06.2010					Сбоечная печь
11	1ГПКС	46177ТЗ	2009		1				ФПУ 173

Продолжение табл. 1.1

№ п/п	Тип оборудования, зав. №	Инвентарный номер	Дата поступления	Дата ввода в эксплуатацию	Местонахождение оборудования				Место установки
					в работе	в ремонте	в монтаже	в резерве	
Шахта им. С.М. Кирова									
1	ГПКС №396	15148	09.02	09.02	1				Кроссинг
2	ГПКС №559	102010	05.06 г	06.06г				1	25-93 В/печь
3	ГПКС (б/у)	45568 Т.З.	11.07			1			Мех. Цех
	КП-21№138	36924		08.10г					
4	КП-21№78	Аренда			1				25-94 к/печь
5	КП-21 №123	кра 33187	09.09	10.09	1				24-54 В/П
6	30МБЗ	105101	08.09	09.09	1				25-93В/печь
7	Джой 12СМ-18	24820	1997	1997	1				
8	Джой 12СМ-15	15147	01.02	01.02		1			
9	П-110 №403054	149	11,03	12.03	1				25-03газодр/ш
10	П-110 №404059	151	10.04	10.04		-			
11	СМ-130К №5	102254	03.07 г	03.07г	1				24-03пут/бр-г
Шахта им. А.Д. Рубана									
1	1ГПКС №356	31714	09.01 г.	10.01 г.					Мех. Цех
2	1ГПКС №292	32984	06.02 г.	09.02 г.					Мех. Цех

3	1ГПКС №392	32296	09.02 г.	09.02 г.					Мех. Цех
4	КСП-32№114	32062	3кв.0 4г	06.04г.					Мех. Цех
5	КП-21 №85	32989		06.2008 г.	1				1306 пуг.штрек
6	КП-21 № 88	32992		06.2008 г.	1				808др.к/ш
7	КП-21 №119	33188		11,2009	1				1304 К/Ш
8	КП-21 №122	33187		9,2009	1				808К/Ш
9	СМ-130К №7	15138	2007г .	08.07г.	1				1306п/ш
10	1ГПКС №512	32326	02.05 г.	03.05 г.			1		Вент.квершлаг

Продолжение табл. 1.1

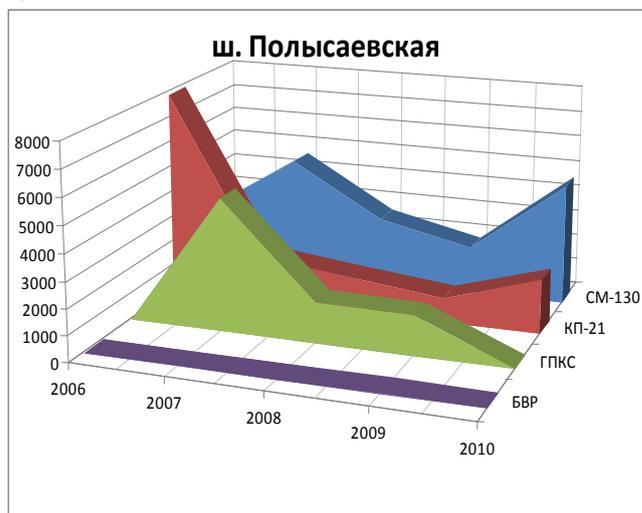
№ п/п	Тип оборудования, зав. №	Инвентарный номер	Дата поступления	Дата ввода в эксплуатацию	Местонахождение оборудования				Место установки
					в работе	в ремонте	в монтаже	в резерве	
Шахта им. 7 Ноября									
1	П- 110 – 01(з.№40019)	39000532	арен- да	04.03г.					Мех. Цех
2	1ГПКС - 01 (з.№ 388)	29474	07.02 г.	07.02г.				1	Мех. Цех
3	П-110 (з.№ 04060)	30080	09.04 г.	09.04г.	1				1382В/Ш
4	КП-21 (зав. № 40)	30725	10.06 г.	10.06г.	1				1358к/ш
5	КП-21 (зав. № 50)	30820	06.07 г.					1	
6	КП-21 (зав. № 142)								
7	MD-1100 № 31	31069	6,07		1				1380к/ш
Шахта № 7									
1	КП-21 №53	47829	2007	02.03.2 007				1	
2	КП-21 №60	47893	2007	29.06.2 007	1				Конв.ствол
3	КП-21 №67	7H00031315	2007	30.08.2 007	1				52-10 В/Ш
4	КП-21 №109	48375	10.20 08г.	10.2008 г.	1				Конв.ствол

Продолжение табл. 1.1

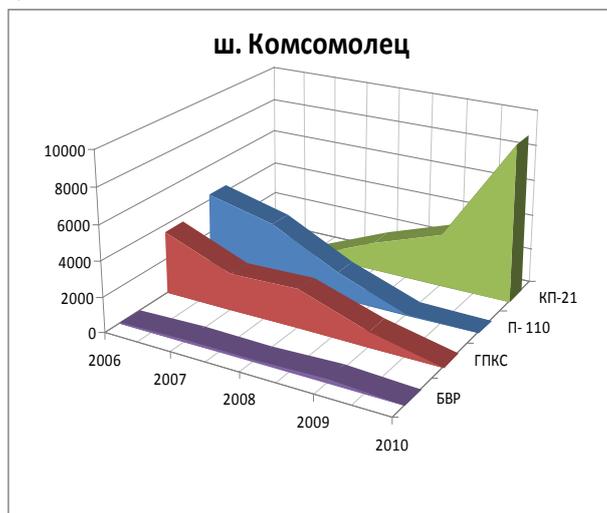
№ п/п	Тип оборудования, зав. №	Инвентарный номер	Дата поступления	Дата ввода в эксплуатацию	Местонахождение оборудования				Место установки
					в работе	в ремонте	в монтаже	в резерве	
Шахта «Котинская»									
1	КП-21№66	47960	01.06. 2007	01.08.2 008				1	Путевой ств. ФПП
2	12СМ- 30JM6711	47984	01.01. 2007	16.09.2 007	1				В/Ш 5208 бис
3	П- 110№401047	39004248	01.10. 2003	10.03.2 004					Промквершлаг (утоплен)
4	1ГПКС-01	39004247		01.02.2 003					На поверхности
5	1ГПКС-01	1356		01.02.2 005	1				В/Ш 5208 бис
6	П-110 №404063	1417	01.11. 2004	01.02.2 005	1				Водосборник
7	П-110 №405068	47478	30.06. 2005	30.06.2 005				1	Мех. Цех
8	П-110 №401048	39004249	01.10. 2003	10.03.2 004	1				Вент.ствол пл. 51
9	12СМ-15 №5606	1807	01.01. 2005	01.10.2 005	1				В/Ш 5208 бис
Шахта «Талдинская-Западная-1»									
1	1П- 110№404062	47385	2005	03.05	1				6707 к/ш
2	1П- 110№405065	47485	2005	08.05	1				67-06 К/ш
3	КП-21№59	47892	2007	05.2007	1				67-06 В/Ш
4	1П- 110№405066	47441ип	2005	08.05	1				767-07
5	КП-21№54	47830	03.07	03.07	1				Ф.К.С.
6	КП-21№61	47915	2007	06.2007	1				
7	1ГПКС№268	46525	1999	06.00					На поверхности
8	1ГПКС	45568	2001	12.01					70-06 в/ш
Шахта «Талдинская-Западная-2»									
1	1П- 110№404064	47386ип	2005	03.05	1				7008 в/ш
2	КП-21№127			07.10	1				водосборник
3	JOY 12СМ30 №6710	СО47898	2007	30.07.0 7		1			Фл.Ук.
4	JOY 12СМ30 №6712	СО48046	2007	01.01.2 008	1				7008 В/ш

В гистограммах (рисунок 1.3) и таблице 1.2 представлены и систематизированы наработки проходческих работ по каждой шахте, из которых хорошо видно, что почти 100% объема работ приходится на комбайны с исполнительными органами избирательного действия.

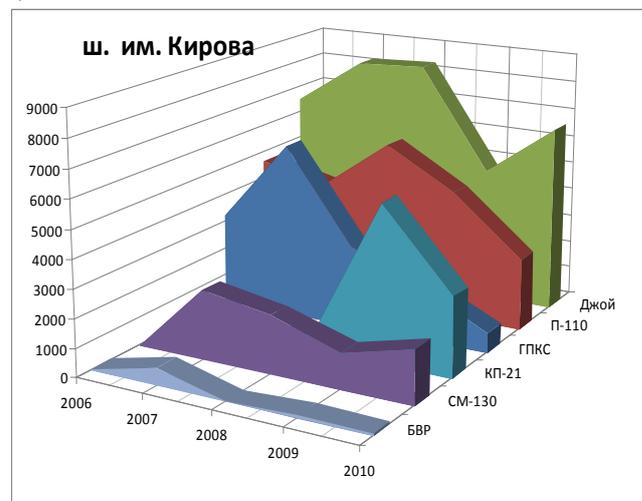
а)



б)



в)



г)

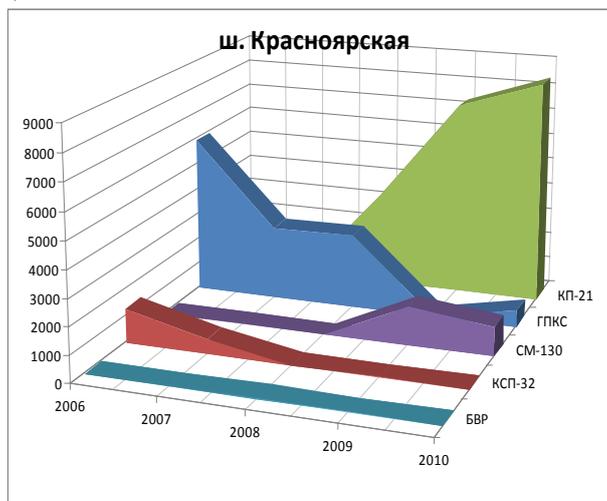
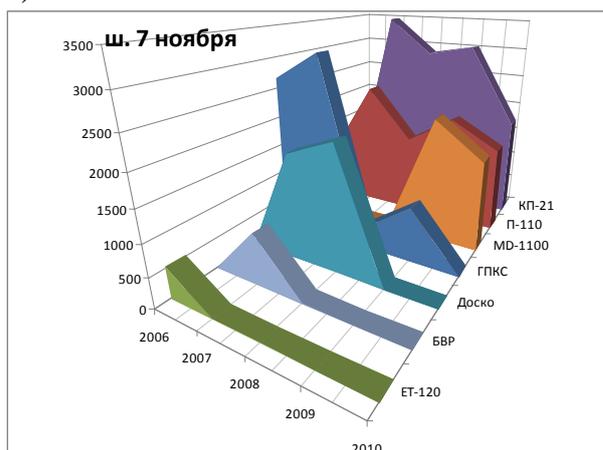
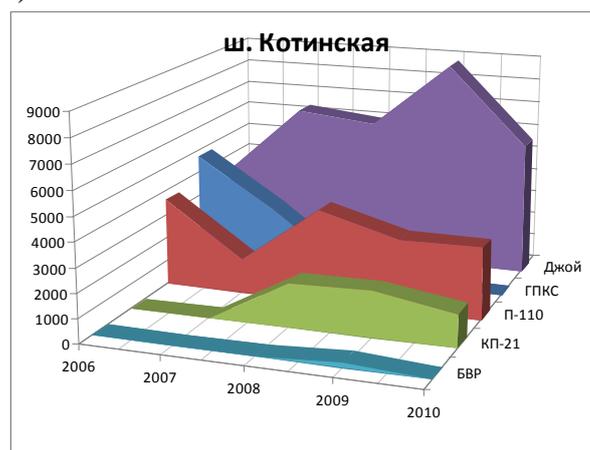


Рис. 1.3. Гистограммы наработки проходческих работ на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс»

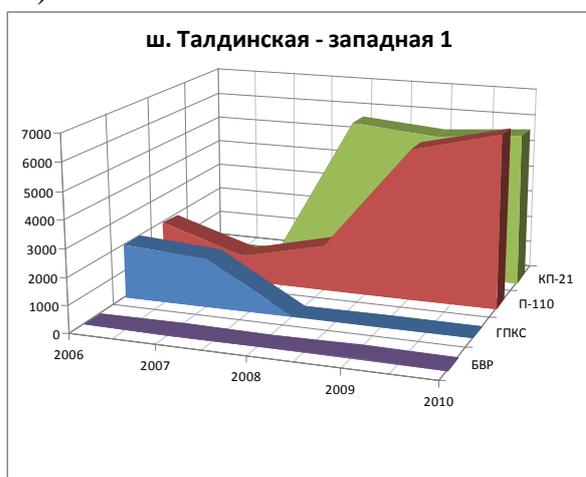
д)



е)



ж)



з)

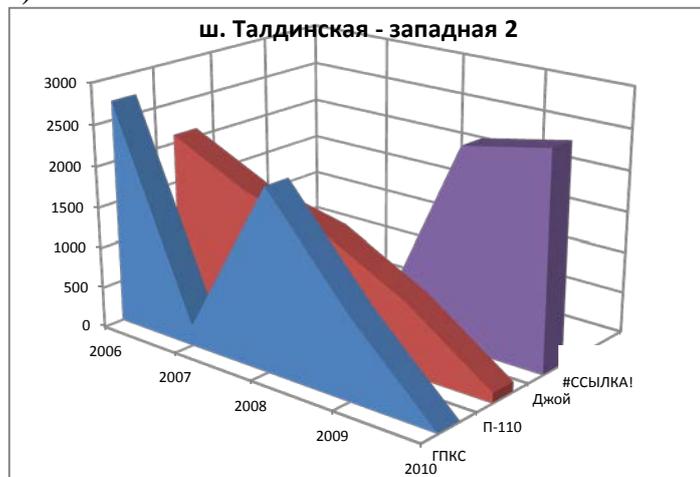


Рис. 1.3 (окончание). Гистограммы наработки проходческих работ на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс»

Таблица 1.2. Производительность различных способов проходки выработок в ОАО «СУЭК-Кузбасс»

	Количество	2008	2009	2010	2011	2012	Сумма
П-110	13	16982	12566	16544	16755	13477	76324
ГПКС	15	34129	28745	15650	9115	1362	89001
КП-21	19	7881	5205	18771	30462	31069	93388
СМ-130К	5	2369	11891	7239	4550	7623	33672
ET -120	1	552	0	0	0	0	552
Dosco	2	0	1780	2101	2122	1584	7587
Joy	13	9923	14944	14341	15970	14789	69967
Schteiger	1	0	290	0	0	0	290
Bucyrus	2	0	0	0	3221	4291	7512
КСП-32	1	1275	524	0	0	0	1799
БВР	-	114	1625	128	623	91	2581
Итого:		73225	77570	74774	82818	74286	

Важнейшим показателем, характеризующим эффективность работы проходческих комбайнов, является надежность работы узлов, так как она влияет на себестоимость проходки и на производительность комбайна, поскольку для замены элемента конструкции приходится останавливать комбайн, что снижает коэффициент готовности машины.

Как показывают приведенные данные и опыт эксплуатации проходческих комбайнов «Joy» и «Vicusus», они зарекомендовали себя как высокопроизводительные и надежные машины, но также отмечаются существенные недостатки – высокая стоимость, жесткие требования к условиям эксплуатации, а также необходимость иметь высококвалифицированных специалистов, обслуживающих данную технику.

Проходческие комбайны марок П-110, КП-21, ГПКС имеют меньшую наработку на единицу техники, но менее требовательны к эксплуатационным показателям. Из представленных параметров эксплуатации комбайнов видно, что среднее значение наработки на единицу техники приходится на проходческий комбайн СМ-130К. Комбайн эксплуатируется на ряде шахт, но наибольшую наработку показал в горно-технических условиях шахты «Полысаевская».

Исходя из вышесказанного, за основу исследования был принят данный комбайн, как усредненный вариант по наработке и надежности представленных комбайнов, эксплуатируемых на предприятиях ОАО «СУЭК-Кузбасс».

Комбайн предназначен для применения в подземных выработках шахт, в которых «Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах» допускается применение электрооборудования в исполнении РВ. Работа комбайна допускается в выработках только с устойчивыми боковыми породами. Применение комбайна допускается только при полном выполнении требований и рекомендаций руководства по эксплуатации.

Применение комбайна для проведения горных выработок с углом подъема и спуска более 18° , а также выработок, опасных по внезапным вы-

бросам угля и породы, не допускается. Температура окружающей среды при работе комбайна должна быть в пределах $+5^{\circ}\text{C} \dots +35^{\circ}\text{C}$. Обводненность выработки не должна превышать $2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Исходная запыленность не должна превышать $1 \text{ мг}/\text{м}^3$. Почва выработки должна допускать удельное давление не менее $0,14 \text{ МПа}$.

Максимальная длина кабеля при работе от подстанции ТСВП630 – не более 400 м при отсутствии дополнительных нагрузок. Сечение силового кабеля не менее 95 мм^2 . Рекомендуется применение выключателя автоматического АВ400, штрекового пускателя ПВИ 315 ($H+R$).

Сечение и транспортное оборудование выработок, по которым доставляется комбайн в забой, должны обеспечивать возможность доставки узлов комбайна с максимальными габаритами $4,0 \times 2,0 \times 1,0 \text{ м}$ и массой до 4 т .

Выработка должна быть оборудована водопроводом, обеспечивающим подачу осветленной воды, и допускающим содержание механических примесей размером не более $0,1 \text{ мм}$ и общей массой не более $50 \text{ мг}/\text{л}$, в количестве не менее $80 \text{ л}/\text{мин}$ и под давлением $0,8 \div 2,0 \text{ МПа}$.

Максимальный размер погружаемых питателем кусков отбитой горной массы не должен превышать 300 мм . Прочность пород забоя не должна превышать 80 МПа . Абразивность пород должна быть не более 15 мг (до III класса по шкале классификации горных пород по абразивности Л.И. Барона и А.В. Кузнецова).

Запрещается применение комбайна в подготовительных выработках шахт III категории по газу и выше без установки на комбайне и включения в схему управления метан-реле (типа ТМРК-3).

Основные параметры технической характеристики проходческого комбайна СМ-130К приведены в таблице 1.3.

Проходческий комбайн СМ-130К (рис. 1.4) предназначен для механизации разрушения, погрузки, транспортирования отбитой горной массы при проведении горизонтальных и наклонных ($\pm 18^{\circ}$) горных выработок арочной, трапециевидной и прямоугольной форм сечения забоя до 19 м^2 по углю и

смешанному забою с максимальным пределом прочности до 80 МПа в условиях шахт, опасных по газу и пыли.

Таблица 1.3. Технические характеристики комбайна СМ-130К

Параметр	Значение
Высота, мм	1790
Длина, мм	8050
Ширина без лотка, мм	2105
Ширина лотка, мм	2000 (3000)
Масса, кг	32000
Сечение выработки, м ² (трапециевидного или арочного профиля)	19,2
Высота выработки, мм (max)	4087
Ширина выработки, мм (max)	5005
Рекомендуемая высота выработки, мм	2000–3800
Наибольший подъем, град.	±18
Скорость передвижения, м/мин	0÷6
Удельное давление на грунт, Н/см ²	13,5
Ходовая часть с шириной траков, мм	520
Максимальная подрубка относительно нижней ветви гусеницы, мм	150
Производительность по углю и породам до 60 МПа (присечка 10–15%), м ³ /мин	1,8
Производительность по углю и породам 70–80 МПа (присечка до 80%), м ³ /мин	0,35
Суммарная мощность, кВт	232,5
Мощность привода рабочего органа, кВт	150
Напряжение питания, В	660
Способ пылеподавления – низконапорное, под зубок	

Комбайн имеет множество возможностей по применению – от проходки штреков в горной промышленности до использования в качестве добычной машины. При обработке забоя устойчивость комбайна обеспечивается опорным питателем и гидроопорами. Небольшая высота, небольшой вес (32 т) и легкая разборка облегчают применение комбайна в условиях шахты.

Проходческий комбайн СМ-130К состоит из следующих основных узлов: исполнительного органа с двумя аксиальными режущими головками (рисунок 1.5), поворотного механизма, погрузочного устройства, скребкового конвейера, гусеничного ходового механизма, рамы, гидрооборудования, электрооборудования, системы смазки, системы орошения и охлаждения.

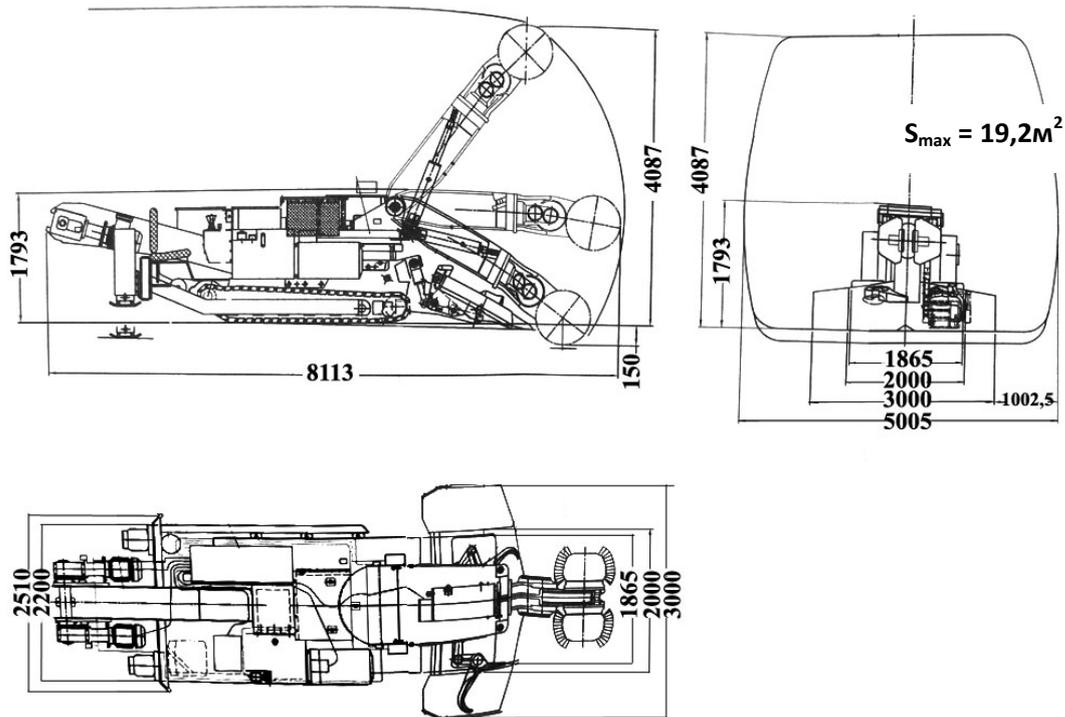


Рис. 1.4. Общий вид проходческого комбайна CM-130K

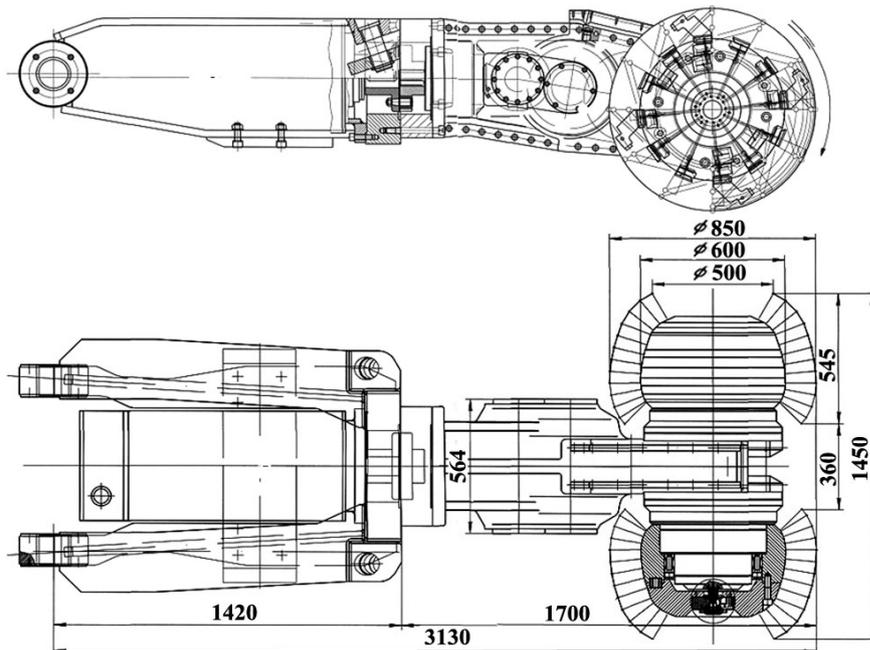


Рис. 1.5. Исполнительный орган проходческого комбайна CM-130K

Параметры исполнительного органа проходческого комбайна (рис. 1.5):

- электродвигатель АКВ250L4Г с водяным охлаждением (мощность $N = 150$ кВт; число оборотов $n = 1500$ об/мин);
- редуктор с двумя аксиальными (поперечными) резцовыми коронками (передаточное отношение (число) редуктора $i = 22,5$; частота вращения

коронки $n = 65$ об/мин; количество резцов на каждой коронке – 44 шт.; диаметр по резцам – 850 мм; количество заливаемого масла типа *TEBOIL PRESSURE* – 45 л).

На исполнительном органе проходческого комбайна СМ-130К используются резцы РШ 30-75/17,5; их стоимость ~ 190 рублей; расход резцов: (250–300 шт.) / 250 м проходки, т.е. (~ 1 резец / 1 м проходки).

1.3. Показатели надежности эксплуатации проходческого комбайна с исполнительными органами избирательного действия

Основные диагностические исследования и хронометражные замеры были осуществлены по пласту Толмачевскому ш. «Полысаевская».

Мощность пл. Толмачевского в контуре лавы №18–10 колеблется от 2,45 м до 2,70 м. Пласт угля состоит из двух пачек, разделенных прослойком алевролита мощностью 0,20–0,35 м. Уголь пласта блестящий и полублестящий с тонкими прослойками матового. Уголь кларенового типа с содержанием витринита 88 %. В угольных пачках и прослойке хорошо развиты трещины кливажа, которые простираются под углом 40–60° к оси штреков и имеют крутое падение. Трещины кливажа нередко способствуют отжимам угля от груди забоя и от бортов штреков. Особую опасность представляют отжимы угля от бортов штреков, куски которых могут достигать до 1,0 × 1,0 × 0,5 м. В верхней угольной пачке (реже в нижней) встречаются включения «колчеданов» размером до 1,3 × 0,3 × 0,8 м. Эти образования имеют предел прочности $\sigma_{сж} = 76$ МПа. При ведении горных работ возможны также частичные замещения и размывы пласта, заполненные песчаником и «колчеданом». Горно-технические условия применения комбайна представлены в таблице 1.4.

Проходка осуществляется с присечкой породы мощностью 0,15–0,45 м по почве и кровле. Предел прочности на сжатие присекаемых пород достигает 120 МПа.

Таблица 1.4. Горнотехнические условия

Наименование условия	Единица измерения	Значение
Мощность пласта	м	2,45–2,7
Количество породных прослоек	шт	1
Мощность породных прослоек	м	0,20–0,35
Угол падения пласта	градус.	4–6
Плотность угля	т/м ³	1,28
Сопrotивляемость угля резанию	Н/см	129
Сопrotивляемость пласта резанию	Н/см	245
Марка угля		Г
Влажность угля природная	%	3,3
Группа пыльности пластов	гр.	VII
Крепость вмещающих пород – алевролитов	f	2,0–3,0
Содержание пыли в отбитом угле	%	2,9
Удельное пылевыведение	г/т	1000
Сечение выработки в проходке	м ²	11,1
Сечение выработки в свету	м ²	10,9
Присечка породы в забое	%	17,5
Планирование подвигания забоя в сутки	м	7,2
Планирование подвигания забоя в месяц	м	200
Производительность комбайна по углю	т/мин	5,5
Производительность комбайна с присечкой породы 5%	т/мин	3,9
Минимальное количество воздуха, подаваемого в забой	м ³ /мин	139
Скорость воздуха в забойной зоне	м/с	0,25

По результатам хронометражных наблюдений в условиях шахты «Полысаевская» узлы проходческого комбайна СМ-130К были систематизированы по наработкам (таблица 1.5, рис.1.6).

Таблица 1.5. Систематизация узлов комбайна СМ-130К по наработке

Узел	Общее число отказов	Общее время простоев, ч
Магнитная станция	13	143
Гидроблок	2	74
Маслостанция	4	222
Перегружатель	4	120
Рабочий орган	1	443
Конвейер	1	Нет данных
Система орошения	1	Нет данных

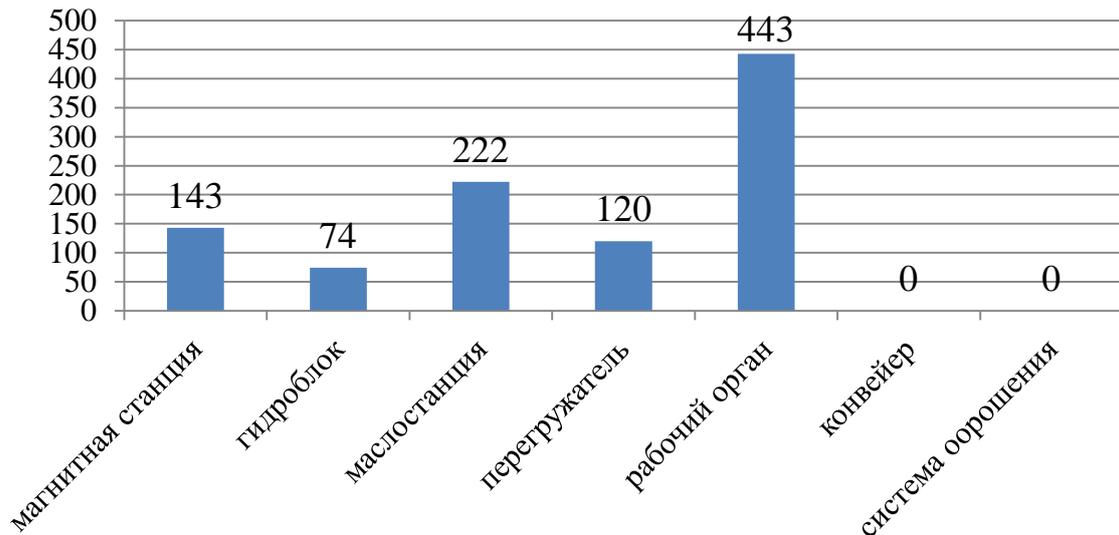


Рис. 1.6. Распределение наработок узлов проходческих комбайна CM-130

Надежность машины в целом можно оценивать по результатам испытаний или эксплуатационных наблюдений, которые называют определятельными. По результатам испытаний или наблюдений для восстанавливаемых объектов контролируют, как правило, среднюю наработку на отказ. В этом случае часто предлагают распределение наработки на отказ, подчиняющееся экспоненциальному закону (такое распределение, как показывает практика, справедливо для изделий машиностроения).

Среднюю наработку на отказ можно оценить по формуле [11, 12]:

$$T_{\text{ср}} = \frac{t_{\Sigma}}{m}, \text{М}^3 \quad (1.1)$$

где $t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i$ – суммарное время испытаний n изделий; m – общее число отказов, возникающих в процессе испытаний.

Вследствие того, что в процессе наблюдений участвует малое количество изделий (2 комбайна CM-130K) и состав выборки случаен, то расчетные значения могут отличаться от соответствующих статистических оценок. Чтобы учесть это возможное отличие, вводится доверительный интервал значений (см. главу 3).

В результате обработки данных, полученных по итогам наблюдений за работой комбайнов, определено, что при заданной годовой наработке

(30 тыс.м³) магнитная станция не может эксплуатироваться при данной нагрузке. На это указывают значения верхней и нижней границы доверительного интервала наработки ($T_B = 12,09$ тыс. м³, $T_H = 7,01$ тыс. м³), что значительно ниже, чем заданный уровень. Этим можно объяснить и значительное количество отказов ($m = 13$) за рассматриваемый период.

Расчет наработки для других узлов комбайна показал, что заданный уровень (30 тыс. м³) соответствует расчетному и входит в доверительные границы.

За счет кливажа наблюдается отжим угля от бортов штрека величиной до 1 метра. В верхней и реже в нижней частях штреков встречаются твердые включения крепостью до $f = 7-8$ по шкале М.М. Протодьяконова, размер которых может достигать 1,3 м. Погрузка же отбитой горной массы может осуществляться небольшими фракциями, не превышающими размера 0,3 м.

При проведении проходческих работ вывал негабаритов способствует значительному увеличению усилий на механизм погрузочного устройства, в том числе как на сами нагребавшие лапы, так и на редуктор, что приводит к преждевременному выходу этих устройств из строя.

При контакте резцов с твердыми включениями возникает резкое увеличение нагрузок в редукторе исполнительного органа и электродвигателе привода, что приводит к возрастанию токов и выходу из строя магнитной станции. Повышенная динамика приводит к преждевременному выходу вспомогательных устройств элементов системы гидропривода.

1.4. Системы обслуживания горной техники, эксплуатирующейся на предприятиях ОАО «СУЭК-Кузбасс»

Продолжительная и надежная работа горных машин возможна только при условии систематического и качественного проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту оборудования. Система технического обслуживания (ТО) и ремонта – это совокупность взаимосвязанных техни-

ческих средств, документации, исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества оборудования (ГОСТ 18322—78). Ремонт – комплекс работ для поддержания и восстановления исправности или работоспособности машин. Система технического обслуживания и ремонта - комплекс взаимосвязанных положений и норм, определяющих организацию и порядок проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту машин в заданных условиях эксплуатации для обеспечения показателей качества, предусмотренных нормативной документацией.

Сегодня предприятия самостоятельно несут ответственность за планирование и организацию ремонтов для обеспечения постоянной работоспособности оборудования. При этом одновременно расширяются их права по многим важным направлениям, включая:

- финансирование ремонта и его материального обеспечения;
- регулирование численности ремонтного и оперативного персонала;
- применение различных стратегий ремонта;
- планирование ремонта с учетом полезного использования и ужесточенных сроков службы оборудования.

Структурная схема технического обслуживания и ремонта представлена на рисунке 1.7.

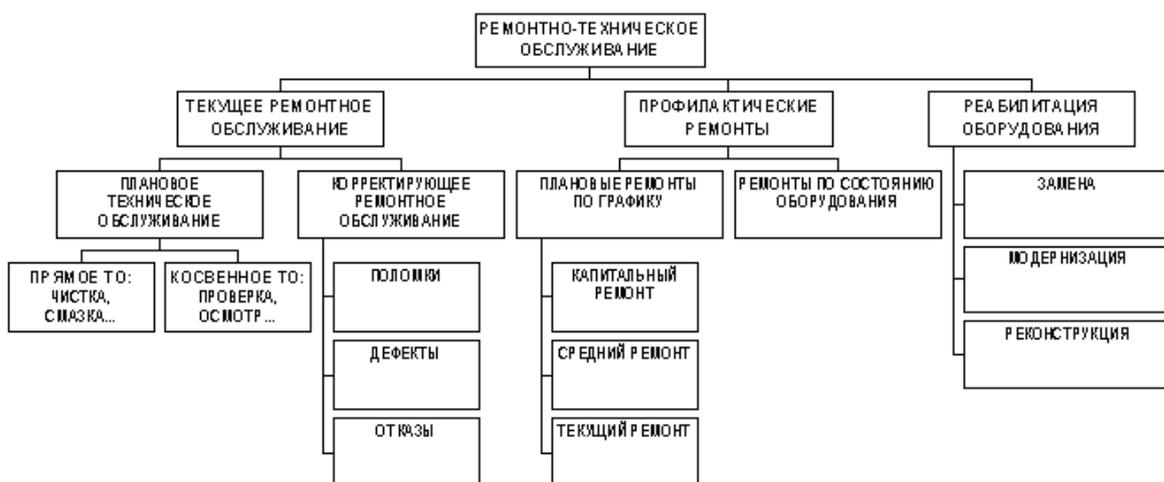


Рис. 1.7. Структурная схема ремонта

Для поддержания технического состояния горных машин на необходимом уровне в горном производстве реализуются различные системы организации ремонта. Среди них наибольшее распространение получили системы послеосмотровых, периодических, стандартных и планово-предупредительных ремонтов и их модификации [14].

Система послеосмотровых ремонтов позволяет планировать ремонтные работы и дает возможность предупреждать прогрессирующее изнашивание деталей и механизмов оборудования. В общем виде организация этой системы ремонтов происходит следующим образом:

1. Путем периодических осмотров оборудования устанавливается состояние машин, в зависимости от которого намечаются сроки и вид ремонта (текущий или капитальный).

2. На основе этих данных составляется план выполнения ремонтов. Необходимые для планирования сведения об объемах ремонтов получают путем составления при осмотре предварительной ведомости дефектов.

3. К плановым срокам ремонта, установленным по результатам осмотров оборудования, приурочивается изготовление необходимых деталей.

Эта система имеет ряд недостатков. Так как ремонты по этой системе планируются на основе данных о состоянии оборудования, получаемых путем периодических осмотров, точность планов ремонта, их соответствие действительной потребности в ремонте находятся в непосредственной зависимости от точности оценки их состояния. Но оценка состояния оборудования при осмотрах производится субъективно, поскольку система не устанавливает критериев, пользуясь которыми, можно было бы точно определить потребность в ремонте. На крупных предприятиях при наличии большого парка сложного оборудования часто возникают ошибки в определении состояния оборудования и назначении сроков ремонтов.

Применение методики, предусмотренной системой послеосмотровых ремонтов, позволяет достичь более или менее достаточной точности планирования ремонта лишь в условиях небольших производств.

Серьезным недостатком системы послеосмотровых ремонтов является то, что она не устанавливает нормальных объемов плановых ремонтов и вообще не содержит в себе никаких нормативов. Вследствие этого невозможно рассчитать штат ремонтных рабочих, необходимый для содержания оборудования в нормальном состоянии и определить денежные и материальные средства.

Система периодических ремонтов основана на планировании и проведении осмотров и ремонтов оборудования в строго установленные сроки в зависимости от режима работы оборудования и сложности его конструкции. При этом заранее не планируется замена деталей и сборочных единиц. Их замена производится по мере необходимости, устанавливаемой при осмотрах и ремонтах. При такой организации, как и при послеосмотровых ремонтах, невозможно планировать объемы ремонтных работ и своевременно выявлять потребность в запасных частях, что затрудняет распределение рабочей силы и ремонтного оборудования во времени и осложняет в целом организацию работы ремонтной службы. Достоинство системы – выполнение ремонта по фактическому состоянию оборудования, наибольшее использование ресурса деталей и, в связи с этим, меньший расход запчастей.

Приведенные выше системы организации ремонтов отличаются гибкостью. Их применяют для оборудования, работающего при переменных нагрузках.

Система стандартных ремонтов основана на обязательной замене определенной части деталей и сборочных единиц в строго установленные сроки. При этом планируют ремонты заранее с известным перечнем работ. В таком случае принудительно заменяются детали и сборочные единицы, не отработавшие свой ресурс. Как исключение, могут не заменяться детали, которые гарантируют нормальную работу оборудования до следующего ремонта. Достоинство системы – высокая надежность работы оборудования, возможность планирования ремонтов по срокам и объемам, обеспечение стабильности работы ремонтной службы. Недостаток – высокая стоимость ремонта из-

за повышенного расхода запасных частей и завышенного объема ремонтных работ вследствие ускоренных замен деталей. Систему стандартных ремонтов рационально применять для оборудования типа насосов водоотлива, вентиляторов главного проветривания, компрессоров, шахтных подъемных установок и др., работающего в установившемся режиме, и отказ которого влечет за собой тяжелые последствия.

Система планово-предупредительных ремонтов (ППР) – совокупность организационных и технических мероприятий по уходу, надзору, эксплуатации и ремонту оборудования, направленных на предупреждение преждевременного износа деталей, узлов и механизмов и содержание их в работоспособном состоянии.

Сущность этой системы состоит в том, что после отработки оборудованием определенного времени производятся профилактические осмотры и различные виды плановых ремонтов, периодичность и продолжительность которых зависят от конструктивных и ремонтных особенностей оборудования и условий его эксплуатации.

Система ППР предусматривает также комплекс профилактических мероприятий по содержанию и уходу за оборудованием. Она исключает возможность работы оборудования в условиях прогрессирующего износа, предусматривает предварительное изготовление деталей и узлов, планирование ремонтных работ и потребности в трудовых и материальных ресурсах. Положения о планово-предупредительных ремонтах разрабатываются и утверждаются отраслевыми министерствами и ведомствами и являются обязательными для выполнения предприятиями отрасли. Так, на металлургических заводах действует положение, которое является руководящим документом, определяющим основы организации планово-предупредительных ремонтов оборудования и подъемно-транспортных средств.

Основное содержание ППР – внутрисменное обслуживание (уход и надзор) и проведение профилактических осмотров оборудования, которое обычно возлагается на дежурный и эксплуатационный персонал цехов, а

также выполнение плановых ремонтов оборудования. Системой ППР предусматриваются также плановые профилактические осмотры оборудования инженерно-техническим персоналом механической службы предприятия, которые производятся по графику, утвержденному главным механиком предприятия. Грузоподъемные машины, кроме обычных профилактических осмотров, подлежат также техническому освидетельствованию, проводимому лицом по надзору за этими машинами.

Системой ППР предусматриваются ремонты оборудования двух видов: текущие и капитальные.

Текущий ремонт оборудования включает выполнение работ по частичной замене быстроизнашивающихся деталей или узлов, выверке отдельных узлов, очистке, промывке и ревизии механизмов, смене масла в емкостях (картерных) систем смазки, проверке креплений и замене вышедших из строя крепежных деталей.

При капитальном ремонте, как правило, выполняется полная разборка, очистка и промывка ремонтируемого оборудования, ремонт или замена базовых деталей; полная замена всех изношенных узлов и деталей; сборка, выверка и регулировка оборудования. При капитальном ремонте устраняются все дефекты оборудования, выявленные как в процессе эксплуатации, так и при проведении ремонта.

Периодичность остановок оборудования на текущие и капитальные ремонты определяется сроком службы изнашиваемых узлов и деталей, а продолжительность остановок — временем, необходимым для выполнения наиболее трудоемкой работы. Для выполнения планово-предупредительных ремонтов оборудования составляются графики. Каждое предприятие обязано составлять по установленной форме годовой и месячный графики ППР.

Для каждого конкретного случая характерен свой перечень проводимых мероприятий системы ППР, устанавливаемый специальным положением о ППР по каждой отрасли и предусматривающий выполнение определенного перечня указанных выше мероприятий. Техническое обслуживание заключа-

ется прежде всего в поддержании работоспособного состояния оборудования путем проведения различного рода малотрудоемких операций: осмотры, проверки, смазки, регулировки, крепежа, чистки, замены быстроизнашивающихся деталей (щеток, колодок, упругих элементов муфт и др.), сварки и наплавки. Другая основная задача технического обслуживания – контроль износа отдельных деталей и сборочных единиц с целью составления дефектной ведомости на ближайший плановый ремонт. От качества выполнения этого вида работы зависит качество ремонтных работ и, в конечном итоге, надежность эксплуатации машин. Плановые ремонты производятся в установленные нормативами системы ППР сроки и имеют дифференцированный объем (T_1, T_2, T_3, \dots, K) в соответствии со структурой ремонтного цикла, разработанной для определенного вида оборудования. Перечень ремонтных работ для каждого вида планового ремонта не известен. Он устанавливается по результатам осмотров оборудования во время технического обслуживания.

Достоинства системы ППР – в возможности планирования ремонтных работ; определения мощности ремонтной базы предприятия (по трудоемкости ремонта оборудования); обеспечения стабильной и устойчивой работы ремонтных служб; уменьшения расхода запасных частей и стоимости ремонта по сравнению со стандартной системой. Недостатки системы ППР обуславливаются значительным разнообразием условий работы горного оборудования и различными требованиями к эффективности его эксплуатации. Среди них следует отметить, прежде всего, недостаточное качество, высокую стоимость и продолжительность ремонтных работ как результат низкого уровня технологической подготовки ремонта.

Совершенствование системы ППР велось и ведется по следующим направлениям: переход планирования межремонтных сроков в единицах наработки, максимально отражающих фактический износ оборудования; централизация всех видов технического обслуживания и ремонтов и специализация ремонтников на выполнение узкого круга операций; внедрение агрегатно-узлового метода ремонта; организация смазочного хозяйства на

уровне, отвечающем современным требованиям; комплексная механизация наиболее трудоемких ремонтных и других связанных с ними вспомогательных работ; внедрение методов и средств технической диагностики состояния машин; разработка и внедрение АСУ техническим состоянием оборудования.

Поэтапная система ремонтов. Эта система разработана Кузнецким филиалом НИИОГР и Московским государственным горным университетом и представляет собой усовершенствованную систему ППР. Отличительная особенность поэтапной системы – не единовременное восстановление оборудования путем проведения капитального ремонта, а поэтапное, в течение установленного ремонтного цикла, по мере отработки ресурса каждой сборочной единицей или агрегатом. Трудозатраты и стоимость капитального ремонта распределяются равномерно по этапам эксплуатации машины, устраняя тем самым резкое снижение эффективности эксплуатации оборудования. Ремонт по этой системе организации заключается в следующем. В процессе проведения текущих ремонтов, наряду с обязательным объемом работ, выявленным в результате осмотров оборудования, производятся ремонты наиболее изношенных сборочных единиц и механизмов. При этом за счет совмещения ремонтных работ удается исключить многие трудоемкие ремонты, в том числе и капитальный.

Система гарантийных ремонтов заключается в выполнении ремонтов с гарантией безотказной работы оборудования. Основные гарантии – четкое техническое обслуживание машин в период между плановыми ремонтами, принятие машин ремонтным и эксплуатационным персоналом на сохранность. При этом заказчику выдается гарантийный паспорт на каждый отремонтированный объект, подтверждающий качество выполненных ремонтных работ.

Система гарантийных ремонтов получила в последнее время широкое распространение на горных предприятиях и представляет новый шаг в дальнейшем совершенствовании организации ремонтов.

Система профилактического (упреждающего) обслуживания по фактическому техническому состоянию. Основная идея этой системы состоит в устранении отказов оборудования путем применения методов распознавания технического состояния оборудования по совокупности его виброакустических характеристик, выявления имеющихся или развивающихся дефектов и определения оптимальных сроков проведения ремонтных работ.

Обслуживание по фактическому техническому состоянию имеет ряд преимуществ по сравнению с ППР:

- наличие постоянной информации о состоянии агрегатов, охваченных мониторингом (вибродиагностика позволяет определять проблемное и нормальное оборудование), позволяет планировать и выполнять техническое обслуживание и ремонт без остановки производства и практически исключить отказы (внеплановые остановки) оборудования;
- посредством внедрения профилактического обслуживания можно добиться увеличения эффективности производства от 2 до 10% за счет прогнозирования и планирования объемов технического обслуживания и ремонта проблемного оборудования, снижения расходов по техническому обслуживанию (увеличение межремонтного интервала) нормального оборудования;
- внеплановый объем работ, вызванный чрезвычайными ситуациями, обычно составляет менее 5% от общего объема работ, а время простоя оборудования – не более 3% от времени, затраченного на техническое обслуживание: опыт показывает, что типичные расходы на ремонт при аварийных отказах оборудования в среднем в 10 раз превышают стоимость ремонта при вовремя обнаруженном дефекте;
- обеспечивается более эффективное ремонтное обслуживание за счет послеремонтного вибрационного обследования: опыт показывает, что от 2 до 10% новых деталей имеют дефекты изготовления, которые могут привести к быстрому выходу замененной детали из строя и отказу оборудования, а также вызвать повреждение других нормально функционировавших

деталей. Дефектная деталь или нарушения технологии сборки в ряде случаев могут быть обнаружены в процессе проведения виброиспытаний после ремонта;

- возможно более эффективное планирование распределения обслуживающего персонала, запасных частей, инструмента и др., а также сокращение резервного оборудования;
- повышается качество продукции, которое в ряде случаев определяется воздействием со стороны оборудования, имеющего механические дефекты. Мониторинг технического состояния и упреждающий ремонт позволяют не допускать такого изменения технического состояния оборудования, которое может привести к браку, поскольку ремонт может быть произведен до того, как будет поставлено под угрозу качество продукта;
- улучшаются условия охраны труда, поскольку проведение ремонтных работ в чрезвычайной обстановке внезапного отказа и опасности внеплановой остановки производства приводит к повышению травматизма;
- экономятся энергоресурсы, т.к. устранение источников повышенной вибрации в некоторых случаях приводит к снижению удельных затрат энергии на 1...15%;
- увеличивается эффективность переговоров с поставщиками оборудования относительно его гарантийного ремонта, восстановления, замены или изменения конструкции, поскольку записываемые параметры вибрации документально отображают техническое состояние агрегата в момент пуска, приработки и гарантийной эксплуатации и являются доказательствами для арбитража.

Техническая база профилактического обслуживания основана на том, что существует взаимосвязь между возможными техническими неисправностями агрегата и диагностическими параметрами, которые можно контролировать. Другими словами, большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в агрегате, имеют определенные диагностические признаки и параметры, предупреждающие о том, что дефекты присутствуют, развива-

ются и могут привести к отказу. Диагностические признаки дефектов могут включать параметры вибрации, технологические и режимные параметры (температуру, нагрузку, давление, влажность и др.), частицы износа в смазке и т. д. В частности, при износе деталей наблюдается изменение уровня вибрации (рисунок 1.8). Следовательно, проводя мониторинг различных параметров, характеризующих работу оборудования, можно вовремя обнаружить изменение технического состояния оборудования и провести техническое обслуживание только тогда, когда возникает реальная возможность выхода его параметров за недопустимые пределы, т.е. когда дальнейшая эксплуатация невозможна.

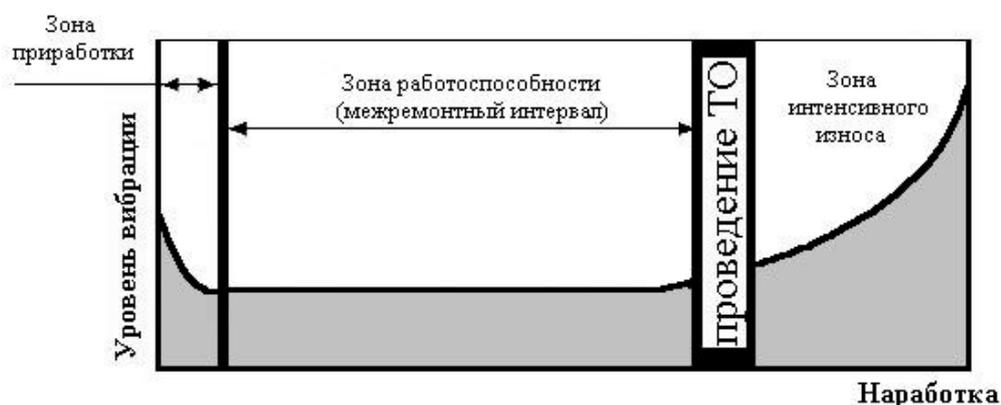


Рис. 1.8. Классический график изменения уровня вибрации в зависимости от наработки контактирующих поверхностей

Обслуживание по фактическому техническому состоянию предполагает периодический вибромониторинг оборудования. Наблюдение за развитием и применением средств измерений показывает, что предприятия (особенно крупные) начинают осуществлять программу профилактического обслуживания именно с распознавания и определения состояния оборудования при помощи мониторинга вибрации. Затраты на вибромониторинг и вибродиагностику, в случае добросовестного, обоснованного и систематического применения, обычно окупаются за 2...6 месяцев использования [15].

Обслуживание оборудования по фактическому техническому состоянию базируется на применении ряда методов технической диагностики и распознавания технических состояний, которые в сочетании позволяют определять большую часть различных дефектов, возникающих в технологи-

ческом оборудовании предприятия. В таблице 1.6 представлен список наиболее распространенных методов технической диагностики и распознавания технических состояний оборудования, применяемых при профилактическом обслуживании [16].

Идея активного технического обслуживания оборудования (в дальнейшем – активное обслуживание) заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов [17].

Таблица 1.6. Наиболее употребляемые методы диагностики

Метод	Объект
Вибродиагностика и вибромониторинг	Энергомеханическое оборудование с движущимися деталями
Акустико - эмиссионная диагностика	Сосуды, работающие под давлением, резервуары, трубопроводы, несущие металлоконструкции
Трибодиагностика (анализ качества смазки и выявление частиц износа)	Ответственное энергомеханическое оборудование, в том числе низкооборотное, трансформаторы
Тепловидение и термография	Электроэнергетическое оборудование, теплообменное оборудование, теплоизоляция, котлы, печи и др.
Анализ токов и электроимпульсное тестирование	Токопроводящая часть и изоляция электродвигателей, эксцентриситет
Аэроультразвуковой контроль утечек (вакуумные утечки)	Компрессионное оборудование
Ультразвуковая дефектоскопия	Состояние и толщина стенок трубопроводов, сосудов и резервуаров
Параметрическая диагностика технологического процесса	Технологическая или механическая деградация, коррозия стенок

Основой активного технического обслуживания являются:

- идентификация и устранение источников повторяющихся проблем, приводящих к сокращению межремонтного срока;

- устранение или значительное снижение факторов, отрицательно влияющих на межремонтный интервал или срок эксплуатации оборудования;
- распознавание состояния нового и восстановленного оборудования с целью проверки отсутствия признаков дефектов, уменьшающих межремонтный период;
- увеличение межремонтного интервала и срока эксплуатации оборудования за счет проведения монтажных, наладочных и ремонтных работ.

Активное обслуживание базируется на применении нескольких составляющих:

- анализ причин внеплановых остановок, аварий, укороченных межремонтных интервалов, включающий выявление повторяющихся проблем, возникающих при эксплуатации оборудования;
- оценка технического состояния агрегата после ремонта;
- входной и выходной контроль;
- кадровое обеспечение.

Сочетание этих составляющих при проведении технического обслуживания и ремонта дает максимальный эффект.

Основа всех систем организации – техническое обслуживание и ремонт. Цель технического обслуживания и ремонта – предупреждение отказов путем устранения неисправностей. В зависимости от учета состояния оборудования существуют два направления ТОР: по наработке и по состоянию.

При техническом обслуживании и ремонте по наработке для каждой детали или группы деталей задается строго фиксированная наработка, по достижении которой они обязательно подлежат техническому обслуживанию или заменяются на новые вне зависимости от их состояния. Это направление целесообразно применять для деталей, работающих в установившемся режиме и имеющих незначительный разброс сроков службы (коэффициент вариации распределения меньше единицы). Следовательно, периодичность операций ТОР в данном случае целиком и полностью определяется значением наработки машин с начала эксплуатации. Объем технического обслуживания

или ремонта устанавливается в момент начала их выполнения на основе дефектации. Недостаток стратегии ТОР по наработке – значительное недоиспользование ресурса деталей и сборочных единиц и, как следствие, большой расход запасных частей и большие простои в плановом ремонте. Цель стратегии по наработке – заранее восстановить ресурс машин.

При стратегии технического обслуживания и ремонта по состоянию объем работ и периодичность ТОР определяется только фактическим состоянием оборудования на момент его выполнения. Техническое состояние определяется по результатам контрольного осмотра, периодичность которого может быть фиксированной или изменяющейся в зависимости от результатов прогнозирования параметров технического состояния машин. Цель стратегии ТОР по состоянию – восстановить ресурс машины. Достоинство стратегии – более полное использование ресурса деталей и сборочных единиц, а отсюда меньшие частоты ремонтных воздействий, простои в ремонтах, расход запасных частей и, в конечном итоге, стоимость ремонта.

В системе технического обслуживания и ремонта горного оборудования в условиях горных предприятий ОАО «СУЭК-Кузбасс» нет теоретически обоснованного решения о выборе системы и стратегии ТОР. Это приводит к широкому выбору рекомендаций по формированию структуры ремонтного цикла одного и того же оборудования. Поэтому оптимизация структуры ремонтного цикла для различных типов горного оборудования применительно к горным предприятиям ОАО «СУЭК-Кузбасс» является важной задачей.

1.5. Основные итоги и выводы

1. Из всех существующих способов проходки подготовительных выработок с трудными горно-геологическими условиями месторождений предприятия «СУЭК-Кузбасс» в настоящее время наиболее приемлемым остается механический способ разрушения массива комбайнами избирательного действия и буровзрывной.

2. Среднее значение наработки на единицу техники приходится на проходческий комбайн СМ-130К. Комбайн эксплуатируется на ряде шахт, но наибольшую наработку произвел на шахте «Полысаевская».
3. Наиболее перспективным способом продления срока эксплуатации проходческих комбайнов является их обслуживание по фактическому состоянию.
4. Одним из способов улучшения технико-экономических показателей проходки подготовительных выработок является применение диагностических методов контроля узлов и механизмов проходческих комбайнов, позволяющих сократить время их простоя.

2. ДИАГНОСТИКА ГОРНОПРОХОДЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Обзор и анализ методов диагностики технического состояния горнопроходческого оборудования

Современное оборудование, применяемое при проходке горных выработок различного назначения на угольных шахтах, диктует новые требования для осуществления ремонта и технического обслуживания. Обеспечение бесперебойной работы оборудования и сокращение времени на нерегламентируемые простои невозможно без внедрения прогрессивных стратегий технического обслуживания, которые неразрывно связаны с использованием методов неразрушающей технической диагностики. Современный этап развития диагностики в большей степени характеризуется не поиском решения теоретических задач, а практическим применением известных решений [18]. При этом следует отметить такие специфические особенности горнопроходческого оборудования, как сложность и разнообразие конструкций, тяжелые условия труда и обслуживания.

В настоящее время известно большое количество методов неразрушающего контроля, которые позволяют по этапам проследить процесс изготовления деталей, определить зарождающийся дефект и причину его возникновения, не допустить аварийную остановку горного оборудования [19]. Все методы неразрушающего контроля, применяемые при изготовлении, ремонте и эксплуатации, можно разделить на две большие группы – тестовые и функциональные.

Тестовые методы требуют вывода оборудования из эксплуатации, что зачастую не представляется возможным на действующем горном предприятии. Поэтому для оценки технического состояния применяются методы функциональной диагностики. К ним относятся:

- визуальный осмотр;
- анализ шумов механизма;

- виброметрия;
- тепловизионная диагностика;
- анализ смазки.

Визуальный осмотр. Наиболее простым способом выявления неисправностей механического оборудования является визуальный осмотр. Этот метод основан на различном отражении света от поверхности контролируемого изделия и дефектов. Именно с визуального осмотра обычно начинаются все мероприятия по неразрушающему контролю. Данный вид контроля проводится как с использованием специальных приспособлений, так и без них. Визуальный метод контроля доказал свою высочайшую эффективность, в частности, при контроле качества основного металла и сварных швов.

Недостатком визуального осмотра является человеческий фактор (физическое и эмоциональное состояние контролера, утомляемость и т.д.). Основным недостатком человеческого глаза является то, что при малой освещенности ему не помогают лучшие оптические приборы. Чаще всего осмотр проводится в условиях худшей освещенности, чем при дневном свете. Требования к освещенности для выполнения различных работ приведены в табл. 2.1 [20]. Нормы освещенности поверхности объекта при визуальном оптическом контроле в зависимости от размеров дефекта и контраста дефекта с фоном приведены в ГОСТ 23479-79 [21].

Таблица 2.1 Освещенность в различных условиях и рекомендации

Рекомендуемая освещенность	
Условия	Освещенность, лк
Обычное чтение	275
Точная механическая работа	550
Визуальный контроль	1100

Анализ шумов механизма. Слуховые ощущения являются отражением воздействующих на слуховые рецепторы звуковых волн, порождаемых звучащим телом и представляющих собой переменное сгущение и разреже-

ние воздуха [22]. Звуковые волны обладают различной амплитудой колебания. Амплитуда колебаний – наибольшее отклонение звуковой волны от среднего значения. Чем больше амплитуда колебания, тем сильнее звук, чем меньше амплитуда, тем звук слабее. Сила звука прямо пропорциональна квадрату амплитуды. Все слышимые звуки разделяются на шумы и музыкальные звуки. Первые отражают непериодические колебания неустойчивой частоты и амплитуды, вторые – периодические колебания. Между музыкальными звуками и шумами нет резкой грани. Акустическая составная часть шума часто носит ярко выраженный музыкальный характер и содержит разнообразные тоны, которые легко улавливаются специалистом [22].

Акустический шум и колебания механизмов давно используются для оценки их технического состояния. В механических устройствах в качестве степени повреждений часто выступает зазор между деталями. Наличие зазора вызывает соударение деталей во время работы. Физическое проявление этого процесса реализуется в виде распространения упругих волн акустического диапазона, возникновения вибрации и ударных импульсов.

Несмотря на распространенность данного метода, он имеет ряд недостатков:

- субъективная оценка повреждений;
- невозможность работы специалиста на различном оборудовании;
- возможности человеческого слуха заметно ухудшаются на очень низких и очень высоких частотах.

Виброметрия. Вибрационные процессы можно разделить на стационарные – определённые во времени и нестационарные – не определённые во времени [23]. Стационарные процессы могут быть периодическими, гармоническими или полигармоническими и непериодическими – почти периодическими, переходными, а также случайными.

Вибрационный анализ – метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией,

обусловленной структурой исследуемого объекта. Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта.

При вибрационной диагностике как правило исследуются временной сигнал или спектр вибрации того или иного оборудования. Также применяется кепстральный анализ (кепстр – анаграмма слова «спектр»). При вибрационной диагностике анализируются виброскорость, виброперемещение, виброускорение.

В качестве диагностических параметров могут выступать следующие [24]:

- ПИК – максимальное значение сигнала на рассматриваемом интервале времени;
- СКЗ – среднее квадратическое значение (действующее значение) сигнала для рассматриваемой полосы частот;
- ПИК-фактор – отношение параметра ПИК к СКЗ;
- ПИК-ПИК (размах) – разница между максимальным и минимальным значением сигнала на рассматриваемом интервале времени;
- SPM – метод ударных импульсов, основанный на использовании специального датчика с резонансной частотой 32 кГц и алгоритма обработки ударных волн малой энергии, генерируемых подшипниками качения вследствие соударений и изменений давления в зоне качения этих подшипников;
- EVAM (Evaluated Vibration Analysis Method) – метод анализа вибрации с оценкой состояния. Метод EVAM[®] объединяет в себе различные общепризнанные методики анализа вибросигналов вместе с программными средствами практической оценки состояния оборудования на основе результатов такого анализа;
- SPM-M – пик-фактор на резонансной частоте акселерометра;
- RPF – пик-фактор высших частот вибрации механизмов;

- ARP – распределение амплитуд импульсов сухого трения в узлах машин;
- Entropy – вибрационно-энтропийная оценка состояния узлов машин.

Наибольшее развитие метод получил при диагностировании подшипников качения. Также вибрационный метод успешно применяется при диагностике редукторных блоков. Интенсивное развитие метода в последние годы связано с удешевлением электронных вычислительных средств и упрощением анализа вибрационных сигналов.

К достоинствам данного метода можно отнести:

- метод позволяет находить скрытые дефекты;
- метод не требует сборки-разборки оборудования;
- малое время диагностирования;
- возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;
- минимизация расходов на обслуживание оборудования.

К недостаткам можно отнести:

- особые требования к способу крепления датчика вибрации;
- зависимость параметров вибрации от большого количества факторов и сложность выделения вибрационного сигнала, обусловленного наличием неисправности, что требует применения методов корреляционного и регрессионного анализа.

Тепловизионная диагностика. Из существующих методов технического диагностирования машин и механизмов тепловые методы занимают особое положение, так как до 95 % всех форм энергии, создаваемой и передаваемой машинами, превращается в тепловую энергию. Параметром теплового диагностирования является температура, отражающая протекание рабочего процесса и развитие целого ряда неисправностей.

Неконтролируемый перегрев весьма опасен для любого устройства и механизма. Неисправный контакт или несмазанная деталь сигнализируют едким запахом гари. После чего эти изделия нуждаются в основательном ре-

монте или замене. Обнаружить утечку тепла и предотвратить аварию, связанную с перегревом, можно на самых ранних этапах появления. Для этого необходимо выполнить термографирование объекта потенциальной опасности. Следует отметить, что не существует оценки степени неисправности дефектов на перегреваемых поверхностях оборудования. Перегревы могут быть вызваны скрытыми дефектами, тепловым излучением сторонних объектов [25]. Самым современным прибором для осуществления тепловизионного контроля является тепловизор.

Тепловизоры применяют во всех отраслях промышленности, где необходимо обеспечить качественный контроль за технологическими процессами производства. Они позволяют оперативно и своевременно отслеживать тепловые изменения, происходящие в отдельно взятых частях машин или механизме в целом. При этом повышение температуры может быть расценено как знак к возрастанию нагрузки, после чего может быть принято решение об остановке эксплуатации устройства. Тепловизор должен входить в стандартный набор инструментов технических инженеров, осуществляющих тепловой контроль на предприятиях. Специально для этих целей были разработаны портативные высокопроизводительные тепловизоры, которые позволяют с высокой степенью точности оценивать изменения температуры объекта в режиме реального времени. Небольшие размеры и вес подобных устройств позволяют применять их на выездных мероприятиях, когда доступ к стационарному оборудованию затруднен.

Несмотря на широкий спектр применения, этот вид диагностики не подходит для использования в шахтах, опасных по газу и пыли, т.к. портативные тепловизоры для данных условий не выпускаются, а профессиональные тепловизоры имеют высокую стоимость.

Анализ смазки. Для уменьшения потерь мощности на трение и снижения интенсивности изнашивания трущихся поверхностей, для предохранения от заедания, задиров, коррозии и для лучшего отвода тепла трущиеся поверхности деталей должны иметь надежное смазывание.

Статистические данные о безотказности механизмов предприятий свидетельствуют о том, что примерно в 40 случаях из 100 причиной отказа является недостаток смазочного материала либо его загрязнение. Задача анализа качества смазывания имеет три основных направления: контроль поступления, анализ продуктов изнашивания и контроль качества смазочного материала [26].

При работе механизма масло постепенно загрязняется продуктами износа трущихся деталей. С течением времени масло стареет, свойства его ухудшаются. Главная причина старения масла – окисление. Скорость окисления в большой степени зависит от температуры, с увеличением температуры на 10°C скорость окисления увеличивается вдвое, соответственно вдвое сокращается срок службы масла. Приблизительно можно считать, что срок службы минерального масла составляет 30 лет при 30°C , 15 лет при 40°C и так далее [27].

Включения в масле отражают характер и интенсивность износа элементов механизма, смазываемых маслом, и характеризуются числом, концентрацией частиц, химическим составом [28].

Контроль, качественный и количественный, продуктов износа и состояния смазочного материала позволяет установить источник поступления продуктов износа и продлить срок службы механизма благодаря своевременной замене отработанного масла.

Этот метод позволяет с высокой точностью определить, какие детали подвержены разрушающим нагрузкам. К недостаткам можно отнести: низкую оперативность и высокую стоимость оборудования.

По результатам анализа существующих методов функциональной диагностики механического оборудования можно прийти к выводу, что для наиболее полного описания фактического состояния горнопроходческого оборудования подойдут методы вибрационного контроля и анализа масла. Потому что вибродиагностический метод имеет обширную приборную базу для применения на шахтах, опасных по газу и пыли, а отбор проб масел ис-

ключает применение оборудования, представляющего опасность для условий шахты.

2.2. Анализ методов вибродиагностики применительно к электро-механическим приводам проходческих комбайнов

Вибрация механизма возникает вследствие воздействия каких-либо сил. Эти силы возникают внутри механизма или могут быть приложены извне. Вибрация исследуемого механизма описывается силой возбуждения (частота вращения ротора электродвигателя) и направлением. Знание законов изменения вибрации позволяет выявлять зарождающиеся дефекты, определять темпы развития повреждения и не допустить аварийной остановки оборудования, тем самым повысив надежность эксплуатации оборудования и безопасность труда.

Диагностирование состояния проходческих комбайнов и оценка степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации – один из наиболее эффективных методов повышения надежности эксплуатации оборудования.

Вибрационное диагностирование объектов проводится в три этапа: первичное описание вибрационного состояния объекта, выделение признаков дефектов и принятие решения.

Для принятия решения о состоянии оборудования необходимо обработать полученный вибрационный сигнал и извлечь из него необходимую полезную информацию. Для получения этой информации используются современные математические методы.

Временной сигнал. Все типы замеров вибрации являются различными преобразованиями именно временного сигнала.

На рис. 2.1 приведены временные развертки сигналов простейших гармонических колебаний с частотой f_1 и f_2 и их амплитудные спектры, представляющие сумму этих простейших колебаний [29]. Случайный вибрацион-

ный сигнал может принимать любое значение в определенном диапазоне. Реальный вибрационный сигнал горнопроходческой машины, как правило, представляет собой совокупность гармонических и случайных составляющих, что осложняет его обработку и анализ.

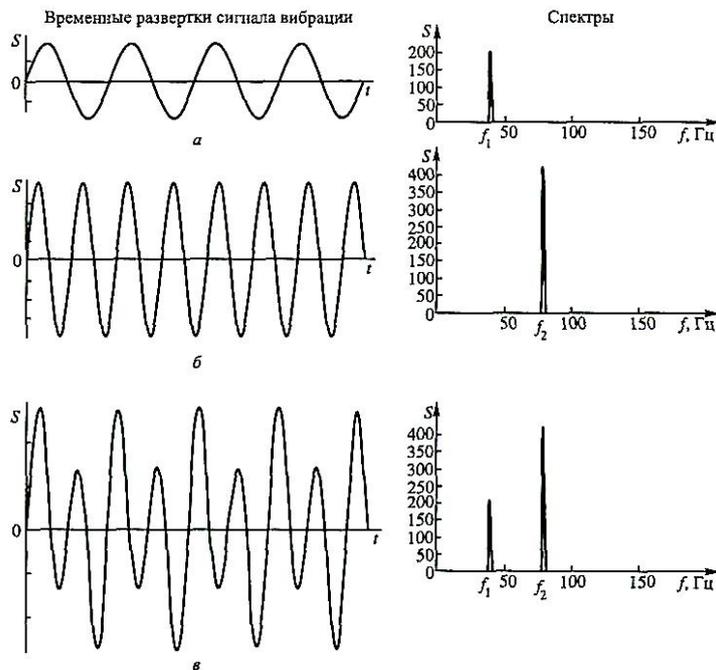


Рис. 2.1. Примеры простейших вибрационных сигналов и их спектров

В общем случае спектральное представление сложных полигармонических колебаний получают, используя разложение вибрационного сигнала в ряд Фурье. Сигнал при этом представляется в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте ω , т. е.

$$S(t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_{a1} \cos(i\omega t + \varphi_1), \quad (2.1)$$

где S_{a1} – амплитуда и начальная фаза i -й гармонической составляющей виброперемещений; A_i , B_i – коэффициенты ряда Фурье, определенные по следующим выражениям:

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(i\omega t) dt; \quad (2.2)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(i\omega t) dt. \quad (2.3)$$

Спектр (лат. Spectrum – видимое, от лат. specter – видение) – множество значений физической величины, или распределение их, согласно определенному параметру (например, частоте).

При описании колебательного процесса важное значение имеет скорость изменения этого процесса во времени, иными словами частота процесса. Преобразование исходных данных колебательного процесса из временной в частотную форму осуществляется при помощи перегруппировки данных, которая осуществляется при помощи разложения исходного колебательного процесса по различным ортогональным системам функции или его интегральное преобразование. Получение и изучение индивидуальных частотных компонент называется спектральным анализом (Фурье анализ) [30].

Результирующий спектр – соответствующий членам разложения в ряд Фурье с частотами, определенными через выбранную длительность основного периода, в котором каждая линия соответствует гармонической компоненте исследуемо колебательного процесса. Совокупность частот гармонических составляющих называется частотным спектром колебательного процесса [31]. На рис. 2.2 изображен вибрационный сигнал и его частотный спектр.

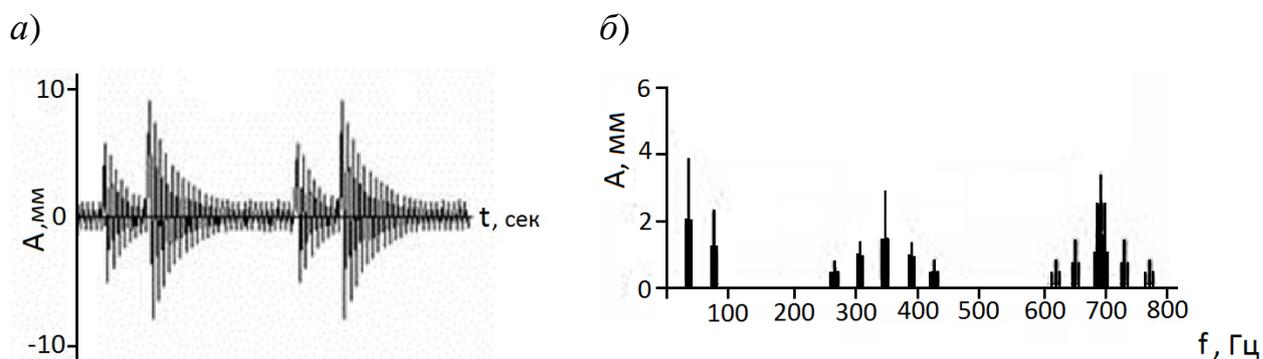


Рис. 2.2 а) вибрационный сигнал, б) спектр вибрационного сигнала

При определении фактического технического состояния горнопроходческого оборудования частотный анализ позволяет определить источники и причины возникновения колебаний, которые не соответствуют работоспособному состоянию оборудования. Помимо этого, на основе спектрального анализа строятся зависимости изменения технического состояния горнопроходческой техники, и дается оценка работы оборудования на переходных режимах (пуск, остановка) [32].

Кепстр. Понятие «кепстр» определяется выражением (2.4) [33]:

$$C_3(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln[S(\omega)]^2 e^{i\omega q} d\omega, \quad (2.4)$$

где $S(\omega)$ – амплитудный спектр исследуемого сигнала.

Поскольку $S(\omega)^2$ имеет смысл спектральной плотности сигнала, то $C_3(q)$ – представляет собой энергетический спектр функции $\ln[S(\omega)]^2$, откуда видно, что аргумент q имеет размерность времени, а не частоты. Определяемый таким образом кепстр принято называть кепстром мощности [34]. На рис 2.3 приведены спектр и кепстр вибрационного сигнала.

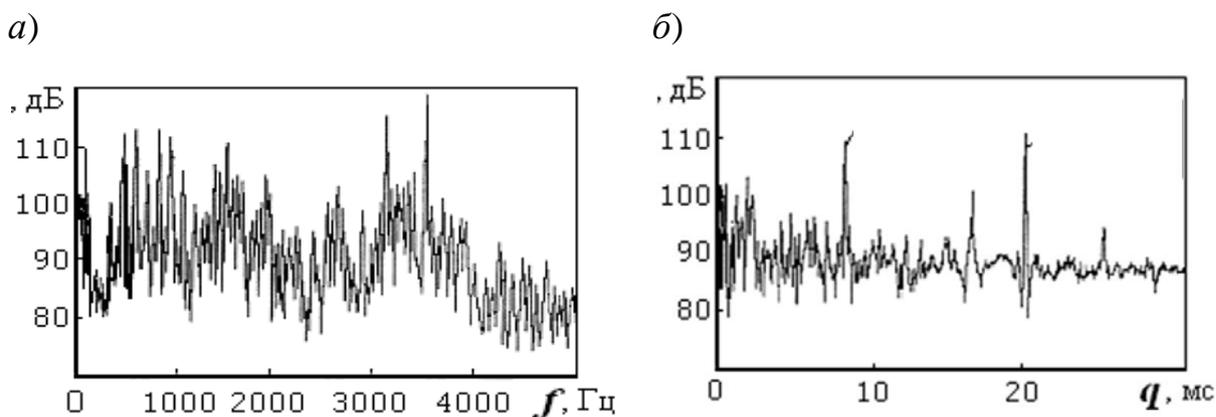


Рис. 2.3. Спектр вибрационного сигнала (а) и его кепстр (б)

Кепстральный анализ связан с гомоморфной обработкой сигналов. Такая обработка подчиняется обобщенному принципу суперпозиции: если входной сигнал системы представляет собой комбинацию из нескольких сигналов, то на выходе результаты обработки отдельных сигналов комбинируются.

Кепстральный анализ используется для идентификации серий гармоник и (или) боковых частот спектров для оценки их относительной мощности. Не вдаваясь в подробности математического преобразования, можно сказать, что кепстр мощности является как бы результатом частотного анализа результатов частотного анализа. Кепстральный анализ в значительной степени нечувствителен к изменениям фазы исследуемых сигналов и к особенностям путей распространения механических колебаний [32].

Выделение огибающей. Огибающая вибросигнала предоставляет подробную информацию о техническом состоянии критического горнопроход-

ческого оборудования на предприятии. Метод диагностики состояния оборудования, с помощью спектра огибающей вибросигнала используется, главным образом, для ранней диагностики подшипников качения и редукторов. Спектр огибающей является важным инструментом, используемым для оценки состояния горнопроходческой машины. Имея точные данные о вибросостоянии оборудования, инженерно-технический персонал предприятия может быть уверенным в том, что критическое оборудование эксплуатируется и обслуживается ими правильно. Огибающая вибросигнала помогает выявлять дефекты оборудования на самых ранних стадиях их развития до того момента, когда они будут выявлены другими методами диагностики. Без ранней диагностики дефектов обслуживающий персонал может обнаружить увеличение общего уровня вибрации, загрязнение масла и, как следствие, рост температуры подшипника, а анализ прямого спектра позволяет обнаружить присутствие дефекта, когда он уже будет сильно развит. Поэтому применение огибающей вибросигнала позволяет существенно увеличить «жизненный цикл» неисправных элементов машины и сократить степень повреждения оборудования [35].

Метод диагностики при помощи спектров огибающей вибросигнала состоит из нескольких этапов; он предполагает выделение ударных импульсов из общего уровня вибрации (рис. 2.4). Взаимодействие элементов подшипника качения друг с другом и с дефектами приводит к возникновению резонанса его элементов. Акселерометр (вибродатчик) измеряет вибрацию, далее этот сигнал отфильтровывается полосовым фильтром, и в результате в вибросигнале остаются только составляющие вибросигнала в диапазоне частот резонанса элементов подшипника. Отфильтрованный сигнал выпрямляется, и в результате мы получаем огибающую формы вибросигнала, при этом удаляются частоты резонанса элементов подшипника и остаются только частоты дефектов элементов подшипника. Затем фильтр высоких частот удаляет из сигнала высокочастотные составляющие вибросигнала, в результате мы получаем спектр огибающей. Частотные составляющие вибросигнала зависят

от геометрических размеров подшипника, а спектр вибрации показывает степень развития дефектов в его элементах [36].

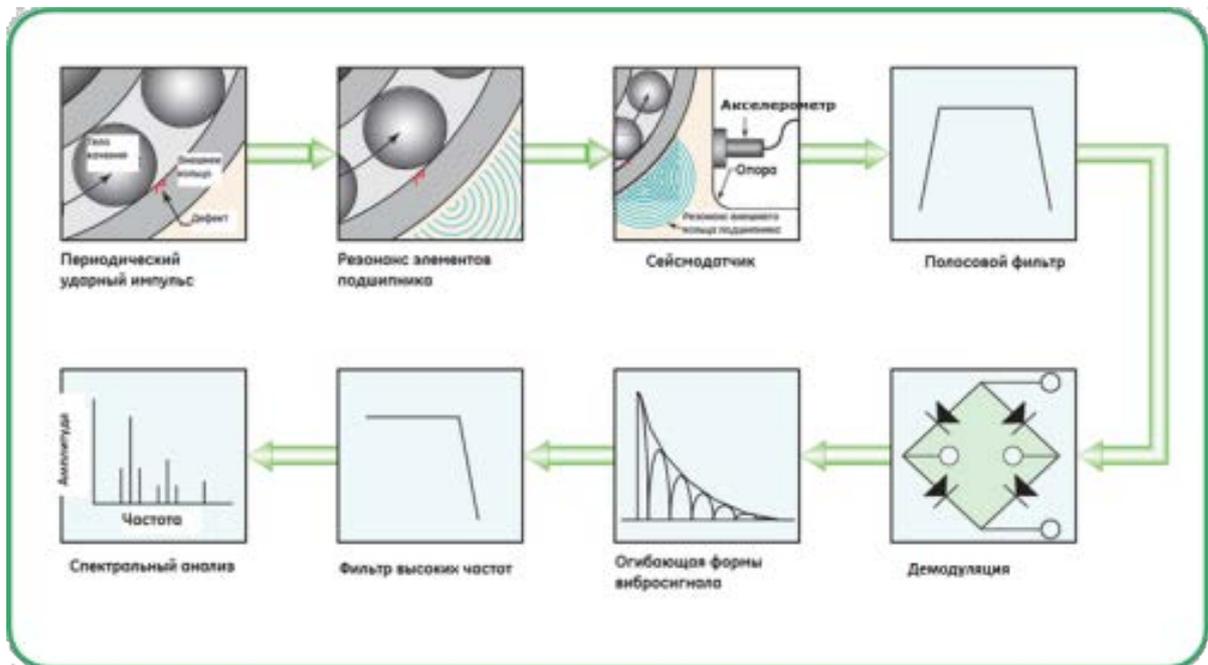


Рис.2.4. Этапы преобразования вибросигнала в спектр огибающей

Огибающая вибросигнала – очень ценный инструмент, если он используется при периодическом мониторинге. Она может предоставить специалисту по виброанализу информацию о состоянии оборудования и указать на зарождающиеся и развивающиеся на начальном этапе дефекты.

В ряде литературных источников указаны его достоинства. К ним относятся:

- возможность локализовать дефект;
- высокая чувствительность, высокая достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.

Основной недостаток – высокая стоимость аппаратуры и сложность реализации. Как правило, алгоритм обработки и анализа реализуется с использованием компьютерной техники.

Эксцесс. Эксцесс – мера отношения ударных, аperiodических, составляющих в вибросигнале к стационарным, периодическим, составляющим. Упрощенно, это отношение ударов от дефектов подшипника к среднему уровню вибрации. Этот параметр характеризует развивающиеся дефекты.

Чем больше величина эксцесса, тем сильнее в подшипнике удары, сопровождающие обкатывание телами качения подшипника локальных дефектов, трещин, сколов. Величина эксцесса возрастает при наличии значительных дефектов подшипника и отсутствии смазки.

Отношение момента четвертого порядка к квадрату момента второго порядка определяет отклонение параметров от нормального распределения [28]:

$$b = \frac{m_4}{m_2^2}, \quad (2.5)$$

где $m_2 = \frac{1}{n} (y_2 - \frac{1}{n} y_1^2)$ – момент второго порядка;

$m_4 = \frac{1}{n} y_4 - \frac{4}{n^2} y_1^2 y_3 + \frac{6}{n^3} y_1^2 y_2 - \frac{3}{n^4} y_1^4$ – момент четвертого порядка;

$y_1 = \sum x_i$ – среднеарифметическое;

$y_2 = \sum x_i^2$ – дисперсия;

$y_3 = \sum x_i^3$ – асимметрия;

$y_4 = \sum x_i^4$ – островершинность;

x_i – относительное отклонение параметра от исходного, %;

n – число параметров системы.

Применяется для установления развития различных неисправностей. Особенно эффективно для анализа подшипников скольжения.

Метод диагностики по эксцессу обладает рядом преимуществ: он не чувствителен к изменениям скорости вращения вала и нагрузки, не требует знаний геометрии подшипника.

К недостаткам метода можно отнести невозможность определения типа дефекта и длительность получения измерительной информации, поскольку достоверность получаемого результата пропорциональна $N^{0.25}$. Кроме того, диагностика по эксцессу малоприменима на тихоходных агрегатах (частота вращения менее 300 об/мин), а также в редукторах, мультипликаторах и механизмах с ударными воздействиями [32].

Пик-фактор. Это отношение пикового значения вибрации к среднеквадратическому значению.

Основные характеристики колебательных процессов показаны на рис. 2.5 [37].

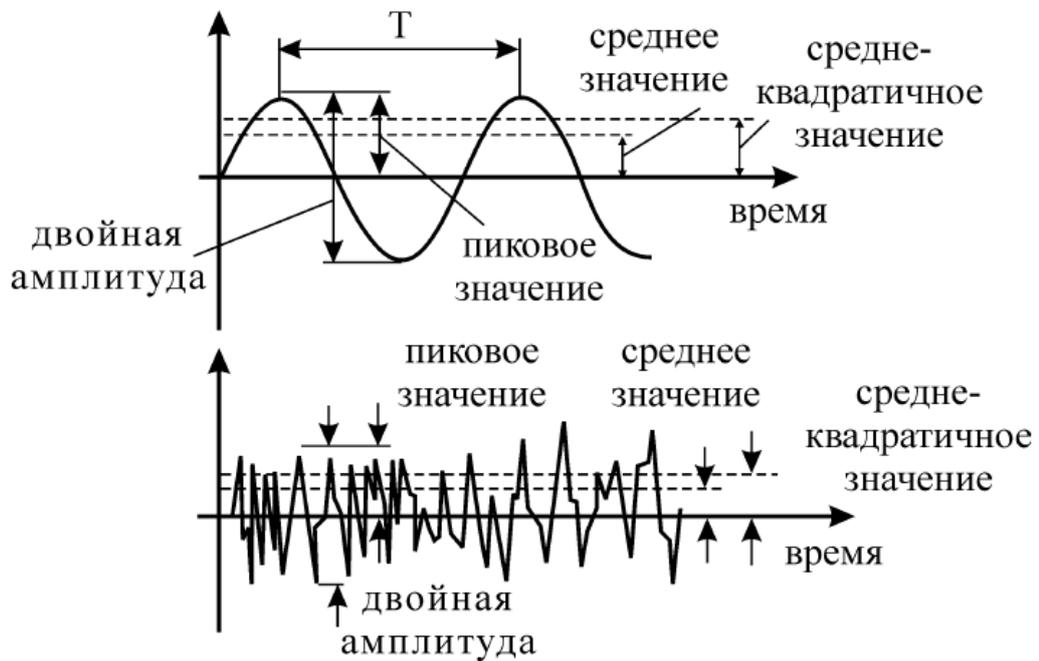


Рис.2.5. Характеристика колебательного процесса

Сами по себе функции ПИК и СКЗ малоинформативны для диагностики, вследствие своей монотонности. Но отношение ПИК/СКЗ уже представляет значительный интерес, поскольку эта функция из-за временного сдвига между ПИК и СКЗ, имеет явно выраженный максимум на временной оси (рис 2.6.) [38]. На этом и основывается метод ПИК-Фактора. Экспериментально было установлено, что момент прохода функции ПИК-Фактор через максимум соответствует остаточному ресурсу подшипника порядка 2-3 недели [39].

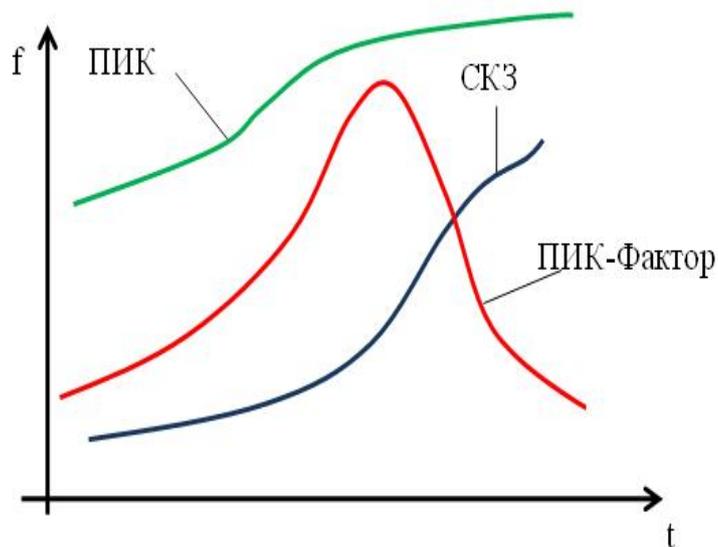


Рис.2.6. Метод ПИК-Фактора

Достоинства – простота.

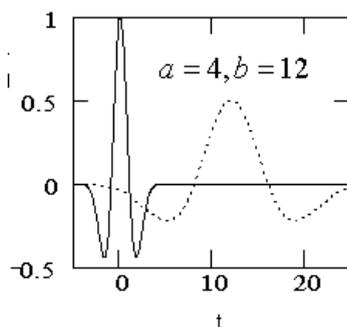
Недостатки – необходимость многократного проведения измерений и неэффективность для механических систем со сложной кинематикой.

Вейвлет-анализ. В переводе с английского слово wavelet дословно переводится как «короткая волна». Вейвлет-преобразование – это представление сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из исходного вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a) [40].

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.6)$$

На рис. 2.7 в качестве примера приведены вейвлет «мексиканская шляпа» (а) и модуль его спектральной плотности (б).

а)



б)

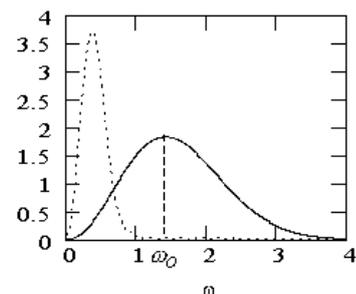


Рис. 2.7. Вейвлет «мексиканская шляпа» (а) и его спектральная плотность (б)

Как отдельный метод обработки вибрационных сигналов выделяют вейвлет-преобразование. Различают дискретный и непрерывный вейвлет-анализ, аппарат которых можно применять как для непрерывных, так и для дискретных сигналов. Сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция-прототип называется анализирующим (материнским) вейвлетом. Теория вейвлетов дает удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. В отличие от преобразований Фурье, вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерное развертывание, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализировать сигнал сразу в двух пространствах [40, 41].

Метод открывает новые возможности акустической диагностики машин и конструкций, базирующиеся на его основных достоинствах, к которым относится высокая информативность метода.

Основными недостатками вейвлет-анализа являются трудоемкость и сложность в интерпретации результатов.

2.3. Методы спектрального анализа смазочных материалов, используемых в узлах и агрегатах проходческих комбайнах

При эксплуатации проходческого оборудования на него действуют различные нагрузки, которые разделяются на рабочие и постоянно действующие. Результатом воздействия этих нагрузок могут быть отказы, приводящие к аварийным остановкам проходческого оборудования. Большую часть отказов возникающих по причине трения и износа невозможно избежать, можно лишь отсрочить момент их проявления [42]. Поэтому контроль над состоянием смазывающей жидкости (масла) в узлах и агрегатах горнопроходческого оборудования является важным этапом для повышения его эксплуатационной надежности.

Изнашивание деталей в узлах и агрегатах проходческого комбайна – это сложный процесс, который связан не только с разрушением поверхностных слоев контактирующих деталей, но и с разрушающими процессами механического и физико-химического характера. При этом продукты разрушения попадают в смазывающую жидкость и изменяют ее свойства и состав.

Изучение состава примесей в масле дает возможность судить о месте и степени повреждения узла проходческого комбайна и создать научные основы для эффективного управления работоспособностью горнопроходческого оборудования.

Для контроля состояния масла, используемого для смазки узлов горнопроходческого оборудования, широко применяются методы спектрального анализа. Классификация методов приведена на рис. 2.8. Спектральные методы анализа основаны на способностях атомов и молекул поглощать или испускать электромагнитное излучение при изменении внутренней энергии вещества. Характер этого излучения и определяет методы спектрального анализа [45].

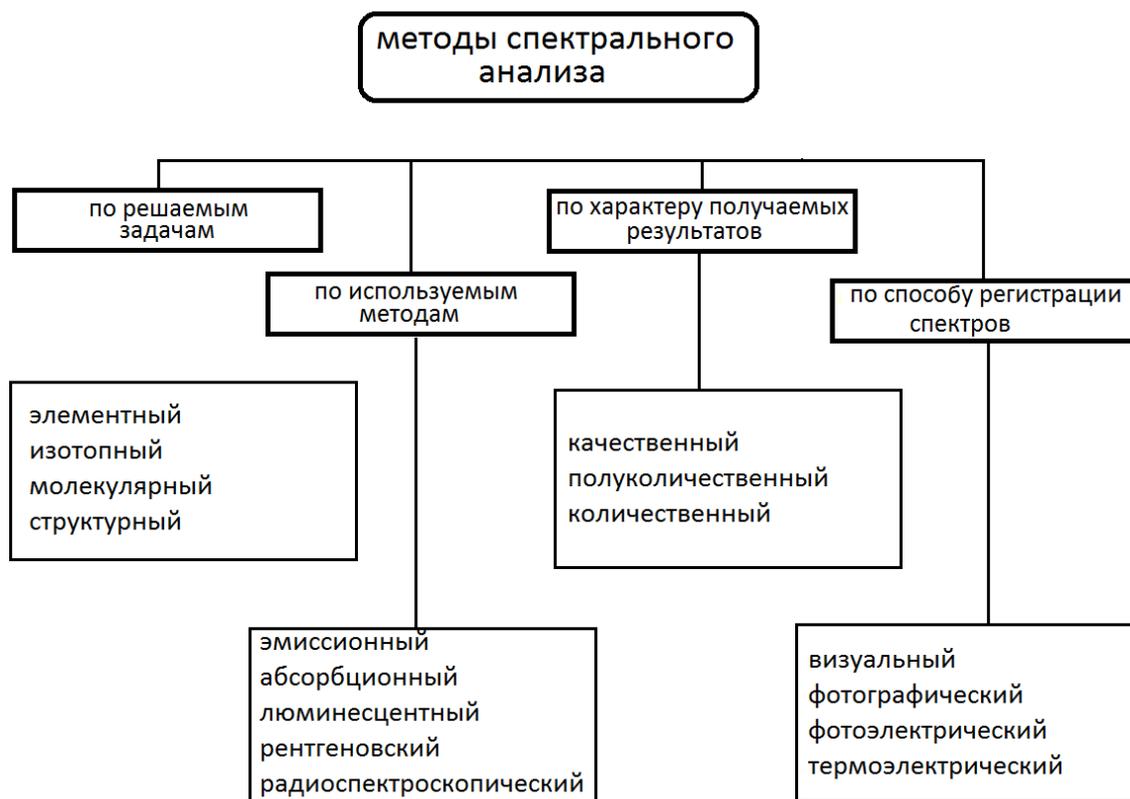


Рис.2.8. Методы спектрального анализа масла

По решаемым задачам методы спектрального анализа разделяются на четыре группы:

1. **Элементный анализ** – определение содержания элементов и элементного состава смазывающего материала. Позволяет определить, из каких элементов состоит исследуемая проба, что является одной из важнейших задач при анализе повреждений по составу примесей в смазывающей жидкости.

2. **Изотопный анализ** проводят по электронно-колебательным спектрам молекул, измеряя изотопные сдвиги полос. Этот метод разработан для определения таких элементов, как *H* (водород), *Li* (литий), *Sr* (стронций), *Pb* (свинец) и др. Обладает высокой производительностью и простотой проведения анализа. Изотопный спектральный анализ большинства элементов предполагает применение приборов высокой разрешающей способности.

3. **Молекулярный спектральный анализ** позволяет определить молекулярный состав пробы смазывающего материала по молекулярным спектрам поглощения и испускания. Такой метод целесообразно применять для промышленного контроля молекулярного состава проб.

4. **Структурный метод** позволяет определить структурный тип вещества по присутствию характерных полос в колебательных спектрах излучения и поглощения. Этот метод дает предварительное представление о составе исследуемой пробы смазочного материала.

По применяемым методам различают следующие виды **спектрального анализа**:

Эмиссионный спектральный анализ – это метод анализа вещества, основанный на регистрации атомных эмиссионных спектров под влиянием источника возбуждения (дуга, искра, пламя, плазма) с помощью спектрографа [43]. Спектр, регистрируемый спектрографом, состоит из набора очень узких линий, который определяется электронной структурой атомов и является характеристичным для каждого элемента. Интенсивность линий в спектре зависит от содержания атомов данного элемента в пробе.

Возбуждение атомов происходит при переходе одного или нескольких электронов на более отдалённый энергетический уровень. В невозбуждённом состоянии атом имеет наименьшую энергию E_0 . В неустойчивом состоянии атом может находиться очень короткое время ($\approx 10^{-7} - 10^{-8}$ сек) и всегда стремится занять нормальное невозбуждённое состояние. При этом атом отдаёт избыточную энергию в виде излучения фотона [46].

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \quad (2.7)$$

где E_1, E_2 – энергия верхнего и нижнего уровня; ν – частота; c – скорость света; λ – длина волны излучения; h – постоянная Планка.

Так как возбуждение атомов имеет термическую природу, интенсивность спектральной линии (I) прямо пропорциональна числу возбуждённых частиц (N^*). Термодинамическое равновесие, в котором находятся возбужденные и невозбужденные атомы, описывается уравнением Больцмана:

$$\frac{N^*}{N^0} = \frac{g^*}{g^0} \times e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (2.8)$$

где N^0 – число невозбуждённых атомов; g^*, g^0 – статические веса возбуждённых и невозбужденных состояний атомов; E – энергия возбуждения; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Таким образом, при постоянной температуре N^* прямо пропорционально N^0 , т.е. фактически общему числу данных атомов в пробе. Общее число атомов прямо пропорционально концентрации (c) элемента в пробе. Интенсивность эмиссионной спектральной линии может быть использовано в качестве аналитического сигнала для определения концентрации элемента, которая определяется по формуле Ломакина-Шайбе [47]:

$$I = a \times c^b, \quad (2.9)$$

где a – коэффициент, зависящий от условий процесса,

b – постоянный коэффициент, зависящий от энергетических переходов, обусловленной излучением данной спектральной линии.

Атомно-эмиссионный спектральный анализ – практически самый распространённый экспрессный высокочувствительный метод идентификации и

количественного определения малых содержаний элементов. Важным достоинством метода по сравнению с другими оптическими спектральными, а также многими химическими и физико-химическими методами анализа является возможность одновременного количественного определения большого числа элементов в широком интервале концентраций с приемлемой точностью при использовании малой массы пробы [46].

Абсорбционный спектральный анализ. Метод основан на поглощении ультрафиолетового или видимого излучения атомных газов. Чтобы провести пробу в газообразное атомное состояние, ее впрыскивают в пламя. Источником излучения является лампа с полым катодом, испускающая свет, имеющий очень узкий интервал длин волн (0,001 нм), что обеспечивает этому методу высокую чувствительность при определении элементов, имеющих высокую энергию возбуждения [48].

Переход в атомное состояние происходит при распылении раствора пробы смазывающего материала в высокотемпературное пламя, которое получается при горении ацетилен в воздухе (1900°C) или кислороде (3100°C). Через пламя пропускают излучение определенной для каждого элемента длины волны. Часть излучения поглощается химическим элементом, находящимся в пламени. Интенсивность прошедшего света измеряется с помощью фотоэлементов. Интенсивность поглощенного света пропорциональна концентрации химического элемента, согласно закону Ламберта-Бера [49]:

$$D = \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) = \varepsilon \times C \times d, \quad (2.10)$$

где D – оптическая плотность (замеряемый сигнал);

ε – коэффициент пропорциональности, зависящий от природы вещества;

d – толщина поглощающего слоя;

C – концентрация вводимого в пламя раствора анализируемого вещества.

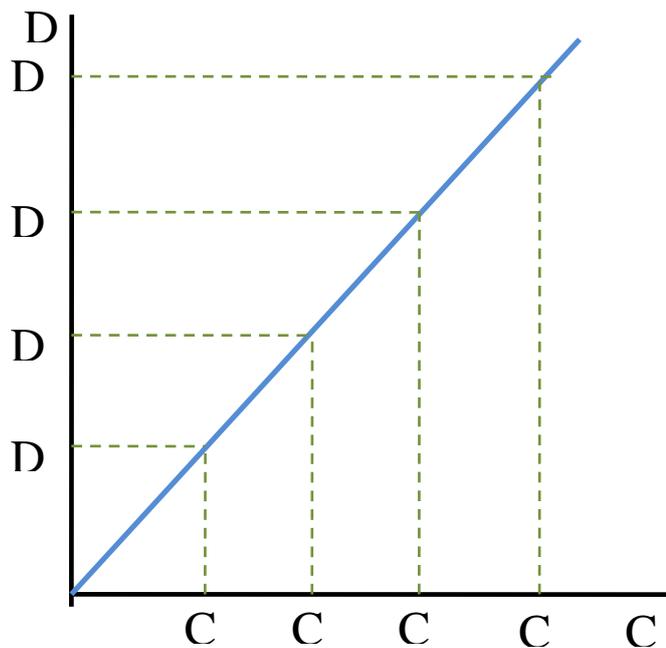


Рис.2.9. Калибровочный график для определения концентрации элемента

При каждом замере строят калибровочный график (рис. 2.9) – зависимость оптической плотности от концентрации, используя набор стандартных растворов.

Абсорбционный спектральный анализ особенно эффективен для определения малых концентраций. Данный метод легко автоматизируется и применяется для поточного анализа в промышленных лабораториях. Этот метод отличается высокой чувствительностью и селективностью. При помощи него можно определять до 70 различных элементов (в зависимости от наличия источников излучения).

Недостатком абсорбционного спектрального анализа является опасность при работе с горящим ацетиленом.

Люминесцентный спектральный анализ относится к числу наиболее чувствительных и универсальных методов, позволяющих исследовать объекты как органической, так и неорганической природы [50]. Спектры люминесценции возбуждаются облучением вещества ультрафиолетовым светом (ртутно-кварцевая лампа). Использование газового лазера на азоте еще более расширяет возможности использования данного метода при исследовании микроколичеств слабо люминесцирующих объектов. Спектры люминесцен-

ции содержат информацию не только о составе, но и о структурных изменениях, происходящих в объекте.

Наиболее важной задачей люминесцентного анализа является определение химического состава исследуемых веществ и установление процентного содержания в них отдельных компонентов. Анализ такого вида носит соответственно название качественного и количественного химического люминесцентного анализа.

Люминесцентный анализ обладает рядом особенностей, которые отличают его от всех других видов анализа. Люминесцентный анализ необычайно чувствителен. С его помощью можно обнаружить в пробе присутствие вещества с концентрацией $10^{-10} - 10^{-11}$ г/г. Это более чем на три порядка превосходит чувствительность эмиссионного спектрального анализа, что позволяет работать с малыми количествами исследуемого вещества $10^{-12} - 10^{-15}$ г [51].

К достоинствам люминесцентного анализа являются его простота и скорость, во много раз превосходящие скорость химического анализа. При люминесцентном анализе исследуемые вещества не подвергаются структурным изменениям, что дает возможность их дальнейшего использования. Это преимущество существенно при исследовании уникальных веществ.

Несмотря на все преимущества, следует отметить, что необычайно высокая чувствительность люминесцентного анализа создает и серьезные трудности его проведения. Присутствие в образце малых количеств люминесцирующих примесей обуславливает появление нового свечения, которое накладывается на люминесценцию основного вещества, искажая как спектральный состав, так и интенсивность его излучения.

Рентгеновский спектральный анализ – элементный анализ вещества по их рентгеновским спектрам. При помощи рентгеновского спектрального анализа могут быть определены все химические элементы с атомным номером $Z \geq 12$, а в некоторых случаях и более легкие [53].

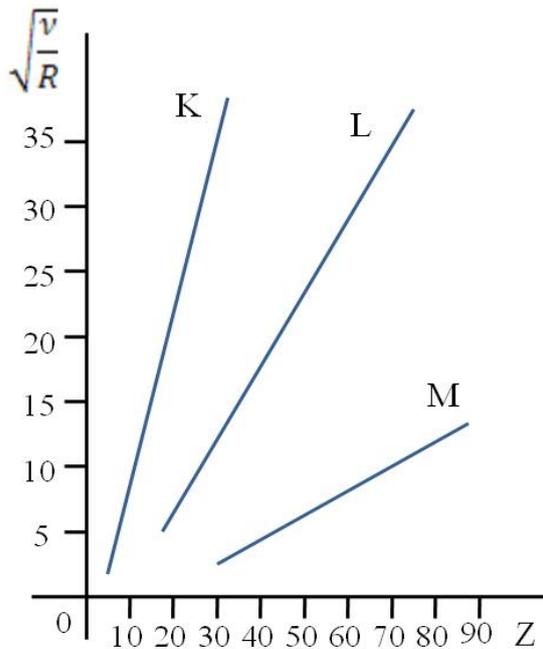


Рис. 2.10. Диаграмма Мозли для K-, L- и M-серий характеристического рентгеновского излучения (K-, L-, M- и т. д. серии, соответствующие значениям $n = 1, 2, 3, \dots$)

Основой рентгеновского спектрального анализа является закон Мозли, который связывает частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения химического элемента с его порядковым номером и утверждает, что корень квадратный из частоты ν спектральной линии характеристического излучения элемента есть линейная функция его порядкового номера Z (рис.2.10) [54]:

$$\sqrt{\frac{\nu}{R}} = \frac{Z - S_n}{n}, \quad (2.11)$$

где R – постоянная Ридберга;

S_n – постоянная экранирования;

n – главное квантовое число.

Относительная точность рентгеновского спектрального анализа колеблется от 0,3 до 10% в зависимости от состава пробы. Поэтому одной и той же измеренной интенсивности I_1 аналитической линии i могут соответствовать различные концентрации C_1, C_2, C_3, \dots определяемого элемента (рис.2.11) в зависимости от наполнителя состава пробы за исключением определяемого элемента. Вследствие этого определение интенсивности по концентрации возможно лишь на основе зависимости I_i от концентраций всех n компонентов пробы.

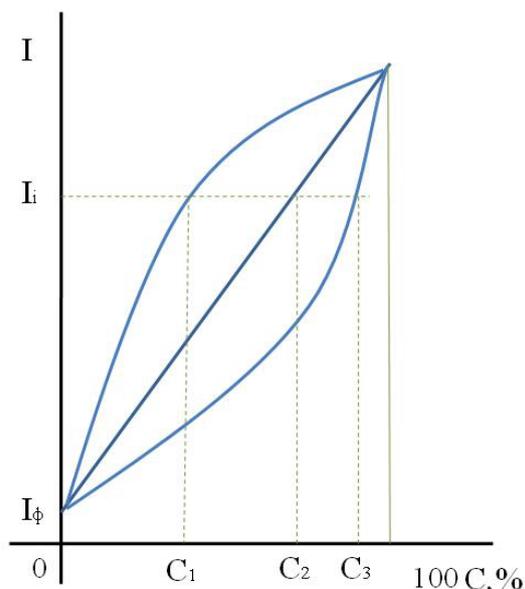


Рис.2.11. Графики зависимости интенсивности аналитической линии от концентрации определяемого элемента для случаев, когда поглощение наполнителя 1 – меньше, 2 – равно, 3 – больше поглощения определяемого элемента, I_{ϕ} – интенсивность фона

Пучок рентгеновского излучения, проходя через химическое соединение, вызывает характерное вторичное излучение, спектроскопический анализ которого позволяет установить состав соединения [55].

Позволяя объективно определить структуру молекул и общий характер взаимодействия молекул в кристалле, исследование методом рентгеноструктурного анализа не всегда даёт возможность с нужной степенью достоверности судить о различиях в характере химических связей внутри молекулы, так как точность определения длин связей и валентных углов часто оказывается недостаточной для этой цели.

Радиоспектроскопический анализ – это метод анализа состава вещества основанный на спектроскопии в электромагнитных лучах. Радиоспектроскопический метод применяют в технике для получения детальной информации о качественном и количественном составе примесей в рабочих жидкостях и для неразрушающего контроля материалов и изделий.

С помощью радиоспектроскопии изучаются спектры поглощения веществ в диапазоне радиоволн на частотах электромагнитного поля от 10^3 до 6×10^{11} Гц [56]. Резонансное поглощение в диапазоне радиоволн обусловлено индуцированными переходами между уровнями энергии атомов, молекул, удовлетворяющими условию:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j = h\nu, \quad (2.12)$$

где ν – частота радиоволны.

Такие интервалы энергии возникают при взаимодействии магнитных моментов электронов и ядер с внешним магнитным полем – эффект Зеемана.

Среди радиоспектроскопических методов большое значение имеют методы магнитной радиоспектроскопии – ядерный магнитный резонанс и электронный парамагнитный резонанс [56].

Интервалы между уровнями энергии, изучаемые в радиоспектроскопии, обычно соответствуют диапазону $10^9 - 3 \times 10^{11}$ Гц. Столь малые интервалы, как правило, не удаётся разрешить в оптических и ИК-спектрах, их можно зарегистрировать только методами радиоспектроскопии при помощи приборов, которые называются радиоспектроскопы или радиоспектрометры [57].

По сравнению с оптическими методами спектроскопии и инфракрасной спектроскопией в радиоспектроскопии практически отсутствует аппаратурное уширение спектральных линий, поскольку в качестве источника радиоволн используют когерентные генераторы, а частоту ν можно измерить с высокой точностью.

По характеру получаемых результатов в зависимости от глубины и точности проводимого анализа пробы смазывающей жидкости методы спектрального анализа разделяются на три группы [58]:

- качественный анализ, когда в результате анализа пробы смазывающей жидкости определяется состав примесей без указания количественного соотношения элементов или дается качественная оценка содержания элементов в примеси (много, мало, очень мало, следы);
- полуколичественный анализ, или приближенный анализ. При этом методе оценка содержания компонентов в пробе смазывающей жидкости дается в виде интервала концентраций элементов в узких границах в зависимости от применяемого метода приближенной количественной оценки. Этот метод благодаря его быстрой нашел широкое применение при решении задач, не требующих точного количественного определения;

- количественный метод, при котором выдается точное количественное содержание определяемых элементов или соединений в пробе смазывающего материала.

По способу регистрации спектров методы спектрального анализа бывают.

Визуальные методы разделяются на стилоскопические (визуальное сравнение интенсивности спектральных линий) и стилометрические (выравнивание интенсивности спектральных линий аналитической пары при помощи специальных устройств). Являются самыми простыми методами, которые основаны на визуальной регистрации интенсивности линий спектра. Качество такого вида исследований зависит от индивидуальных свойств глаза человека, который занимается анализом результатов.

Визуальные методы применяются для исследования спектров в видимой области, т.е. с длиной волн 400-700 нм [44]. Визуально можно с достаточной точностью установить равенство интенсивностей линий с ближайшими длинами волн или определить наиболее яркую линию в спектре.

К достоинствам визуальных методов можно отнести оперативность и малое время на выполнение анализа, к недостаткам – ограниченность применения по длине волны и зачастую отсутствие объективной информации.

Фотографические методы основаны на фотографической регистрации линий спектра. При фотографическом методе в качестве приемника излучения используют фотографическую пластинку. Изображение спектра, полученного на пластинке, позволяет произвести количественное определение концентрации пробы. Фотометрирование должно производиться с учетом фотографических свойств пластинки, поэтому необходимо знать основные свойства и характеристики фотоматериалов [45]. Количество освещения (экспозиция) определяется по выражению:

$$H = E \times t, \quad (2.13)$$

где E – освещенность фотослоя; t – время экспонирования.

Оптическая плотность почернения определяется по формуле

$$IS = \lg \frac{I_0}{I}, \quad (2.14)$$

где I_0 – интенсивность света, прошедшего при фотометрировании проявленной пластинки через непочерненное место; I – интенсивность света, прошедшего через почерненное место.

Зависимость плотности почернения от освещенности фотослоя называется характеристической кривой фотопластинки (рис. 2.12).

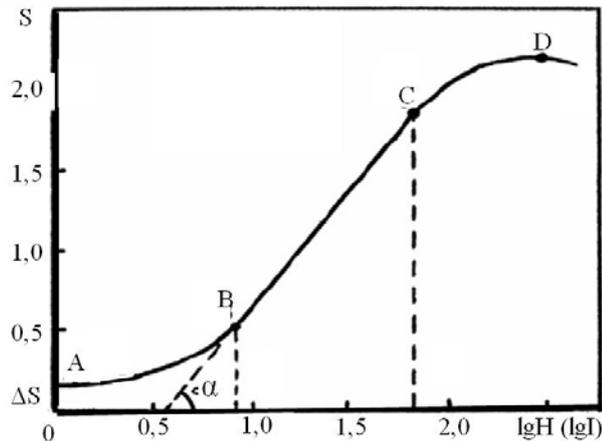


Рис.2.12. Характеристической кривой фотопластинки:

AB – область недодержек, BC – область нормальных почернений,

CD – область передержек и DE – область соляризации

Для спектрального анализа обычно используется прямолинейный участок – область нормальных почернений.

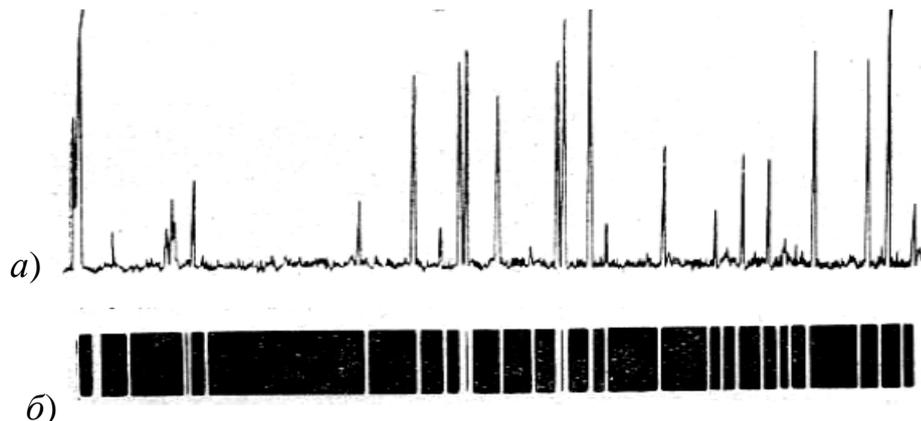


Рис. 2.13. Регистрация результатов фотометрирования:

а – микрофотограмма спектра; б – исходная спектрограмма

Преимуществом фотографического метода по сравнению с визуальным является объективность и документальность, а недостатками – трудоемкость, относительно невысокая точность (1-3% от определяемой концентрации) и небольшая скорость.

Фотоэлектронные методы – метод изучения электронного строения вещества, основанный на явлении фотоэффекта с использованием ультрафиолетового излучения [59]. При фотоэлектронных методах интенсивность линий спектров излучения или поглощения измеряется непосредственно с помощью фотоэлементов и фотоумножителей, минуя обязательную при спектрофотометрических методах анализа промежуточную ступень – получение фотоспектрограмм [60]. Для фотоэлектронных методов исследования используются аппараты-квантометры, а также более простые по устройству спектральные приборы – монохроматоры, спектрофотометры, снабженные фотоэлементами. Спектр высвечивания должен быть оптимально согласован со светочувствительностью используемого фотоприёмника, чтобы не терять лишний свет. Несогласованный с чувствительностью приёмника спектр высвечивания негативно сказывается на энергетическом разрешении.

Фотоэлектронные методы применяют для исследования ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областей спектра, используя фотоэлементы разных типов, такие как фотоумножители и фотосопротивления (инфракрасная область). Фотоэлектрические методы иногда называются методами прямого анализа, т. е. анализа без посредства фотографической пластинки [61].

Термоэлектрические методы спектрального анализа основаны на эффекте термоэлектронной эмиссии – испускании электронов нагретыми твердыми телами или жидкостями (эмиттерами) в вакуум или другие среды [62].

Главной характеристикой тел по отношению к термоэлектронной эмиссии является величина плотности термоэлектронного тока насыщения j_0 (рис. 2.14) при заданной температуре. Рис. 2.14 демонстрирует, что термоэлектронный ток может протекать и в отсутствии внешних ЭДС. Это указывает на возможность создания вакуумных термоэлектронных преобразователей тепловой энергии в электрическую [63]. При термоэлектронной эмиссии в

вакуум однородных эмиттеров в отсутствии внешних электрических полей величина j_0 определяется формулой Ричардсона – Дэшмана:

$$j_0 = AT^2(1 - \bar{r})\exp\left[\frac{-e\varphi}{kT}\right], \quad (2.15)$$

где A – постоянная эмиттера, T – температура эмиттера в К, \bar{r} – средний для термоэлектронов разных энергий коэффициент отражения от потенциального барьера на границе эмиттера; $e\varphi$ – работа выхода.

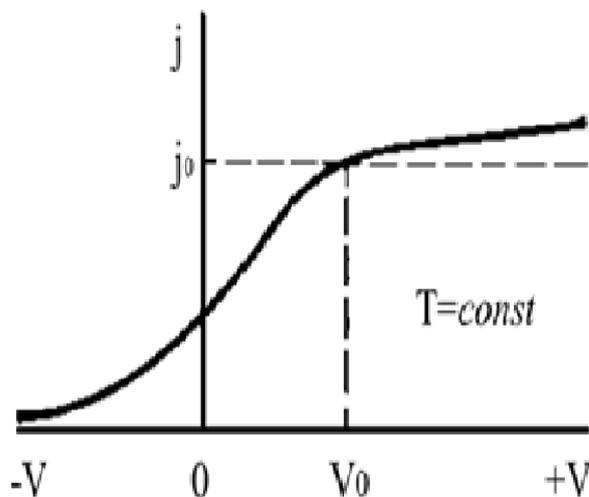


Рис. 2.14. Зависимость плотности тока от разности потенциалов, приложенной между эмиттером и коллектором электронов (вольт-амперная характеристика)

Термоэлектронная эмиссия лежит в основе действия многих электровакуумных и газоразрядных приборов и устройств.

2.4. Сравнительный анализ различных методов диагностики

Анализ основных методов функциональной диагностики, существующих ограничений по их применению, достоинств и недостатков показал, что на сегодняшний день не существует какого-то одного метода, который мог бы одинаково успешно использоваться в рамках экспресс-диагностики и при периодическом мониторинге независимо от вида оборудования и условий его эксплуатации.

Из всех рассмотренных методов диагностики наиболее приемлемыми являются методы вибродиагностики и анализа смазочных материалов узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия, поскольку аку-

стические методы диагностики неприемлемы из-за значительного шумового фона в проходческом забое, тепловые методы контроля отпадают из-за отсутствия аппаратуры для контроля тепловых полей в шахтных условиях, а визуальный контроль позволяет выявлять только развитые необратимые дефекты на последней стадии деградации оборудования.

Кроме того, многие методы имеют ограничения на область применения. Существенно затрудняют диагностику низкая частота вращения, ударные нагрузки, источники случайной высокочастотной вибрации. Таким образом, каждый из рассмотренных ранее методов имеет существенные ограничения и может быть использован лишь в небольшом количестве случаев (на определенной стадии развития дефекта или на конкретном оборудовании). Поэтому для эффективной оценки текущего состояния сложных механических систем необходимо использовать одновременно несколько различных методов, на основании которых впоследствии могут быть рассчитаны диагностические критерии.

Другая проблема, возникающая при диагностике – необходимость использования дополнительных априорных данных (частота вращения, конструктивные характеристики и т.д.). Если частота вращения может быть примерно определена, то, например, геометрические размеры подшипника, как правило, неизвестны. Поэтому при построении диагностических критериев использование априорной информации должно быть сведено к минимуму.

Любые параметры вибрации или типы замеров, полученные на работающем агрегате, содержат диагностическую информацию, характеризующую состояние одновременно нескольких узлов машины. Поэтому при решении задачи оценки состояния отдельных узлов по параметрам вибрации необходимо исключать из рассмотрения составляющие иной природы. На сегодняшний день алгоритмы подобной фильтрации отсутствуют, поэтому при анализе виброакустических сигналов необходимо оценивать возможное вли-

яние на характер и величину механических колебаний сил различной природы от различных источников (вала, рабочего колеса, муфты и т.д.) [64, 65].

Из многообразия методов спектрального анализа масла наиболее подходящим для использования в эксплуатационных условиях работы проходческих комбайнов является эмиссионно-спектральный метод, реализованный в многоканальном спектрометре МФС-7.

Подводя итоги, сформулируем основные требования к диагностике сложных систем.

Во-первых, необходимо получить универсальную оценку технического состояния на основании комплексного использования различных параметров и критериев. При этом количество априорных данных должно быть сведено к минимуму, а влияние различных факторов, искажающих диагностическую информацию – устранено.

Во-вторых, оценка состояния сложных систем одновременно по нескольким диагностическим критериям – достаточно трудоемкая задача. Гораздо проще и эффективнее применять математические модели диагностики в одномерном пространстве признаков [66-68]. Таким образом, при диагностике для исключения «человеческого фактора» целесообразно использовать единственный критерий, сформированный «наилучшим» образом из N -мерного, где N – количество используемых диагностических критериев, т.е. решать задачу скаляризации. При этом в рамках перехода к линеаризованной величине (единому диагностическому критерию) особенно важно оценить «разделяемость» первоначально используемых диагностических критериев. Более того, необходимо на основании полученных данных предложить адекватную модель, описывающую развитие дефекта, и математический аппарат, оценивающий с заданной точностью текущее состояние диагностируемого узла.

Кроме этого, с учетом требований современного производства для различных форм организации технического обслуживания и ремонта на предприятии в рамках создаваемой системы необходимо выполнять прогнозирование, оценивать остаточный ресурс и планировать оптимальным образом

ремонтные мероприятия [68, 69]. Для этого при диагностике должны быть решены задачи выделения тренда из зашумленных данных и построения различного рода прогнозов.

При системном использовании современных диагностических методов удается избежать серьезного повреждения машин и сократить эксплуатационные издержки на обслуживание электромеханического оборудования проходческих комбайнов избирательного действия вследствие того, что ремонт проводится только тогда, когда результаты измерений указывают на его необходимость.

2.5. Основные итоги и выводы

1. Из всех форм ТОиР, применяемых в ОАО «СУЭК-Кузбасс», наиболее приемлемой для проходческих комбайнов избирательного действия является обслуживание оборудования по фактическому техническому состоянию для обеспечения максимально возможного межремонтного периода эксплуатации за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов.

2. Для обслуживания проходческих комбайнов по фактическому состоянию необходимо использовать функциональные методы диагностики, из которых наиболее приемлемыми являются функциональные методы: вибродиагностика и анализ смазывающих веществ.

3. Наиболее информативным параметром, несущим максимальную информацию о состоянии узла работающей машины или агрегата, является вибрация, которая позволяет практически мгновенно отслеживать изменение состояния объекта диагностики. Именно эти особенности предопределили применение вибрационного метода диагностики и контроля технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия.

4. В качестве дополнительного метода функциональной диагностики, повышающего достоверность анализа и прогноза технического состояния про-

ходческого комбайна избирательного действия, следует использовать эмиссионно-спектральный метод, реализованный в многоканальном спектрометре МФС-7.

3. ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

3.1. Обзор и анализ методов прогнозирования технического состояния горнопроходческого оборудования

Одним из главных аспектов повышения эксплуатационной надежности горнопроходческого оборудования является прогнозирование его технического состояния. На этой информации базируется система обслуживания по фактическому техническому состоянию, которая позволяет минимизировать ремонтные работы и достичь увеличения межремонтного ресурса до 40% [69].

Процесс деградации параметров технического состояния горного оборудования носит случайный характер. Поэтому для достоверного прогноза его технического состояния необходимо применять методы, основанные на вероятностной оценке показателей, характеризующих его эксплуатационные свойства. Методы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса горнопроходческого оборудования делятся на четыре группы, рис 3.1 [70].



Рис. 3.1. Классификация методов прогнозирования остаточного ресурса оборудования

Детерминированные методы оценки используют аналитические зависимости, связывающие время работы до отказа с характеристиками нагрузок возникающих в процессе эксплуатации объекта и параметрами физико-химических процессов.

К недостаткам можно отнести то, что эти методы не учитывают случайного характера рабочих нагрузок и изменений в свойствах материалов.

Экспертные методы предполагают наличие квалифицированных специалистов разных профилей [69]. Сущность метода заключается в том, что эксперты (оценщики) изучают техническое состояние объекта, делают выводы и сравнивают это состояние с данными специальной оценочной шкалы, которая разрабатывается оценщиком самостоятельно с учетом практики его работы либо является нормативным документом оценочной организации [71].

Фактографический метод прогнозирования – это метод, базирующийся на фактографической информации, т.е. информации, содержащей фактические данные, необходимые для решения задачи прогноза ресурса исследуемого объекта (данные о времени отказов, изменение технических параметров и т.д.).

Для прогнозирования остаточного ресурса горнопроходческого оборудования наибольшее распространение получили две группы методов [69]: статистические и экстраполяционные.

Физико-статистические методы учитывают влияние внешних и внутренних факторов и эксплуатационных нагрузок, влияющих на развитие деградационных процессов, происходящих в узлах горнопроходческого оборудования. Достоверность контроля, характеризующая степень соответствия результатов прогноза фактическому техническому состоянию объекта, определяется двумя показателями: точностью и доверительной вероятностью.

Так как значение остаточного ресурса является случайным, то его величину можно определить вероятностными методами, развитыми в теории надежности машин и сложного оборудования. Такой подход позволит расширить возможности методов оценки и делает их наиболее соответствующими физическим процессам изнашивания. При этом можно понять и учесть тот факт, что фактический срок службы может существенно превышать нормативный, установленный в документации срок службы, в течение которого

изготовитель гарантирует нормальную работу с большой вероятностью [72]. Поэтому для определения фактического технического состояния горнопроходческого оборудования целесообразно применять статистические методы оценки.

3.2. Построение математической модели изменения технического состояния проходческого комбайна

В процессе эксплуатации горнопроходческого оборудования наблюдается разброс значений ресурсов однотипного оборудования даже в том случае, если оно эксплуатируется в похожих условиях. В связи с этим в инструкциях по эксплуатации, как правило, указан заниженный срок службы, после окончания которого объект обладает еще некоторым остаточным ресурсом. Определение его значения необходимо для дальнейшей эффективной и безопасной эксплуатации.

Необходимость определения фактического состояния горнопроходческого оборудования возникает в двух случаях:

- продление срока службы после окончания срока прописанного в технической документации;
- определение периодичности контроля технического состояния для повышения эксплуатационной надежности и безотказности.

Процесс построения математической модели не является строго регламентированным и зависит от многих факторов. Однако в разработке модели можно выделить три основных стадии:

- построение модели;
- пробная работа с моделью;
- корректировка и изменение модели по результатам пробной работы.

Функцию распределения наработки до отказа (вероятность того, что объект не откажет за время t) можно записать выражением [73]:

$$F(t) = P(T < t), \quad (3.1)$$

где T – наработка объекта от начала эксплуатации до достижения предельного состояния, t – фактическое время работы объекта.

Противоположность выражению (3.1) называется вероятностью безотказной работы (вероятность того, что до времени t отказ объекта не произойдет), которая описывается следующим выражением:

$$F(t) = P(T > t) = 1 - F(t). \quad (3.2)$$

Среднюю наработку на отказ можно определить как

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (3.3)$$

Если исследуемый объект не достиг предельного состояния и находится в работоспособном состоянии, то остаточный ресурс можно найти как

$$Y_t = T - t. \quad (3.4)$$

Зная законы распределения остаточного ресурса и вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, средний остаточный ресурс определяется как:

$$\bar{y}_t = \int_0^{\infty} P_t(y) dy, \quad (3.5)$$

где $P_t(y)$ – гамма-процентный остаточный ресурс (γ), принимается в пределах 0,9-0,95 [74].

Сложность определения остаточного ресурса по выражению (3.5) заключается в подборе функции распределения наработки на отказ и получения экспериментальных данных. При условии, что закон распределения наработки известен, помимо остаточного ресурса можно определить и другие показатели надежности.

Для определения закона распределения наработки на отказ используется два подхода:

- определение закона распределения по статистическим данным;
- аналитический метод, основанный на анализе изменения модели технического состояния объекта.

Учитывая то, что проходческое оборудование работает в тяжелых условиях, получение статистических данных затруднено и применение первого подхода нецелесообразно, так как полученные результаты не будут отражать реальной картины.

При малом числе измерений на практике применяется достаточно простой подход, изложенный в работах [70,75], согласно которому остаточный ресурс определяется из выражения

$$t = \frac{|U_n - U_0|}{v_{cp}}, \quad (3.6)$$

где $U_n - U_0$ – предельное и начальное значение исследуемого параметра, v_{cp} – средняя скорость измерения параметра.

Так как изменение контролируемого параметра носит нелинейный характер (рис. 3.2), то описание его изменения средней скоростью не всегда обоснованно [73,76].

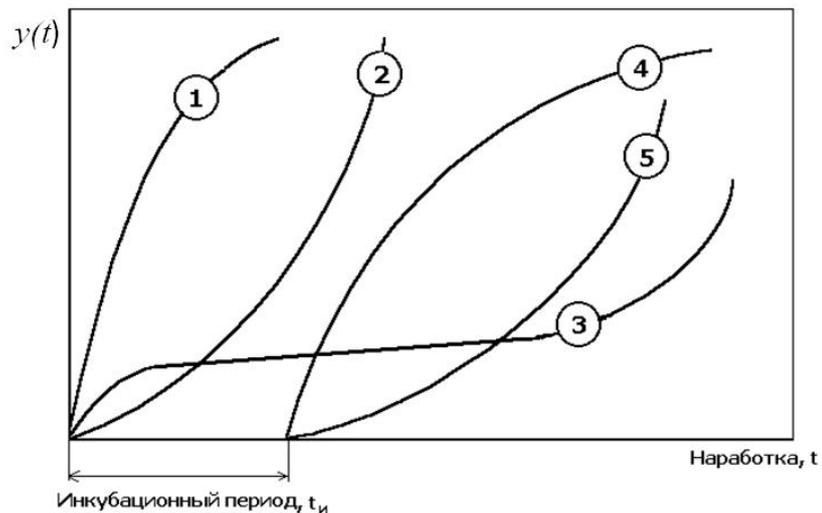


Рис. 3.2 Схема изменения скорости изнашивания в зависимости от наработки: 1 – износ упругого сопряжения; 2 – износ жесткого сопряжения; 3 – кривая Лоренца; 4 – усталостный износ; 5 – коррозионный износ

Определять остаточный ресурс при малом количестве статистических данных и нелинейном изменении скорости изменения контролируемого параметра предлагается из следующего выражения:

$$T = \begin{cases} \sum_{k=1}^i t_k + \frac{t_{i+1}}{h}, & \text{если } t_{i+1} < t_z \\ \sum_{k=1}^i t_k + \frac{t_i |U_n - U_{i-1}|}{|U_n - U_{i-1}|}, & \text{если } U_i > U_n \end{cases}, \quad (3.7)$$

где h – коэффициент учитывающий неравномерность изменения исследуемого параметра; t_k – время проведения диагностических измерений; U_i – измеренное значение контролируемого параметра на момент времени T_i ; U_n – предотказное значение контролируемого параметра.

Для наработки между замерами контролируемого параметра, проводится оценка вероятности безотказной работы (3.8) и вероятность безотказной работы для остаточного ресурса (3.9):

$$P(T_{i+1}) = 1 - F(T_{i+1}), \quad (3.8)$$

$$P_0(T_{i+1}/U_i < U_n) = \frac{(1 - F(T_{i+1}))}{(1 - F(T_i))}. \quad (3.9)$$

Данный подход повышает точность и достоверность прогноза остаточного ресурса, так как скорость изменения параметра является прогнозируемой величиной.

3.3. Проверка гипотезы закона распределения экспериментальных результатов оценки работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия

Поскольку в работе предполагается использовать физико-статистические методы анализа показателей надежности проходческих комбайнов избирательного действия, учитывающих влияние внешних и внутренних факторов и эксплуатационных нагрузок, то, прежде всего, необходимо проверить гипотезу о нормальности распределения результатов измерения, что позволит использовать метод наименьших квадратов для построения тренда потери работоспособности.

Главным при многократном измерении является эффективное использование апостериорной информации. Анализ ее начинается с выдвижения и

проверки гипотез относительно закона распределения вероятности результата измерения.

Иногда по виду гистограммы можно с большой уверенностью заключить, что результат измерения подчиняется (или не подчиняется) нормальному закону распределения вероятности. Если, например, гистограмма имеет вид, показанный на рисунке 3.3, то результат измерения определенно не подчиняется нормальному закону.

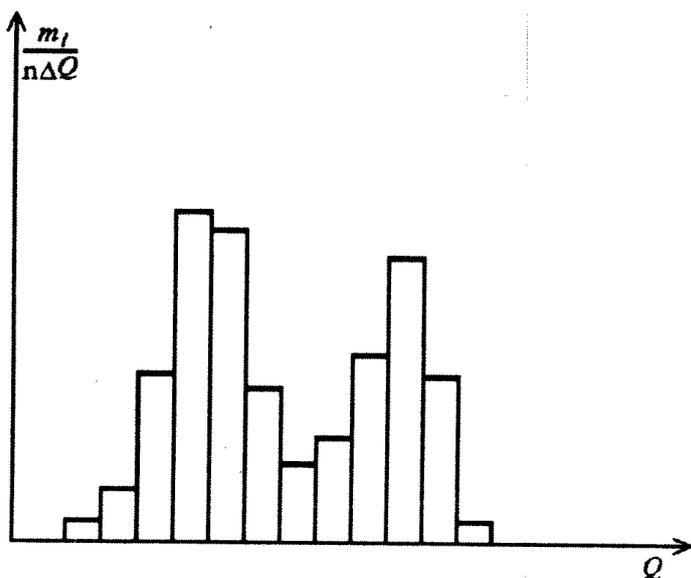


Рис. 3.3. Эмпирическая плотность вероятности результата измерения, не подчиняющегося нормальному закону

Сходимость результатов наблюдений наиболее полно можно оценить в том случае, если их распределение подчиняется нормальному закону (закону распределения Гаусса). Поэтому исключительно важную роль при обработке результатов наблюдений играет проверка статистической гипотезы о нормальности распределения полученных результатов.

Поскольку проверка гипотезы основывается на опытных данных, то при принятии решения всегда возможны ошибки. Отвергая в действительности верную гипотезу, мы совершаем ошибку первого рода. Вероятность ошибки первого рода называется уровнем значимости и составляет $q = 1 - \alpha$. Принимая в действительности неверную гипотезу, мы совершаем ошибку второго рода. Вычислить ее вероятность, вообще говоря, невозможно, поскольку для этого нужно рассмотреть все альтернативные гипотезы, и можно только утверждать, что при уменьшении ошибки первого рода увеличивается

ошибка второго рода, а поэтому при проверке статистических гипотез не имеет смысла выбирать слишком высокие значения доверительных вероятностей.

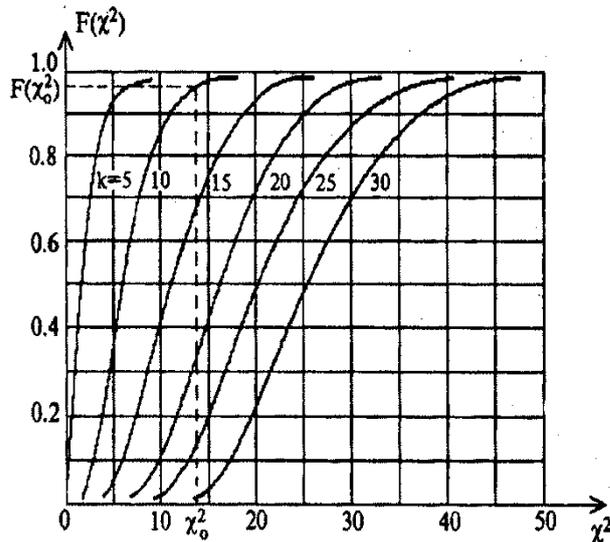


Рис. 3.4. Функция распределения вероятности К. Пирсона

При большом числе результатов наблюдений ($n > 40$) статистическая гипотеза о соответствии распределения результатов наблюдений теоретическому, и в частности нормальному, распределению проверяется с помощью критерия согласия К. Пирсона, который показал, что сумма квадратов невязок частностей и теоретических вероятностей попадания результатов наблюдений в каждый интервал ΔX_i является случайной величиной и подчиняется χ^2 (хи-квадрат) распределению (рис. 3.4). Алгоритм проверки гипотезы по критерию согласия Пирсона заключается в следующем:

1. Данные наблюдений группируются по r интервалам шириной ΔX_i и подсчитывают частоты m_i , равные числу результатов, лежащих в каждом i -ом интервале, т.е. больших его левой и не больших правой его границ. Если в некоторые интервалы попадает меньше 5 результатов наблюдений, то такие интервалы объединяются с соседними.
2. Вычисляют частоты $P_i^* = m_i/n$, которые представляют собой статистические оценки вероятности попадания результата наблюдений в i -й интервал, и оценки средней плотности распределения в интервале $p_i^* = P_i^*/\Delta X_i = m_i/n\Delta X_i$.

3. Определяют из выборки оценки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

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

которые принимают в качестве параметров теоретического распределения с плотностью p_T .

4. Для нормального распределения с $\mu = \bar{x}$ и $\sigma = \bar{S}$ находят теоретическую вероятность P_i попаданий измеренных значений v_i -тый интервал

$$P[x_1 < X < x_2] = \Phi\left(\frac{x_2 - \bar{x}}{\bar{S}}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - \bar{x}}{\bar{S}}\right).$$

При этом следует иметь в виду тождество

$$\Phi(z) \equiv 1 - \Phi(-z)$$

Для каждого интервала вычисляют значения χ_i^2 и суммируют их для всех интервалов

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^K \frac{(n_k - n_{0,k})^2}{n_{0,k}}; \quad n_f = K - 1.$$

где

$$\chi_i^2 = \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}.$$

5. Определяют число степеней свободы $k = r - n_s$ (r – число интервалов гистограммы, а n_s – число независимых связей, наложенных на частоты, – для нормального закона распределения $n_s = 3$, поскольку принимается допущения о том, $\mu = \bar{x}$, $\sigma = \bar{S}$ и сумма плотностей распределения равна 1) и, задаваясь уровнем значимости $q = 1 - \alpha$, находят из таблицы распределения К. Пирсона доверительный интервал $(\chi_{k;0,5q}^2; \chi_{k;1-0,5q}^2)$ значений χ_k^2 , в который мера расхождения (невязка) может попасть по чисто случайным причинам.
6. Проверяется условие $(\chi_{k;0,5q}^2 < \chi_k^2 < \chi_{k;1-0,5q}^2)$. Если условие выполняется, то статистическая гипотеза о подчинении распределения результатов измерений нормальному закону принимается. В противном случае – отвергается.

При небольшом числе наблюдений (обычная практика оценки работоспособности горно-шахтного оборудования) $10 \dots 15 < n < 40 \dots 50$ можно пользоваться составным критерием.

В таком случае сначала рассчитывается статистика

$$d = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}}$$

и проверяется выполнение условия

$$d_{min} \leq d \leq d_{max},$$

где d_{min} и d_{max} зависят от вероятности P^* , с которой принимается решение, и находятся по табл. 3.1 [78].

Таблица 3.1

Граничные значения d

n	$P^*=0,90$		$P^*=0,95$		$P^*=0,99$	
	d_{min}	d_{max}	d_{min}	d_{max}	d_{min}	d_{max}
11	0,7409	0,8899	0,7153	0,9073	0,6675	0,9359
16	0,7452	0,8733	0,7236	0,8884	0,6829	0,9137
21	0,7495	0,8631	0,7304	0,8768	0,6950	0,9001
26	0,7530	0,8570	0,7360	0,8686	0,7040	0,8901
31	0,7559	0,8511	0,7401	0,8625	0,7110	0,8827
36	0,7583	0,8468	0,7440	0,8578	0,7167	0,8769
41	0,7604	0,8436	0,7470	0,8540	0,7216	0,8722
46	0,7621	0,8409	0,7496	0,8508	0,7256	0,8682
51	0,7636	0,8385	0,7518	0,8481	0,7291	0,8648

Если это условие соблюдается, то дополнительно проверяются «хвосты» эмпирического закона распределения вероятности. При $10 \leq n \leq 20$ считается допустимым отклонение одного из независимых значений результата измерения Q_1 от среднего арифметического больше, чем на $2,5 \times S_Q$, при $20 < n \leq 50$ – двух, что соответствует доверительной вероятности $P^{**} \approx 0,98$.

Несоблюдение хотя бы одного из двух условий достаточно для того, чтобы гипотеза о нормальности закона распределения вероятности результата измерения была отвергнута. В противном случае гипотеза принимается с вероятностью $P \geq P^* + P^{**} - 1$.

При $n < 10...15$ гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, не проверяется. Решение принимается на основании анализа априорной информации.

От принятой гипотезы относительно закона распределения вероятности результата измерения зависит вид оценки его среднего значения.

Если закон распределения вероятности результата измерения незначительно отличается от нормального, причем это отличие проявляется в повышенной вероятности больших отклонений от среднего значения (при проверке по составному критерию, например, не соблюдается второе условие), то используют робастные оценки среднего значения.

Если гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, отвергается и принимается гипотеза о том, что он подчиняется другому вполне определенному закону, то эффективная оценка среднего значения синтезируется методом максимального правдоподобия.

3.4. Влияние погрешностей измерения и средств измерения на результаты оценки работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия

Измерение, направленное на изучение определенного свойства объекта, представляет собой познавательную процедуру. В ней выделяются три этапа:

- подготовка измерительного эксперимента;
- проведение измерительного эксперимента;
- обработка экспериментального материала.

Обработка результатов измерительного эксперимента представляет собой заключительный этап измерительной процедуры, на котором по экспериментальным данным с помощью математических методов получают искомый результат измерения и характеристики его погрешности.

Погрешность измерения состоит из нескольких составляющих, обусловленных определенными факторами. В таблице 3.2 представлена классификация погрешностей измерения и средств измерений. Такое представление позволяет исследовать источники составляющих погрешности, определить свойства и оценить их вклад в суммарную погрешность, а также, при необходимости, ввести поправки в результат измерения и организовать измерительный эксперимент таким образом, чтобы свести суммарную погрешность к допустимому уровню.

Таблица 3.2 Классификация погрешностей измерения

Классификационный признак	Виды погрешностей	
	результатов измерений	средств измерений
Источник возникновения	Методическая Инструментальная Субъективная	- Несовершенство средств измерений (несоответствие выполняемых операций методике измерений, старение элементов и т.п.) Отсчитывания, интерполяции
Характер проявления	Систематическая Случайная Грубая	Систематическая Случайная
Способ выражения	Абсолютная Относительная	Абсолютная Относительная Приведенная
Условия применения средств измерений: нормальные рабочие	-	Основная Дополнительная
Характер проявления	-	Статическая Динамическая
Характер зависимости	-	Аддитивные Мультипликативные
Составляющие процесса измерения	-	Мера Преобразование Сравнение Фиксация

Методы обработки экспериментальных данных и определения точности результатов измерений зависит от вида измерений. При всяком измерении, кроме оценки результата измерений, необходимо определять и оценивать погрешность результата.

Погрешность измерений в общем случае равна

$$\Delta = \Delta_{\text{и}} + \Delta_{\text{м}} + \Delta_{\text{отс}}, \quad (3.10)$$

где $\Delta_{\text{и}}$ – инструментальная погрешность;

$\Delta_{\text{м}}$ – методическая погрешность;

$\Delta_{\text{отс}}$ – погрешность отсчитывания.

Инструментальная погрешность $\Delta_{\text{и}}$ определяется

$$\Delta_{\text{и}} = \Delta_{\text{о}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{дин}} + \Delta_{\text{вз}}, \quad (3.11)$$

где $\Delta_{\text{о}}$ – основная погрешность средств измерений;

$\Delta_{\text{д}}$ – суммарная дополнительная погрешность средств измерений, состоящая из суммы ряда слагаемых $\Delta_{\text{д1}}, \Delta_{\text{д2}}, \dots, \Delta_{\text{дN}}$, обусловленных влиянием различных факторов $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$;

$\Delta_{\text{дин}}$ – динамическая составляющая погрешности средств измерений;

$\Delta_{\text{вз}}$ – погрешность, обусловленная взаимодействием средств измерения с объектом измерения.

Информацию о пределе допускаемого значения основной погрешности дает класс точности средства измерений, форма записи которого указывает на способ вычисления погрешности.

Погрешность некоторых средств измерений не может быть нормирована путем указания класса точности, поскольку они характеризуются сложным видом полосы погрешности, для описания которых ГОСТ 8.009-84 [79] разрешает использовать специальные формулы нормирования погрешностей.

Пределами допускаемых дополнительных погрешностей $\Delta_{\text{д}}$ могут быть:

- постоянное значение влияющей величины для всего рабочего диапазона средства измерения или постоянные значения влияющей величины для отдельных интервалов рабочего диапазона;
- отношение предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу значений влияющей величины, к ширине этого интервала;

- предельная функция влияния – зависимость предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины;
- функциональная зависимость пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Динамическая составляющая погрешности $\Delta_{\text{дин}}$ возникает в тех случаях, когда информативный параметр измерительного сигнала изменяется во времени, а инерционные свойства (передаточная функция) средства измерений не позволяют его точно отобразить. При измерении статических характеристик $\Delta_{\text{дин}} = 0$.

Погрешность, обусловленная взаимодействием средств измерений с объектом $\Delta_{\text{вз}}$, зависит от свойств средства измерений и объекта и учитывает влияние средства измерения на измеряемое свойство объекта.

Методическая составляющая погрешности $\Delta_{\text{м}}$ обусловлена несоответствием принятой модели реальному объекту. Выявление источников и характера поведения методических погрешностей возможно при тщательном анализе принятого в конкретном эксперименте метода измерений.

Погрешность отсчитывания $\Delta_{\text{отс}}$ в цифровых средствах измерения не превышает одного шага квантования шкалы и включается в состав основной погрешности Δ_0 . В аналоговых средствах измерения предельное значение погрешности отсчитывания определяется ценой деления измерительной шкалы $\Delta_{\text{отс}} = \pm k \times C$,

где k – коэффициент, определяемый округлением при отсчете (доля цены деления);

C – цена деления шкалы.

По нормируемым метрологическим характеристикам средства измерения можно определить только предельные значения составляющих погрешности измерения Δ , т.е. такие, для которых с вероятностью $P \rightarrow 1$ можно считать, что их действительные значения не превосходят предельно допускаемых величин. Если предельные значения всех составляющих погрешности измерения двузначны и симметричны, то модуль предельного значения по-

грешности измерения находится путем арифметического суммирования модулей отдельных составляющих

$$|\Delta| = |\Delta_{\text{и}}| + |\Delta_{\text{м}}| + |\Delta_{\text{отс}}|. \quad (3.12)$$

Истинное значение $\chi_{\text{из}}$ результата измерения в этом случае представляется в виде

$$(x - \Delta) \leq x_{\text{из}} \leq (x + \Delta); \quad (P \rightarrow 1). \quad (3.13)$$

Для оценки погрешностей прямых многократных измерений используются методы математической статистики.

Оценка истинного значения μ_x результатов измерения в случае нормального закона распределения вероятностей определяется как среднее арифметическое отдельных результатов

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3.14)$$

Отклонение результата каждого измерения от среднего значения

$$v_i = x_i - \bar{x}. \quad (3.15)$$

Оценка средней квадратической погрешности ряда измерений

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}. \quad (3.16)$$

Оценка среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения в случае нормального закона распределения вероятностей погрешности

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3.17)$$

Значениями S_x пользуются в том случае, если необходимо дать характеристику точности применяемого метода измерения: если метод точен, то разброс результатов отдельных измерений мал, т.е. мало значение S_x . Значение $S_{\bar{x}}$ используется для характеристики точности результата измерения некоторого свойства объекта, т.е. результата, полученного посредством математической обработки итогов целого ряда отдельных прямых измерений.

При оценке погрешности измерений пользуются понятиями доверительная вероятность и соответствующего ей доверительного интервала. Эти два понятия связаны между собой и не могут быть использованы в отдельности. Доверительной вероятностью называется такая вероятность, с которой результат отдельного измерения будет находиться в заданном интервале погрешности измерений, а доверительный интервал – это интервал разброса результатов измерений, в котором с заданной вероятностью находится значение отдельного результата эксперимента. Если известен закон распределения вероятностей погрешностей измерения, то по заданной доверительной вероятности можно определить доверительный интервал распределения погрешности измерений. При числе опытов $n \leq 20$ для определения доверительного интервала при заданной доверительной вероятности используют квантили α -распределения Стьюдента, при $n > 20$ – квантили нормального закона распределения.

По заданной доверительной вероятности P и при известном числе опытов определяется квантиль распределения, с помощью которого вычисляются верхняя x_v и нижняя x_n границы доверительного интервала

$$x_n = \bar{x} - \alpha S_{\bar{x}}; \quad x_v = \bar{x} + \alpha S_{\bar{x}}. \quad (3.18)$$

Истинное значение результатов многократных измерений с доверительной вероятностью P лежит в этом доверительном интервале

$$\bar{x} - \alpha S_{\bar{x}} \leq \mu_x \leq \bar{x} + \alpha S_{\bar{x}}. \quad (3.19)$$

3.5. Построение прогностической модели по результатам экспериментальных наблюдений за потерей работоспособности

В измерительной технике очень часто определяют зависимость одной переменной y от другой переменной x . С помощью линейной регрессии исследуют линейную зависимость измеряемых значений. Здесь мы рассматриваем величину y как зависимую, а величину x как независимую переменную.

Так, например, при поверке величина, воспроизводимая мерой, является независимой, а показание поверяемого прибора – зависимой.

В статистических исследованиях зачастую используют метод замены переменных, чтобы привести нелинейные связи между влияющими факторами и зависимой переменной к линейному виду [80].

Несмотря на то, что мы стремимся получить линейную зависимость, измеренные значения y , как правило, не лежат на прямой. В данном случае это происходит потому, что имеется случайная погрешность измерений. При исследовании статистических процессов это обусловлено также и тем, что взаимосвязь является не функциональной, а лишь статистической. Возникает вопрос, как провести искомую прямую, называемую прямой регрессии или прямой выравнивания, через точки измерения, нанесенные на $x - y$ диаграмме, или как рассчитать ее характеристики.

Исходя из предположения, что для определенного значения независимой переменной x величина y нормально распределена относительно своего математического ожидания, лежащего на искомой прямой, и что это нормальное распределение не зависит от значения переменной x , можно применить метод наименьших квадратов. При этом следует рассматривать не расстояние от точки измерения до прямой, а разность ординат точки измерения и прямой (рисунке 3.5).

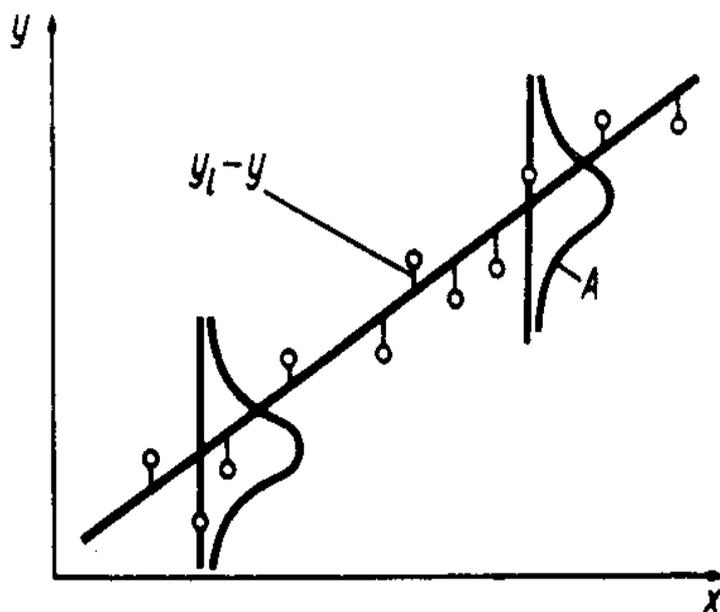


Рис. 3.5. Прямая регрессии
 $(y - \bar{y}) = b(x - \bar{x})$:
 A – нормальное распределение, не зависящее от x

Прямую, соответствующую минимальной сумме квадратов погрешности, с наибольшей вероятностью можно рассматривать как искомую прямую генеральной совокупности и рассчитывать по следующей формуле:

$$(y - \bar{y}) = b(x - \bar{x}),$$

где $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

Крутизна прямой b называется коэффициентом регрессии и рассчитывается следующим образом:

$$b = r \frac{S_y}{S_x} = \frac{cov(x,y)}{S_x^2},$$

где $cov(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ – совместная изменчивость переменных (ковариация);

$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$; $S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ – оценки дисперсии зависимой и независимой переменных;

$r = \frac{cov(x,y)}{S_x S_y}$ – коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между переменными.

В результате расчета получается оценка коэффициента наклона прямой, описывающей линейную зависимость. Здесь снова возникает проблема доверительных границ. Сначала мы рассмотрим доверительные границы для коэффициента регрессии b . Процедура решения этого вопроса состоит в следующем:

1. Выбирают доверительную вероятность $P(\%)$ (например, 95, 99% или другую).
2. По распределению Стьюдента определяют t -критерий $t=f(P, k)$, где P – доверительная вероятность, $k = n - 2$ – число степеней свободы.
3. Вычисляют выражения:

$$S_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

$$S_y = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

4. Определяют доверительные границы погрешности коэффициента регрессии:

$$E_{ap,\%} = \pm t \frac{S_y^2 - b^2 S_x^2}{(n-2)S_x^2}.$$

Математическое ожидание β коэффициента регрессии b с доверительной вероятностью P (%) лежит в области

$$b - E_{ap,\%} \leq \beta \leq b + E_{ap,\%}.$$

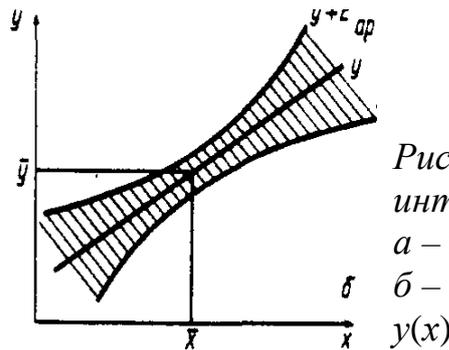
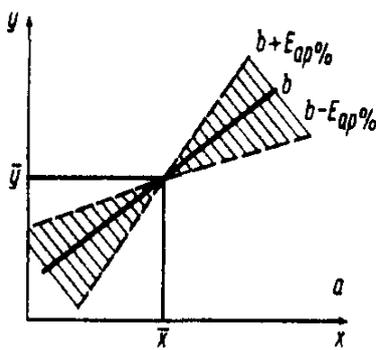


Рис. 3.6. Доверительные интервалы:
 a – коэффициентов регрессии;
 δ – математического ожидания $y(x)$

На рисунке 3.6, a показан доверительный интервал для коэффициента b линейной зависимости, определенный таким методом.

Если, в частности, этот интервал включает значение $\beta = 0$, то, с выбранной доверительной вероятностью, нет оснований утверждать, что действительный коэффициент регрессии b отличен от нуля. В этом случае считают, что зависимость не установлена с достаточной достоверностью.

3.6. Основные итоги и выводы

1. Исследованы и проанализированы существующие методы прогнозирования технического состояния горнопроходческого оборудования и на основании теоретических сведений и экспериментальных работ предложена физико-статистическая модель усталостного изнашивания сложных электромеханических систем.

2. Сформулирована задача оценки остаточного ресурса сложных систем и предложен способ выделения тренда детерминированной компоненты для построения прогноза. Проанализированы требования к формированию экспериментального материала, позволяющие с заданной доверительной вероятностью получать долгосрочные прогностические модели (по методу наименьших квадратов), описывающие постепенные процессы деградации редукторов проходческих комбайнов избирательного действия.

4. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1. Выбор объекта и места испытаний

Как было показано ранее (глава 2), наиболее подходящими методами диагностики технического состояния проходческих комбайнов являются функциональные методы: вибродиагностика и анализ смазывающих веществ.

В качестве объекта диагностики выбран проходческий комбайн СМ-130К, который является наиболее приемлемым для горнотехнических условий, характерных для шахт ОАО «СУЭК-Кузбасс».

На шахте «Полысаевская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» находятся в эксплуатации 2 комбайна СМ-130К:

- 1-й – на вентиляционном штреке 18-10;
- 2-й – на конвейерном штреке 18-12.

Лава № 18-10 ш. «Полысаевская» расположена в юго-западной части уклонного поля 18-2.

В геоморфологическом отношении участок поверхности над полем лавы 18-10 находится на водораздельной части правобережья и левобережья р. Иня с разницей абсолютных отметок в 50 м.

На дневной поверхности в зону подработки от лавы № 18-10 попадают:

- левобережная водооградительная дамба реки Иня и река Иня;
- лог Мельничный;
- ЛЭП.

Мощность рыхлых отложений над полем лавы колеблется от 10 до 18 м.

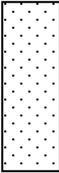
Покровные отложения представлены суглинистыми грунтами.

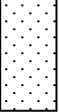
Мощность пласта Толмачевского в контуре лавы № 18-10 колеблется от 2,45 м до 2,70 м.

Пласт угля состоит из двух пачек, разделенных прослойком алевролита мощностью 0,20-0,35 м.

Пласт почти повсеместно имеет ложную кровлю мощностью около 0,10 м, представленную углистым (сажистым) аргиллитом ($f = 2$) или сильно трещиноватым алевролитом (таблица 4.1).

Таблица 4.1 Средняя стратиграфическая колонка пласта Толмачевского

Средняя литологическая колонка	№/№слоев	Описание пород	Сопротивление сжатию, МПа	Сопротивление растяжению, МПа	Объемна масса, т/м ³	Коэффициент разрыхления	Склонность к пучению	Сопротивление почвы вдавлению	Коэффициент крепости f
	1	<u>Основная кровля:</u> Песчаник мелко- и среднезернистый, слоистый. Обрушаемость легкая. $m = 4-8$ м.	60	6,9	2,5	2,2	-	-	6,0
	2	<u>Непосредственная кровля:</u> Алевролит мелко- и среднезернистый, трещиноватый. Ср. устойчивость. $m = 2-12$ м.	35-40	3,5	2,5	2,0	-	-	3,5-4,0
	3	<u>Ложная кровля:</u> Трещиноватый алевролит, реже углистый аргиллит $m = 0,1$ м	15-20	1,0	1,8	1,8	-	-	1,5-2,0
	4, 6	<u>Уголь каменный:</u> Марка «Г», трещиноватый. $m(4) = 1,2$ м $m(6) = 1,00$ м. Средняя вынимаемая $m = 2,47$ м.	13	0,9	1,28	1,4	-	-	1,3
	5	<u>Прослойка,</u> представлен мелкозернистым алевролитом и глинистым песчаником. $m = 0,27$ м.	20-30	3	2,3	1,8	-	-	3
	7	<u>Ложная почва:</u> Переслаивание угля сажистого и углистого аргиллита $m = 0,07$ м	15-25	1,0	2,0	1,7	-	-	1-1,5

	8	Почва пласта: Алевролит мелкозернистый. m = 4-6 м.	35-50	3,7-4,0	2,5	1,8	да	1,5-2,5	3,5-4,0
---	---	--	-------	---------	-----	-----	----	---------	---------

Горнотехнические условия проведения промышленной апробации разработанных методик и оценки работоспособности проходческих комбайнов СМ-130К приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Горнотехнические условия апробации методик

Наименование условий	Значение
Мощность пласта, м	2,45-2,7
Количество породных прослоек, шт	1
Мощность породных прослоек, м	0,20-0,35
Угол падения пласта, град	4-6
Плотность угля, т/м ³	1,28
Марка угля	Г
Влажность угля природная, %	3,3
Группа пыльности пластов	VII
Содержание пыли в отбитом угле, %	2,9
Удельное пылевыведение, г/т	1000
Вмещающие породы (алевролиты), f	2,0-3,0
Тип комбайна	СМ-130К
Сечение выработки в проходке, м ²	11,1
Сечение выработки в свету, м ²	10,9
Присечка породы в забое, %	17,5
Плановое подвигание забоя в сутки, м	7,2
Плановое подвигание забоя в месяц, м	200
Производительность комбайна по углю, т/мин	5,5
Производительность комбайна с присечкой породы 5%, т/мин	3,9
Минимальное количество воздуха подаваемого в забой, м ³ /мин	139
Скорость воздуха в забойной зоне, м/сек	0,25

За счет кливажа наблюдается отжим угля от бортов штрека величиной до 1 метра. В верхней и реже в нижней частях штреков встречаются твердые включения «колчеданов» крепостью до $f = 7-8$ по шкале М.М. Протодьяконова, площадь сечения которых может достигать 1,3 м².

Погрузка же отбитой горной массы может осуществляться небольшими фракциями, достигающими 0,3 м.

При проведении проходческих работ вывал негабаритов способствует значительному увеличению усилий на механизм погрузочного устройства, в том числе, как на сами нагребные лапы, так и на редуктор, что приводит к преждевременному выходу этих устройств из строя.

При контакте резцов с твердыми включениями возникает резкое увеличение амплитуды нагрузок на редуктор исполнительного органа и неравномерный крутящий момент на электродвигателе привода, что приводит к возрастанию токов и выходу из строя магнитной станции.

Повышенная динамика приводит к преждевременному выходу вспомогательных устройств элементов системы гидропривода (уплотнений, манжет и т.п.).

4.2. Методика проведения диагностических обследований проходческих комбайнов избирательного действия по параметрам механических колебаний

Настоящая методика по проведению измерений вибрации предназначена для оценки технического состояния и остаточного ресурса работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия, эксплуатирующегося на шахтах Кузбасса [81].

Методика устанавливает виды, периодичность и точность измерений, необходимых для диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования с целью решения следующих задач:

- контроля и оценки технического состояния агрегатов при приемосдаточных испытаниях и в процессе эксплуатации;
- выявления дефектных узлов и причин их неисправностей;
- ведения технологического режима эксплуатации оборудования с учетом его вибросостояния.

Настоящей методикой предусматривается проведение двух видов диагностических измерений:

- контрольные измерения;
- диагностические измерения.

Контрольные измерения предназначены для оценки технического состояния узлов агрегата в целом с учетом влияния технологических режимов эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия.

Диагностические измерения предназначены для выявления дефектов и причин их возникновения, оценки и прогнозирования степени развития дефектов и разработки рекомендаций по их устранению.

Методика должна применяться совместно с другими нормативно-регламентирующими документами:

- по проведению ремонтных и монтажных работ;
- по эксплуатационному обслуживанию;
- по оценке технического состояния оборудования другими диагностическими методами (трибодиагностика, параметрическая диагностика и т.п.).

В основу методики положены государственные, межотраслевые и отраслевые нормативно-методические материалы [82–87].

Контрольно-диагностические измерения предусматривают проведение измерений и регистрацию контролируемых диагностических параметров вибросигнала во всех штатных точках измерения (рисунок 4.1).

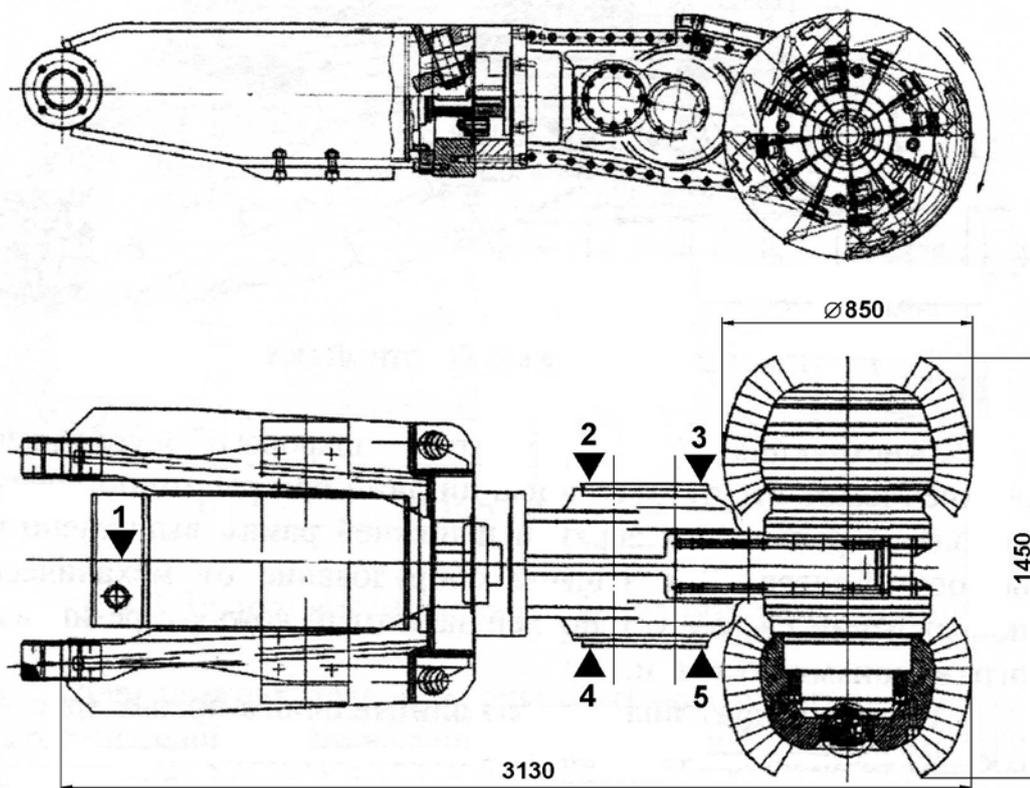


Рис. 4.1 Схема расположения точек замеров вибрации на проходческом комбайне СМ-130

Периодичность проведения контрольных измерений зависит от технического состояния объекта и устанавливается в разделе «Порядок проведения диагностических измерений».

Методикой устанавливаются следующие параметры вибросигнала, регистрируемые при контрольных измерениях:

- СКЗ абсолютной виброскорости (V_e , мм/с) корпусов подшипников электропривода;
- пиковое значение виброускорения корпусов подшипника редуктора.

При этом принимается, что измеряемые параметры должны находиться в следующих диапазонах (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Контролируемые параметры виброакустического сигнала машинных агрегатов проходческого комбайна

Узел	Параметр	Частотный диапазон (Гц)	Динамический диапазон	Погрешность измерений (%), не более
Электропривод	V_e	10...1000	0,1...30 мм/с	±6
Редуктор	V_e	10...1000	0,1...30 мм/с	±6
	a_p	300...10000	0,1...200 м/с ²	±6

Оценка технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия по результатам контрольных виброизмерений при отсутствии эксплуатационных норм, установленных заводом-изготовителем, осуществляется на основе рекомендаций [83, 88] (см. таблицу 4.4 и рисунок 4.2).

Таблица 4.4. Эффективное значение виброскорости V_e в частотном диапазоне 10...1000 Гц, мм/с

Комбайн проходческий со стреловидным ИО	Оценка технического состояния					
	хорошо	допустимо после ремонта	допустимо	предупреждение	требует принятия мер	недопустимо
электродвигатель	<1,8	1,8...2,8	2,8...4,5	4,5...6,3	6,3...7,1	>7,1
редуктор	<1,8	1,8...2,8	2,8...4,5	4,5...6,3	6,3...7,1	>7,1

хорошо,

допустимо после ремонта

допустимо

предупреждение

требует принятия мер

недопустимо

– оценка качества ремонта,

допустимо при приемочных испытаниях

– бездефектное эксплуатационное состояние

– необходимость проведения мероприятий по обнаружению дефекта, усиление контроля

– планомерный вывод в ремонт

– эксплуатация не допускается

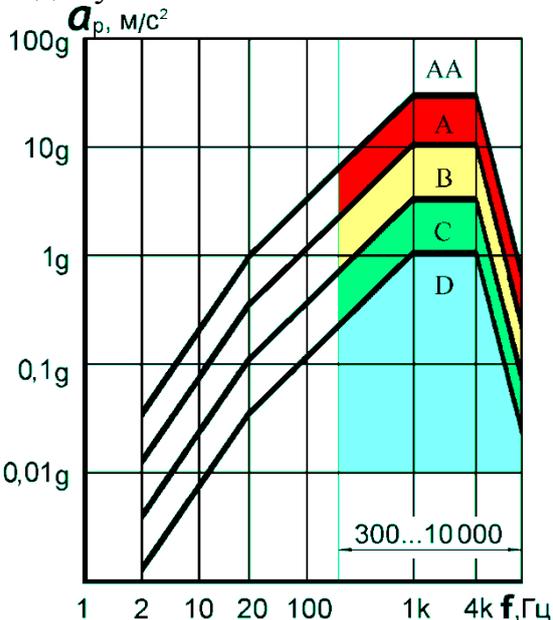


Рис. 4.2 Диаграмма Блейка

для оценки вибрации в высокочастотном диапазоне (пиковое значение виброускорения) на корпусах подшипников редукторов проходческого комбайна

D – область допустимого уровня вибрации при приемочных испытаниях

C – область допустимого уровня при нормальном режиме эксплуатации

B – область усиления контроля и проведения мероприятий по обнаружению дефектов

A – область вибрации, требующей принятия мер (вывод в ремонт)

AA – область недопустимой вибрации (эксплуатация не допускается)

Контрольные измерения абсолютной вибрации проводятся на корпусах подшипников агрегата в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтальном (поперечном по отношению к оси вала) и осевом.

Датчик следует закреплять так, чтобы его измерительная ось совпадала с нужным при измерении направлением (рисунок 4.3).

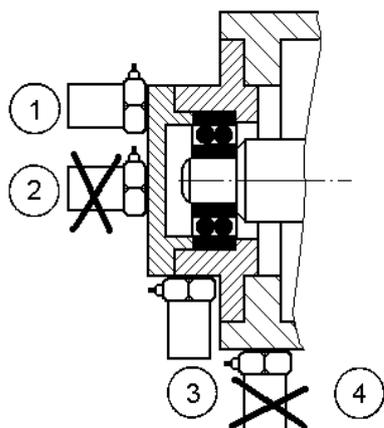


Рис. 4.3. Рекомендуемые места крепления датчика

Предельно допустимое суммарное значение виброускорения для редуктора не должно превышать 160 м/с^2 , а среднее квадратическое значение виброускорения отдельных гармонических составляющих в полосе частот $10 \dots 3000 \text{ Гц}$ не должно превышать 16 м/с^2 (РТМ 38.001-94, таблица 4.10).

Для оценки состояния редукторов необходимо рассматривать диапазон частот не уже $10 \dots 5000 \text{ Гц}$.

Датчик следует устанавливать так, чтобы на его рабочую поверхность непосредственно действовали механические колебания подшипника. Датчик 3 воспринимает механические колебания подшипника при меньшем влиянии вибрации, возбуждаемой другими узлами и деталями агрегата, по сравнению с датчиком 4, который воспринимает преобразованные при прохождении через разъемное соединение колебания подшипника и механические колебания, генерируемые другими узлами агрегата. Аналогично датчик 1 расположен более целесообразно с точки зрения распространения механических колебаний, чем датчик 2. Измерение вибрации на тонкостенных участках корпусов и крышек недопустимо.

Вертикальную составляющую вибрации следует измерять на крышке подшипника над осью вала в средней точке вкладыша.

Горизонтальную (поперечную) составляющую вибрации следует измерять на уровне оси вала против середины длины опорного вкладыша подшипника на корпусе опоры.

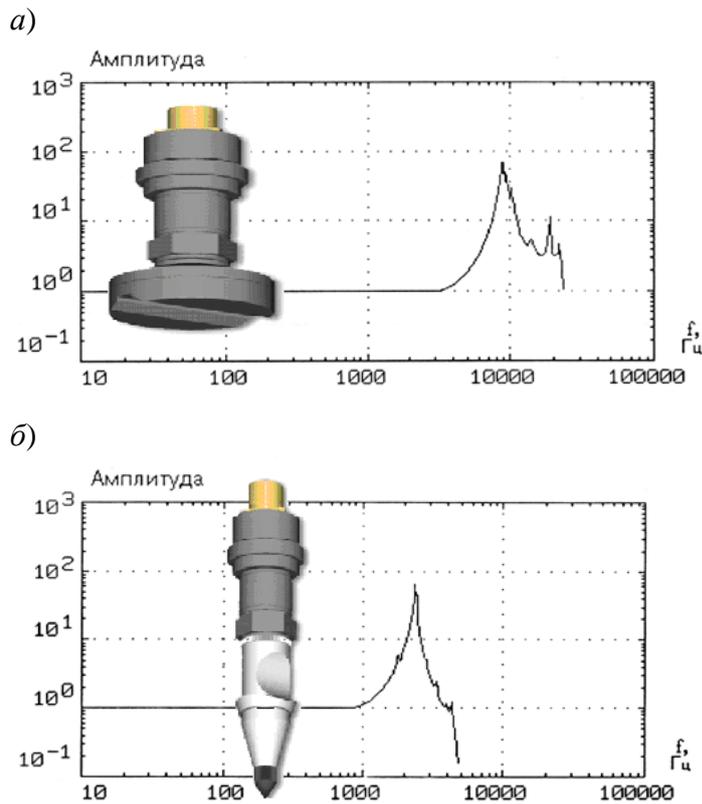


Рис. 4.4. Способы крепления акселерометров к корпусу проходческого комбайна с помощью магнита (а) и щупа (б) и соответствующие им амплитудно-частотные характеристики

Осевую составляющую следует измерять в точке, максимально приближенной к оси вала на корпусе опоры подшипника вблизи горизонтального разъема между крышкой и корпусом. Первичные вибропреобразователи (датчики) абсолютной вибрации при периодическом контроле вибрации следует крепить к агрегату с помощью магнита или щупа [89] (рисунок 4.4).

Методикой предусматривается проведение специальных диагностических измерений на корпусах подшипников тех агрегатов проходческого комбайна, в которых по результатам контрольных измерений предполагается появление дефекта.

Виды и объем диагностических измерений определяются целями диагностических обследований, выполняются по разработанным методикам и программам с привлечением специальной диагностической аппаратуры и вычислительных средств.

В качестве основного вида специальных диагностических измерений методика устанавливает измерение амплитуд и частот спектральных составляющих вибросигнала в диапазоне частот 3...10000 Гц.

При специальном диагностическом обследовании проводятся следующие работы:

- снятие спектральных характеристик вибрации диагностируемого оборудования при стационарном режиме его работы;
- снятие режимных характеристик;
- снятие контурных характеристик;
- запись кривых разгона и выбега;
- определение собственных частот агрегата.

В качестве специальных методов исследования допускается применение вейвлет-преобразования исходного виброакустического сигнала, а также построение годографов вибрации в узкочастотных диапазонах, содержащих частотные составляющие, идентифицирующие тот или иной дефект.

Для проведения виброизменений проходческих комбайнов должны быть использованы виброанализаторы данных, обеспечивающие проведение измерений в соответствии с требованиями, сформулированными в таблицах 4.4, 4.5.

При выборе средств диагностирования также необходимо учитывать предполагаемые условия эксплуатации: запыленность, влажность, низкие температуры, взрывоопасность окружающей среды.

Всем этим требованиям наиболее полно отвечает анализатор вибрации Агат-М, выпускаемый отечественным производителем НПФ «Диамех 2000» [90] (рисунок 4.5).



Рис. 4.5. Двухканальный анализатор вибрации Агат-М фирмы «Диамех 2000»

При проведении контрольных измерений проходческих комбайнов избирательного действия должны регистрироваться:

- СКЗ абсолютной виброскорости во всех штатных точках агрегата в диапазоне частот 10 Гц ...1 кГц;
- пиковое значение виброускорения в штатных точках на редукторе в частотном диапазоне 300...3000 Гц.

После ремонта и монтажа сразу же после выхода проходческого комбайна на номинальный технологический режим необходимо провести контрольные измерения.

После завершения процесса приработки (спустя 72 часа после пуска) провести контрольные измерения.

При уровне вибрации, соответствующего оценке **допустимо после ремонта**, проходческий комбайн принимается в эксплуатацию.

При уровне вибрации, соответствующем оценкам **предупреждение, допустимо, требует принятия мер** проходческий комбайн в эксплуатацию не принимается.

При оценке **недопустимо** проходческий комбайн должен быть остановлен.

В процессе эксплуатации периодичность проведения последующих контрольных измерений устанавливается собственником оборудования после оценки и прогнозирования технического состояния объекта диагностики. Максимальный интервал между этими измерениями, в зависимости от результатов последнего контрольного измерения, должен быть не более:

- требует принятия мер - 7 суток;
- предупреждение - 1 месяц;
- допустимо, допустимо после ремонта - 3 месяца.

Перед плановой остановкой на ремонт не более чем за 1 неделю провести полные контрольные измерения.

4.3. Методика проведения диагностических измерений проходческих комбайнов избирательного действия по параметрам эмиссионного спектрального анализа масла

Настоящая методика по проведению измерений параметров эмиссионного спектрального анализа масла предназначена для оценки технического состояния и остаточного ресурса работоспособности проходческих комбайнов избирательного действия, эксплуатирующихся на шахтах Кузбасса [91].

Методика устанавливает виды, периодичность и точность измерений, необходимых для диагностирования и прогнозирования технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия.

Методика устанавливает два вида диагностических измерений:

- диагностические измерения;
- прогностические измерения.

Данные измерения предназначены для оценки технического состояния редукторов проходческого комбайнов с целью диагностирования и прогнозирования технического состояния объекта, а также описания различных процессов, протекающих в них, что дает возможность выявлять причины снижения надежности.

В основу методики положены государственные нормативно-методические материалы [92–94].

Для проведения эмиссионного спектрального анализа масла должна быть использована фотоэлектрическая установка МФС-7 (рисунок 4.6) с автоматическим управлением и автоматической обработкой выходных данных о спектральных линиях различных элементов в маслах.

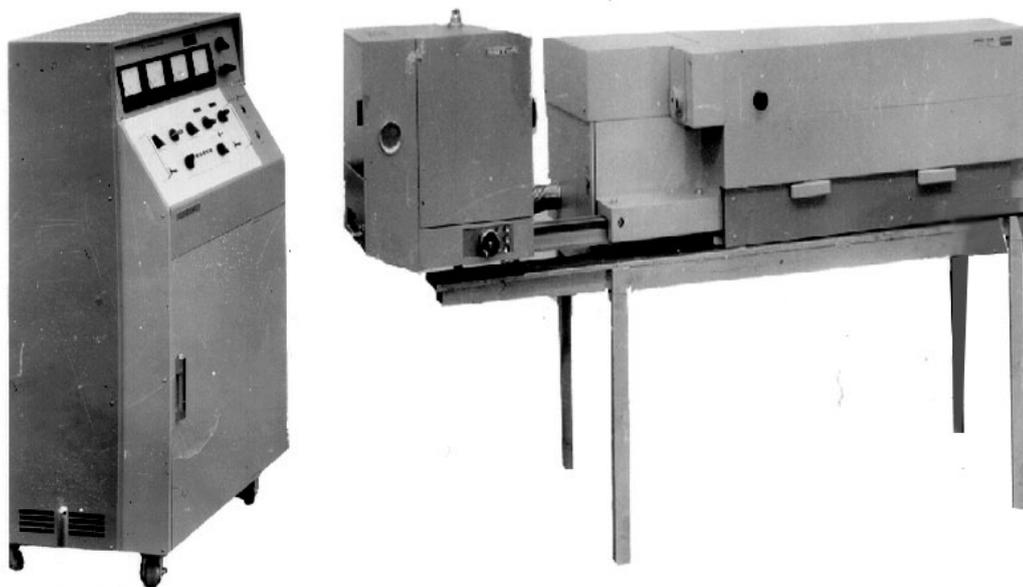


Рис. 4.6. Многоканальный эмиссионный спектрометр МФС – 7

После градуирования потребителем в конкретных производственных условиях установка может быть использована для анализа масел на продукты износа деталей редукторов.

В основу работы установки МФС-7 положен метод эмиссионного спектрального анализа, использующий явление свечения газа или пара исследуемого твердого или жидкого вещества в результате нагревания его до температуры выше 1000°C . При таких температурах энергия движения частиц газа соизмерима с энергией ионизации и химической связи, и при их столкновениях происходят процессы диссоциации и ионизации, в результате которых, наряду с атомами и молекулами, в газе образуются свободные электрические заряды – ионы и электроны. Нагретый, частично ионизированный, проводящий электрический ток газ – плазма – излучает электромагнитные колебания в оптическом диапазоне спектра. Существенной составляющей этого излучения являются линейчатые спектры атомов, причем каждому элементу соответствует свой вполне определенный линейчатый спектр излучения. Поэтому, исследуя спектр излучения плазмы, можно определить химический состав образующего ее газа, а, следовательно, и состав анализируемой пробы, часть которой переведена в газообразное состояние.

Исследование спектра в установке осуществляется путем выделения полихроматором аналитических спектральных линий, регистрации и автоматической обработки сигналов этих линий с помощью фотоэлектронных приемников излучения (таблица 4.5).

Поскольку интенсивность аналитических спектральных линий (мощность излучения единицы объема плазмы) связана с концентрацией соответствующих элементов в пробе, то установка позволяет определять не только качественный, но и количественный состав пробы. Для проведения количественного анализа в конкретной аналитической задаче необходимо выбрать адекватную модель спектроаналитического процесса (зависимость между сигналом и концентрацией исследуемого элемента) и произвести с ее помощью градуирование установки. Широко известна формула Ломакина-Шайбе, связывающая интенсивность аналитической спектральной линии и концентрацию соответствующего элемента показательной зависимостью. Такая зависимость не всегда удовлетворяет требованиям точности и правильности спектрального анализа, так как недостаточно полно отражает процессы, происходящие в плазме.

Таблица 4.5 Перечень основных элементов и их спектральных характеристик

Элемент	Длина волны λ , нм	Ширина выходной щели, мкм
Zn	213,856	75
Cd	228,802	75
Bu	230,424	75
Ba	233,527	75
Ca	239,856	75
R	255,325	75
Fe	259,940	100
Cr	267,716	75
Mg	279,553	75
Pb	283,307	75
Cr	284,324	75
Si	288,158	75
Mn	293,306	75
Mn	294,921	75
Al	308,215	75
Ca	315,887	75
Mo	317,035	75
Sn	317,505	75
Cu	327,396	75
Zn	334,502	75
Ag	338,289	75
Ni	341,477	75
Co	345,351	75

При рассмотрении данной задачи в общем случае оказывается, что физико-химические процессы, происходящие при испарении пробы и образовании плазмы, более сложны, и интенсивность аналитической спектральной линии зависит не только от содержания соответствующего элемента в пробе, но и от множества других независимых факторов и может быть представлена некоторой функцией отклика, аналитическое выражение которой не представляется возможным найти. На основании экспериментальных данных, получаемых по образцам масел с известным химическим составом, можно найти выборочную оценку функции отклика, представляющей собой, с достаточной точностью, модель спектроаналитического процесса. Такой моделью может быть полином первой, второй, или третьей степени или многомерная зависимость, где устанавливается связь интенсивности аналитической спектральной линии не только с концентрацией исследуемого элемента, но и

с концентрациями других элементов, присутствующих в пробе и оказывающих влияние на результаты анализа.

Функциональная схема установки показана на рисунке 4.7.

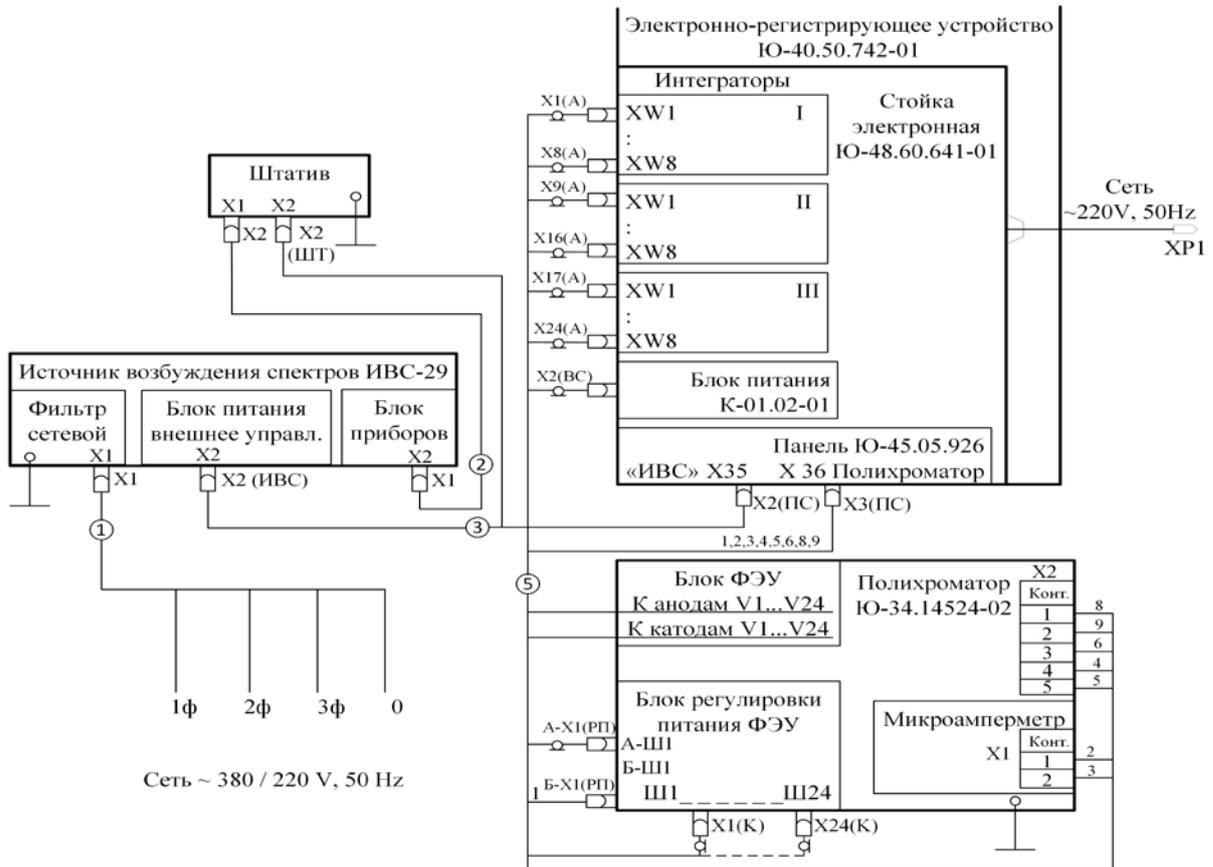


Рис. 4.7. Схема электрическая общая системы фотоэлектрической МФС-7
Здесь приняты следующие аббревиатуры:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БИН – блок интеграторов;

БП – блок питания;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

БРП – блок регулировки питания ФЭУ;

КМС – контролер многоканальных фотоэлектрических систем;

СКО – среднее квадратичное отклонение;

УПТ – усилитель постоянного тока;

ЭРУ – электронно-регистрирующее устройство.

Штатив установки МФС-7 обеспечивает два способа введения анализируемой пробы масла в электрический разряд, образующий плазму. При од-

жимах работы и производит обработку, хранение и выдачу информации по всем регистрирующим каналам на экран видеомонитора и печатающее устройство.

Порядок проведения измерений.

Ежедневно ответственные по подразделениям лица сообщают старшему лаборанту химического анализа участка «Склад ГСМ» бортовые номера горно-шахтного оборудования, с которых необходимо провести интервальный отбор проб работающего масла. Контрольный отбор проб масла с горно-шахтного оборудования производится в процессе его эксплуатации пробоотборщиком участка «Склад ГСМ».

После интервального отбора проб пробоотборник передает отобранные пробы работающего масла в лабораторию химического анализа участка «Склад ГСМ» сменному лаборанту химического анализа для дальнейшего исследования масла.

Оформленную справку о качестве масла старший лаборант химического анализа передает старшему механику подразделения.

Отобранные пробы масла исследуются сменным лаборантом химического анализа, старшим лаборантом химического анализа участка «Склад ГСМ» в день отбора. Результат исследований оформляется в форме справки о качестве масла, где отображаются фактические и браковочные физико-химические показатели масла, заключение о пригодности к дальнейшей эксплуатации масла в сравнении с браковочными показателями.

Работающее масло исследуется по следующим физико-химическим показателям:

- наличие механических примесей;
- наличие следов воды;
- температура вспышки, определяемая в открытом тигле;
- вязкость кинематическая;

- спектральный анализ (содержание следующих элементов: кремний, железо, алюминий, медь, хром, свинец, олово, никель).

Высокая достоверность оценки работоспособности машин по параметрам работающего масла и сравнительно малые затраты, связанные с его применением, делают этот метод весьма перспективным не только при эксплуатации горно-шахтного оборудования, но и при его создании. Так, достоверность диагноза неисправностей редуктора составляет 0,85...0,98, а ошибка точечного прогноза не превышает 15%.

4.4. Апробация методики оценки технического состояния проходческих комбайнов по параметрам вибрации и работающего масла

По результатам многочисленных исследований годовая производительность проходческих комбайнов к концу срока их службы сокращается по сравнению с первоначальной, снижается безопасность их эксплуатации. За срок службы расходы на техническое обслуживание и ремонт превосходят первоначальную стоимость в несколько раз. Поэтому важным направлением при эксплуатации является точная и достоверная прогнозная оценка основных показателей надежности узлов и деталей. В качестве средства, обеспечивающего повышение эффективности и надежности работы проходческого оборудования, является диагностирование технического состояния его элементов. Как уже отмечалось ранее (глава 2) в качестве методов оценки технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия предложено использовать вибродиагностику и диагностику по параметрам работающего масла.

При системе плановых ремонтов, существующей в настоящее время на шахтах Кузбасса, гораздо важнее построить прогноз, дающий ответ на основной вопрос эксплуатации: проработает ли объект диагностики до ближайшего планового ремонта или до следующего момента диагностики.

Одним из наиболее часто используемых методов диагностирования технического состояния является метод, оценивающий состояние узлов и агрегатов по физико-химическому составу отработавших эксплуатационных материалов [95]. Например, анализ отработанного масла на загрязнение, спектральный анализ проб масел, в результате проведения которого по наличию и концентрации различных химических элементов в масле можно поставить диагноз работоспособности отдельных узлов и сопряжений агрегата.

Работающее масло отличается от таких носителей информации, как электрические, механические, акустические и т. д., главным образом тем, что несет комплексную информацию, позволяющую не только диагностировать и прогнозировать техническое состояние объекта, но и описывать различные процессы, протекающие в нем, а это дает возможность выявлять причины снижения надежности и экономичности, а также оценивать их количественно [96].

Информация, содержащаяся в работающем масле, характеризуется качественными показателями, количественные характеристики которых получают в результате физико-химических, спектральных и других методов непосредственного анализа масла.

В основу методологического подхода к исследованию системы «механизм – масло» положен принцип описания ее комплексом показателей, характеризующих функциональные свойства системы в каждый заданный момент времени по анализу единичной пробы масла.

Это дает возможность решать широкий круг задач с целью повышения работоспособности системы «механизм – масло». К их числу относятся:

- оценка степени влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на эксплуатационную надежность и долговечность машин и механизмов;
- оценка эффективности новых сортов масел;
- разработка вопросов диагностики и прогнозирования ресурса машин и механизмов по параметрам работающего масла;

- создание универсальных высокоэффективных систем контроля надежности и долговечности машин и механизмов с замкнутой системой смазки.

Прогнозирование работоспособности системы «механизм – масло» позволяет планировать сроки постановки машин на техническое обслуживание и ремонт и сроки смены в них масла; оценивать долговечность машин, не достигших своего предельного состояния.

В первом случае это дает возможность поставить планово-предупредительную систему технического обслуживания и ремонта, а также планирование эксплуатационных расходов на научную основу, а во втором – осуществить научно обоснованный выбор перспективных машин и механизмов с точки зрения их надежности. В отношении горных машин прогнозирование долговечности позволяет вносить необходимые изменения конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов, не дожидаясь наработки до заданного ресурса. Эти изменения позволят повысить ресурс работы машин и механизмов.

Прогнозирование остаточного ресурса деталей «критических по надежности» методом эмиссионного спектрального анализа масла основано на закономерностях их изнашивания. Объектами прогнозирования остаточного ресурса могут быть такие детали, закономерности изменения геометрических или кинематических размеров которых на участке установившегося износа сопровождаются определенными закономерностями поступления какого-либо элемента-индикатора износа в масляную систему.

Сущность метода эмиссионного спектрального анализа масла заключается в определении в работавшем масле содержания продуктов износа взаимодействующих деталей и посторонних механических примесей. Концентрация примесей возрастает с увеличением интенсивности поступления примесей в масло, т. е. с увеличением скорости изнашивания механизмов редуктора. При продолжительной работе редуктора концентрация примесей возрастает с увеличением исходной концентрации.

При обновлении масла в редукторе уровень концентрации примесей в нем изменяется в зависимости от исходной концентрации, количества масла в системе и продолжительности работы редуктора. Из этого следует, что при длительной работе масла в редукторе концентрация механических примесей увеличивается, а масло теряет свои смазывающие свойства. При помощи спектрального анализа масла можно определить техническое состояние редуктора и необходимость проведения того или иного вида ремонта.

Для анализа отобранных проб масла из редуктора режущей части проходческого комбайна СМ-130К применяется многоканальная фотометрическая система МФС-7. Установка при помощи спектрального анализа механических примесей масла осуществляет определение концентраций металлических частиц в нем – продуктов изнашивания деталей (содержание щелочных металлов, *Ca* и *Ba* – основы моюще-диспергирующих и других присадок к маслам, а также кремния, как основы абразивных, самых опасных загрязнений масла).

При анализе масла определяются следующие параметры: вязкость, температура вспышки, капельная проба, содержание воды, механические примеси, содержание металлов. Основными металлами, применяемыми для диагностирования технического состояния редукторов, являются железо, медь, хром, никель и кремний.

Предельные значения содержания металлов в масле приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Предельные значения содержания металлов в масле

Металл	Содержание в масле редуктора режущей части проходческого комбайна СМ-130К, %
Железо	0,5
Медь	0,001
Хром	0,5
Кремний	0,5
Никель	0,5

Взятие проб масла выполнялось со следующей периодичностью:

- во время регулярных проверок при каждом ТО-1;

- перед сменой масла;
- более часто, если подозревается ненормативный износ.

По данным анализа строились графики, где наблюдался рост содержания механических примесей и различных металлов.

Для определения наличия зависимости между наработкой и изменением концентрации различных металлов, отражающих техническое состояние редуктора режущей части комбайна СМ-130К, циклический порядок наработки путем сортировки был преобразован в нарастающий от минимального до максимального значений.

При этом получилась некоторая совокупность точек, приведенная на рисунке 4.8.

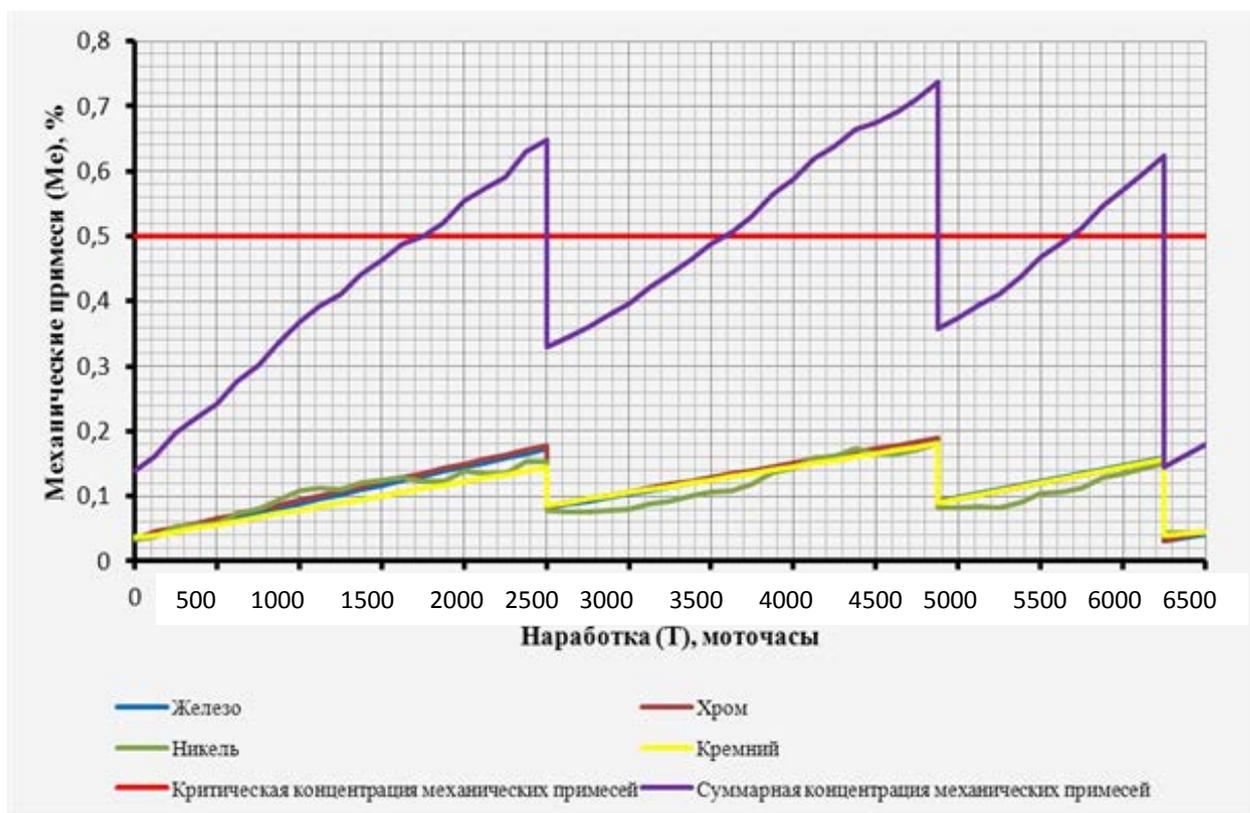


Рис. 4.8. Диаграмма содержания механических примесей в масле в зависимости от наработки

Как следует из анализа рисунка, кривые имеют ряд локальных экстремумов, причиной возникновения которых в процессе эксплуатации является долив свежего масла в редуктор. Данная ситуация возможна и при полной смене масла при проведении регламентных работ по ТО. Кроме этого, дан-

ные эксперимента показали, что металлы в процессе работы накапливаются практически равномерно. Поэтому для проведения следующего этапа экспериментальных работ были взяты средние значения изношенных металлов (механические примеси).

Наличие веществ, вызывающих коррозию, и абразивных частиц в смазочном материале приводит к абразивному износу, коррозии поверхности зубьев, способствует возникновению газовой или жидкостной эрозии.

Развитию абразивного износа способствует использование пластичной или загрязненной смазки, являющейся аккумулятором абразивных частиц. В дальнейшем у изношенных передач повышаются зазоры в зацеплении, усиливаются шум, вибрация, динамические перегрузки [89, 97]; искажается форма зуба; уменьшаются размеры поперечного сечения, прочность зуба. Основные меры предупреждения – защита от загрязнения, применение магнитных фильтров и повышение качества фильтрации масла [98].

По проведенному опыту и полученным результатам построены графики, отражающие характер изменения содержания механических примесей работающего масла в зависимости от наработки.

Данные проведенных экспериментов позволили выявить зависимость количества механических примесей от наработки (рисунок 4.9).

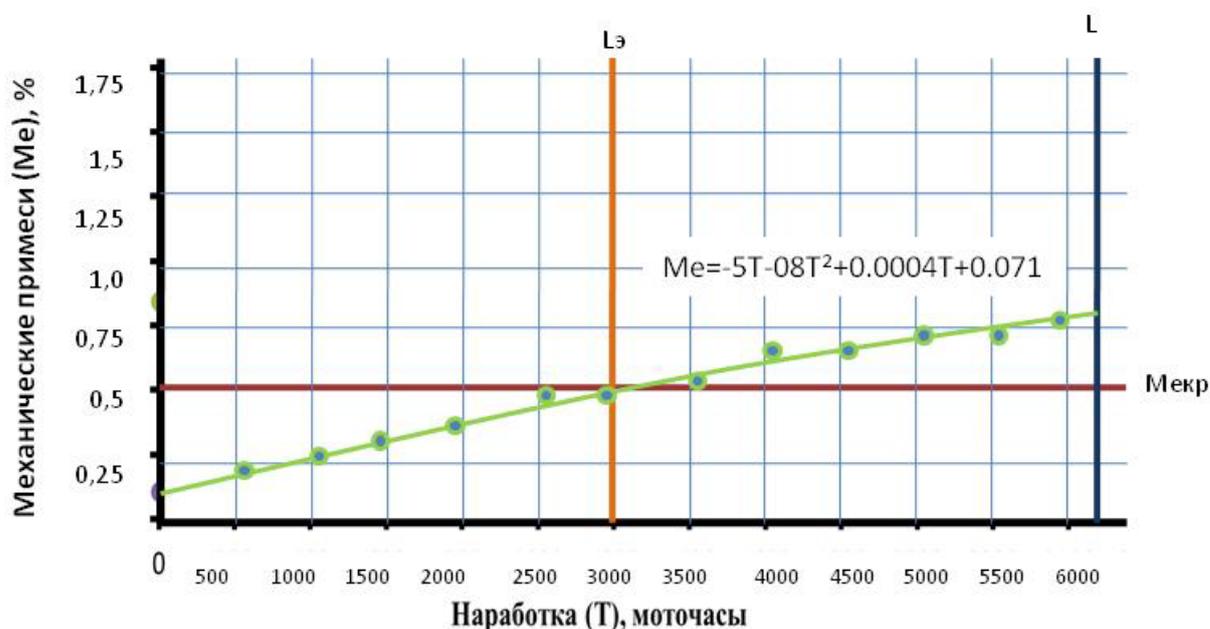


Рис. 4.9. Зависимость количества механических примесей в масле редуктора режущей части проходческого комбайна СМ-130 от наработки

На рисунке 4.9 приняты следующие условные обозначения: $t_{кр}$ – критическая температура масла; t – температура масла; Me – концентрация механических примесей; $Me_{кр}$ – критическая концентрация механических примесей; L – периодичность смены масла; $L_э$ – экспериментальная периодичность смены масла.

Проведенные исследования позволили выявить преимущества системы диагностирования по составу и количеству механических примесей в масле. Это позволяет с 99% доверительной вероятностью прогнозировать момент перехода в неисправное состояние, грозящее аварийным отказом узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия и осуществлять эффективное планирование ремонтных работ, предупреждающих возникновение аварийных ситуаций.

Рассмотрим построение долгосрочного прогноза работоспособности проходческого комбайна на основе экспоненциальной экстраполяции результатов вибродиагностики [99, 100, 101].

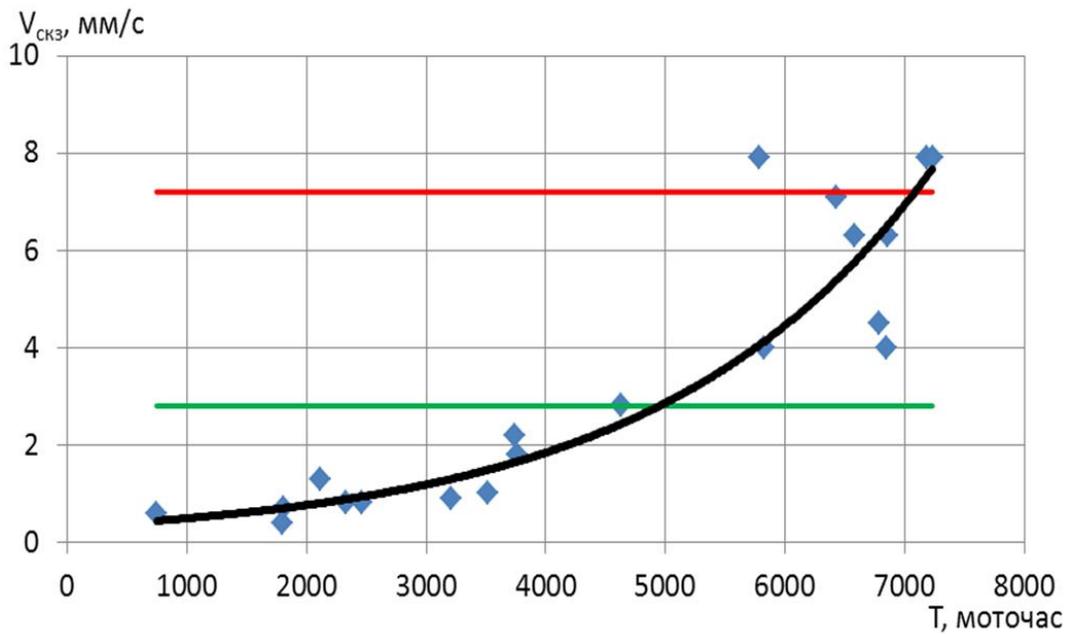
На рисунке 4.10,*а* приведены результаты контроля виброскорости на подшипниковых узлах электродвигателя привода резания проходческого комбайна СМ-130К в зависимости от его наработки после ремонта, и линия тренда, построенная по результатам долгосрочного прогнозирования, а также границы переходов технического состояния из удовлетворительного в допустимое (зеленый цвет) и из допустимого – в недопустимое (красный цвет). Как нетрудно видеть, за 7 тысяч моточасов работы техническое состояние электропривода практически исчерпано и требуется ремонт режущей части.

На рисунке 4.10,*б* приведены результаты диагностического обследования редуктора резания проходческого комбайна СМ-130, из анализа которых следует, что техническое состояние редуктора резания к концу периода наблюдений стало недопустимым, что требует проведения ремонта. Сравне-

ние виброактивности опор электродвигателя и редуктора показывает, что источником повышенной вибрации является редуктор.

Анализ спектров нагруженности опорных узлов редуктора резания показал, что наиболее вероятным дефектом является нарушение зубозацепления в волновой передаче, что вызывает повышенную вибрацию опорных подшипников (рисунок 4.11).

а)



б)

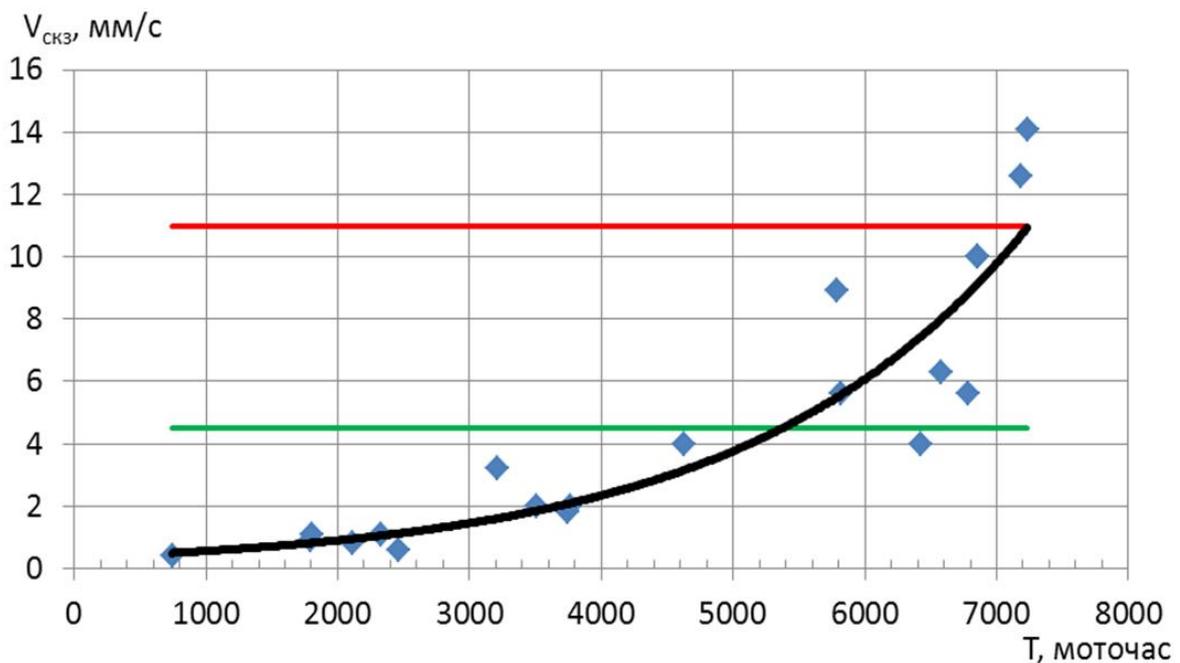


Рис. 4.10. Результаты виброобследования опорных подшипников

электродвигателя (а) и редуктора привода резания проходческого комбайна СМ-130 (б)

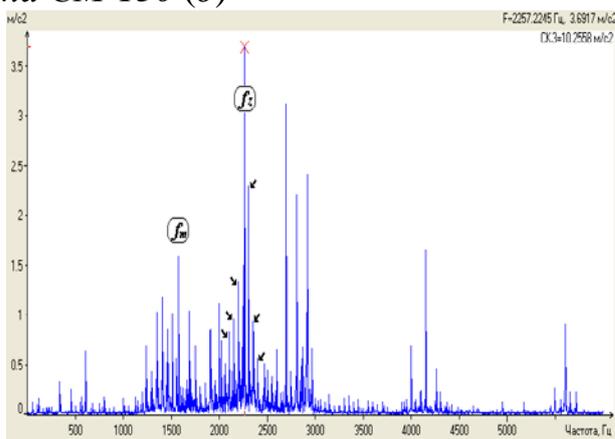


Рис. 4.11. Спектр сигнала вибрации редуктора резания с развитым дефектом контактирующих поверхностей зубчатых колес

Последующий визуальный осмотр и дефектация редуктора резания показали правильность поставленного диагноза (рисунок 4.12).

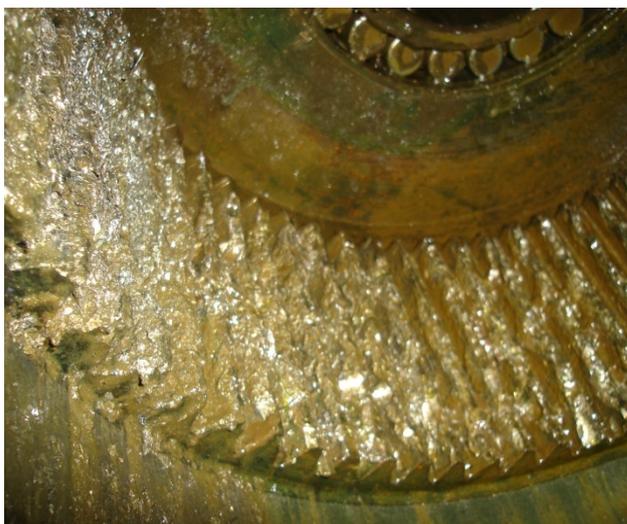


Рис. 4.12. Дефекты зубчатой передачи в волновом редукторе резания комбайна СМ-130К

Таким образом, показано, что разработанная прогностическая модель, основанная на статистических результатах вибродиагностики, позволяет с 95% доверительной вероятностью прогнозировать момент перехода в неисправное состояние, грозящее аварийным отказом узла или агрегата. В совокупности комплексное диагностирование по параметрам работающего масла и по параметрам механических колебаний позволяет повысить достоверность прогноза и осуществлять эффективное планирование ремонтных работ, предупреждающих возникновение аварийных ситуаций.

4.5. Направления дальнейших исследований

В связи с тем, что в рамках выполненных исследований было проведено промышленное опробование (in-situ) только временной методики комплексной оценки технического состояния по параметрам вибрации и по параметрам работающего масла для проходческого комбайна СМ-130К, то при промышленной реализации концепции профилактического обслуживания проходческой техники должны быть учтены следующие основные пункты программы дальнейших исследований.

1. Распространение комплексного метода оценки технического состояния на другие типы проходческого оборудования.
2. Разработка новых и совершенствование существующих методов и методик как анализа виброакустических сигналов, так и анализа работающего масла и отложений с целью получения более полной информации, характеризующей техническое состояние и работоспособность проходческих комбайнов избирательного действия.
3. Разработка методов инструментальной диагностики применительно к методу эмиссионного спектрального анализа параметров работающего масла с целью повышения достоверности оценки работоспособности и создания эффективных алгоритмов поиска неисправностей. Обладая высокой чувствительностью, указанный метод в ряде случаев не позволяет определять характер и место неисправности, особенно сложных механизмов.
4. Получение новых и уточнение существующих стохастических зависимостей, лежащих в основе оценки работоспособности горно-проходческого оборудования по параметрам механических колебания и параметрам работающего масла.

4.6. Основные итоги и выводы

1. Из всех существующих способов проходки подготовительных выработок с трудными горно-геологическими условиями месторождений предприятия «СУЭК-Кузбасс» в настоящее время наиболее приемлемым остается механический способ разрушения массива комбайнами избирательного действия.
2. Система технического обслуживания, основанная на диагностических методах контроля, позволяет не только увеличить срок эксплуатации проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом в среднем на 10%, но и снизить стоимость ремонтных работ в 8-10 раз, при вовремя обнаруженном дефекте.
3. Наиболее приемлемым и достоверным методом оценки технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия является комплексный метод диагностики, который должен базироваться, для получения наиболее достоверного заключения, на одновременном использовании нескольких диагностических подходов и результатах комплексного анализа всей имеющейся информации как о вибрационной активности опор узлов и агрегатов, так и о параметрах работающего масла.
4. Разработана методика комплексной оценки работоспособности проходческого комбайна по параметрам работающего масла и по параметрам механических колебаний, которая обеспечивает требуемую достоверность (95%), и проведена их промышленная апробация на шахте «Полысаевская» при проходке подготовительных выработок по пласту Толмачевский с использованием проходческих комбайнов СМ-130К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи, состоящей в установлении взаимосвязи технического состояния отдельных узлов и агрегатов проходческих комбайнов избирательного действия и параметрами работающего масла и вибрационными характеристиками, необходимой для обоснования метода оценки их технического состояния и разработки прогностической модели, позволяющей повысить эффективность и безотказность использования проходческой техники.

В результате выполненных лично автором исследований получены следующие основные результаты:

1. Из всех существующих способов проходки подготовительных выработок с трудными горно-геологическими условиями месторождений предприятия «СУЭК-Кузбасс» в настоящее время наиболее приемлемым остается механический способ разрушения массива комбайнами избирательного действия.
2. Система технического обслуживания, основанная на диагностических методах контроля, позволяет не только увеличить срок эксплуатации проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом в среднем на 10%, но и снизить стоимость ремонтных работ в 8-10 раз при вовремя обнаруженном дефекте.
3. Наиболее приемлемым и достоверным методом оценки технического состояния проходческих комбайнов избирательного действия является комплексный метод диагностики, который должен базироваться, для получения наиболее достоверного заключения, на одновременном использовании нескольких диагностических подходов и результатах комплексного анализа всей имеющейся информации как о вибрационной активности опор узлов и агрегатов, так и о параметрах работающего масла.

4. Разработана методика комплексной оценки работоспособности проходческого комбайна по параметрам работающего масла и по параметрам механических колебаний, которая обеспечивает требуемую достоверность (95%), и проведена её промышленная апробация на шахте «Полысаевская» при проходке подготовительных выработок по пласту Толмачевский с использованием проходческих комбайнов СМ-130К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tayler, W. J.; England, J. R.; Reise Baring at JN.CO-1974 RETC. Proceedings, V.Z., p 1473-1484.
2. Бихдяев, А. А.; Каменский, В. В.; Федулова, А. Н. Ударное дробление крепких материалов. – Новосибирск: Ин-т горн.дела СО АН СССР, 1969. – 87 с.
3. Ржевский, В. В.; Ямщиков, В. С.; Коробейников, А. В. Резание пород при наложении на инструмент высокочастотных колебаний./ ФТПРПИ. – 1969. - №5. – 17 с.
4. Ефремов, А. В.; Морозов, В. С. Резонансное резание горных пород. – Дубна, 1972, - 29 с.
5. Кляйнер, Х. В. Новые результаты, полученные на экспериментальном стенде «Режущие головки для комбайнов избирательного действия» /Глюкауф. – 1982. - №9. – С. 33-39.
6. Рутберг, М. И.; Храмышкин С. И.; Мерзляков В. Г. Исследование комбинированного разрушения горного массива струей воды и скалывающим диском. – В кн.: Новые методы разрушения углей и горных пород: Научн. сообщ. ИГД им. А.А.Скочинского. Вып. 189. –М.,1980. – С. 93-98.
7. Шахтные испытания экспериментального проходческого комбайна с алмазным диском и гидравлическим отрывником./ В. Д. Ярема, Ю. И. Климов, В. А. Ященко [и др.]// В кн.: Совершенствование методов разработки и создание средств комплексной механизации выемки угольных пластов. – Караганда, 1972. – С.148 – 150.
8. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом./ А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, А. Г. Лазуткин, А. И. Янцен – М.: Недра, 1972. – 256 с.
9. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Гос. стандарт СССР. – М., 1985.

10. Пат. 2455486 Российская Федерация, МПК Е 21 С 25/18, Е 21 С 27/24 (2006.01). Исполнительный орган проходческого комбайна./ Л. Е. Маметьев, А. А. Хорешок, А. Ю. Борисов, В. В. Кузнецов, С. Г. Мухортиков.
11. Надежность машин: учеб. пособие для машиностр. спец. Вузов./ Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев; под ред. Д. Н. Решетова. – М.: Высш. шк., 1988. – 238 с.
12. Техническое обслуживание и ремонт горношахтного оборудования / А. Н. Коваль, А. М. Горлин, В. И. Чекавский [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 344 с.
13. Шор, Я. Б.; Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности.// М.: Изд-во Советское радио, 1968. – 288 с.
14. Аристов, А. Н. Стандартизация и ремонтпригодность технических устройств.// Надежность и контроль качества. – 1972. - № 7. – С. 9-12.
15. Квагинидзе, В. С. Диагностика, техническое обслуживание и ремонт карьерного горно-транспортного оборудования в условиях низких температур. Дисс. ... д-ра техн. наук. Кемерово, КузГТУ. – 267 с.
16. Герике, Б. Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов. – В 2-х ч.: Ч.1. Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов.// Кемерово. – Кузбас.гос.техн.ун-т. – 1999. – 189 с.
17. Автоматизация управления ремонтом оборудования горных предприятий/ В. Е. Бельфор, А. М. Горлин, В. И. Морозов.// М. – Недра. – 1983. – 160с.
18. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий: Монография / Седуш В.Я., Кравченко В.М., Сидоров В.А., Ошовская Е.В. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – 100 с.
19. Чумичев, А. М. Техника и технология неразрушающих методов контроля деталей горных машин и оборудования.– Москва: Московский государственный горный университет, 2003. – 380 с.
20. Коллакот Р. Диагностика повреждений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

- 21.ГОСТ 23479-79 Методы оптического контроля. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9с.
- 22.Инженерная психология./ Под редакцией Г. К. Середы. – Издательское объединение «Вища школа», 1976. — 308 с.
- 23.Генкин, М. Д.; Соколова, А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
- 24.Никитин, Ю.Р.; Абрамов, И. В. Диагностирование мехатронных систем: учеб. пособие.// Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – 116 с.
- 25.Технические средства диагностирования: Справочник /В. В. Клюев и др.; Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 671 с.
- 26.Техническая диагностика механического оборудования / Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я. и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – 459 с.
- 27.Справочник SKF по техническому обслуживанию подшипников качения. Публикация 4100 R. Reg. 703000. – 1995. – 335 с.
- 28.Голуб Е. С., Мадорский, Е. З.; Розенберг, Г. Ш. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. – М.: Транспорт, 1993. – 150 с.
- 29.Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. –СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2003.
- 30.Задирака, В.К. Теория вычисления преобразований Фурье. – Киев: Наукова думка, 1983. 216 с.
- 31.Коваленко, И. Н., Кузнецов, Н. Ю.; Шуренков, В.М. Случайные процессы: Справочник. Киев: Наукова думка, 1983. 366 с.
- 32.Герике, Б.Л.;Абрамов, И.Л.;Герике, П.Б.Вибродиагностика горных машин и оборудования. – Учебное пособие – Кемерово: КузГТУ, 2007. – 167 с.
- 33.Micchel,A. Noll. CepstrumPitchDetermination. – TheT. oftheAcousticalSoc. OfAmerica, 1967, v.41 №2.
- 34.Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- 35.<http://blog.vibroexpert.ru/?cat=19&paged=3>

- 36.<http://blog.vibroexpert.ru/?p=732#more-732>
- 37.Брошюра фирмы «Брюль и Кьер». «Измерение и анализ механических колебаний». –BG0549–11, 1988. –41 с.
- 38.Петрухин,В. В.;Петрухин, С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
- 39.http://www.vites.ru/upload/iblock/002/diagnostika_podshipnikov.pdf
- 40.Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения, Успехи Физических Наук, 166 (11), (1996) 1145
- 41.Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам, перевод. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001, – 464с.
- 42.Солод,В. И.; Гетопанов, В. Н.; Шпильберг, И. Л. Надежность горных машин и комплексов. – М.: МГИ, 1972. – 198с.
- 43.<http://art-con.ru/node/3678>
- 44.Методы спектрального анализа./А. А.Бабушкин, Бажулин П. А., Королев Ф. А. и др. Под ред. Левшина В.Л.. Учебник. –М.: Изд-во МГУ, 1962 – 510с.
- 45.Барсуков В.И. Атомный спектральный анализ.–М.: Изд-во Машиностроение. –2005 –103с.
- 46.Терек, Т.; Мика, Й.;Гегуш, Э. Эмиссионный спектральный анализ. Т.1, 2. М., 1982.
- 47.Свентицкий, Н.С. Визуальные методы эмиссионного спектрального анализа. М., 1961.
- 48.Пупышев, А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ.М.: Техносфера, 2009. – 784 с.
- 49.Тарасевич, Н.И.; Семенов, К.А.;Хлыстова, А.Д. Методы спектрального и химико-спектрального анализа. М., 1973.
- 50.<http://www.bibliotekar.ru/criminalistika-3/76.htm>
- 51.Головина, А. П.; Левшин, Л. В. Химический люминесцентный анализ неорганических веществ, М., 1978, 248с.
- 52.<http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/134993/>

- 53.Блохин, М.А.;Швейцер, И.Г. Рентгеноспектральный справочник, М., Наука, 1982 – 374 с.
- 54.Верховодов, П. А. Рентгеноспектральный анализ: вопросы теории и способы унификации. –Наукова Думка, 1984. – 159 с.
- 55.Таунс, Ч.;Шавлов, А. Радиоспектроскопия. М.: Издательство Иностранной Литературы, 1959 – 757 с.
- 56.Дмитриев, Ю. И. Радиоспектроскопические приборы. Л: Изд-во ЛЭТИ, 1978. – 89 с.
- 57.Зайдель, А.Н. Основы спектрального анализа, М.: Наука, 1965. – 320с.
- 58.Карлсон, Т А. Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия. М. Мир, 1982, – 286 с.
- 59.Геологический словарь: в 2-х томах. – М.: Недра. Под редакцией К. Н. Паффенгольца и др. –1978.
- 60.Вовна, В.И. Электронная структура органических соединений по данным фотоэлектронной спектроскопии, М., 1991. – 247 с.
- 61.Бельдеева, Л.Н. Технологические измерения на предприятиях химической промышленности. Учебное пособие в 2-х частях. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002.
- 62.Добрецов,Л. Н.;Гомоюнова, М. В. Эмиссионная электроника, М., 1966.
- 63.Виброакустическая диагностика в судостроении./ В. И. Попков, Э. Л. Мышинский, О. И. Попков. 2-е изд., перераб. и доп.// Л.: Судостроение, 1989. – 253 с.
- 64.Глухоманюк, Г. Г. Влияние факторов взаимодействия на жизнеобеспечение механического оборудования. // Контроль. Диагностика. 2001. №8. С. 24-33.
- 65.Мартынов, В. И.;Иванов, Д. Ю. Анализ вибрационных характеристик с использованием фазовых плоскостей.// Сб. науч. докладов IV международной научно-технической конференции «Вибрационные машины и технологии»/ Курск. – 1999. – С. 189-191.

66. Sokolova, A. G. New noise-immune incipient failure detection methods for machinery monitoring and protection systems.// TheFifthInternationalConferenceonVibrationProblem. ICO VP-2001.
67. Замараев, Р. Ю. Математические модели диагностики состояния динамических систем роторных механизмов горных и энергетических машин. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Кемерово. ИУУ СО РАН. – 1999. – 26 с.
68. Сушко, А. Е. Разработка математической модели оптимального технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования.// Науч. сессия МИФИ-2007: Сб. науч. тр. В 17 т. М.: МИФИД007. Т.2. С.153-154.
69. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. – Новосибирск: Наука, 2006. – 228с.
70. Методические рекомендации по проведению диагностических виброизмерений ЦКМ и ЦНА предприятий МХНП СССР. – М.: Интертехдиагностика, 1991. – 53с.
71. Асаул, А. Н.; Старинский, В.Н.; Бездудная, А.Г.; Ерофеев, П.Ю. Оценка машин, оборудования и транспортных средств. Учебно-методическое пособие; под общ. ред. д.э.н. проф. А.Н. Асаула.// СПб.: «Гуманистика», – 2007. – 296с.
72. http://www.labrate.ru/leifer/leifer_kashnikova_article_2007-1_residual_service_life.htm.
73. Барлоу, Р.; Прошан, Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
74. Основы надёжности горных машин /В. Р. Кубачек, Л. Г. Куклин. – Свердловск: Изд-во СГИ им. В. В. Вахрушева, 1982. – 72 с.
75. Методика прогнозирования остаточного ресурса безопасной эксплуатации сосудов и аппаратов по изменению параметров технического состояния. – М.: Центрхиммаш, 1993. – 32с.

76. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов./А.Н. Смирнов, Б.Л. Герике, В.В. Муравьев.// Новосибирск: Наука, 2003. – 244с.
- 77.Краковский, Ю.М. Алгоритмическое и программное обеспечение для оценки остаточного ресурса оборудования //Контроль. Диагностика. – 2001. – №2. С. 24-27.
- 78.Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: Учеб.для вузов. 8-е изд., стереотип. М.: Высшая школа, 2002. 575 с.
- 79.ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
- 80.Айвазян, С. А.;Енюков, И. С.;Мешалкин, Л. Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
- 81.Методические указания по проведению диагностических измерений параметров механических колебаний горно-шахтного оборудования. Кемерово. КузГТУ-СУЭК. – 2011. – 49 с.
- 82.ГОСТ ИСО 10816-1-97. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования.
- 83.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.
- 84.ГОСТ 20815-93 (МЭК 34-14-82). Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения.
- 85.ГОСТ 16921-83. Машины электрические вращающиеся. Допустимая вибрация.
- 86.ИСО 2373. Механическая вибрация вращающихся электрических машин с высотой вала 80-400 мм. Измерение и оценка интенсивности вибрации.

87. РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов, приложение 4.10 «Предельно допустимое значение вибрации редукторов».
88. Профилактическое обслуживание оборудования с применением виброанализа. – СИ. – 1990. – 252 с.
89. Диагностика горных машин и оборудования./ Б. Л. Герике, П. Б. Герике, В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, А. А. Хорешок.// М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. – 400 с.
90. Опыт эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия (на примере шахт ОАО «СУЭК-Кузбасс»./ В.И. Нестеров, А.А. Хорешок, Б.Л. Герике, В.В. Кузнецов, Ю.В. Дрозденко, С.Г. Мухортиков.// Горная техника. Вып. 1 (9), 2012. С. 20 – 23.
91. Методические указания по проведению диагностических измерений параметров методом эмиссионного спектрального анализа масла горношахтного оборудования. Кемерово. КузГТУ-СУЭК. – 2011. – 17 с.
92. ГОСТ Р 8.563-96. Методики выполнения измерений.
93. ГОСТ 8.315-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
94. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
95. Диагностика технического состояния редукторов проходческого комбайна СМ-130К по результатам анализа работающего масла. /Ковалев В. А., Хорешок А. А, Герике Б. Л., Мухортиков С. Г..// Вестник КузГТУ. Вып. 6, 2013. С. 20 – 23.
96. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла./ А. И. Соколов, Н. Т. Тищенко, В. А. Аметов.// Томск: Изд-во Томского университета, 1991. – 200с.
97. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Ключева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.

- 98.Кравченко, В. М.; Сидоров, В. А.;Буцукин, В. В.Классификация повреждений зубчатых передач.// Горное оборудование и электромеханика. - № 7, 2012. – С. 41-43.
- 99.Герике, Б. Л.; Хорешок, А. А.; Мухортиков, С. Г.Техническая диагностика проходческих комбайнов избирательного действия.// Безопасность и живучесть технических систем: Труды IV Всероссийской конференции. В 2 томах. Т. 2 – Красноярск: Институт физики им. Кипренского, 2012 – С. 54-58.
- 100.Герике, Б. Л.;Хорешок, А. А.; Мухортиков, С. Г.Опыт эксплуатации и оценка технического состояния проходческого комбайна избирательного действия по параметрам механических колебаний.// Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: Промышленная безопасность и охрана труда. – М. – изд-во «Горная книга». – 2012. - №ОВ 6. – С. 7 – 20.
- 101.Повышение эффективности эксплуатации буровой техники на горных предприятиях: монография / А.В. Гилев и [и др.]. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 372 с.