

**Министерство транспорта Украины  
Харьковская государственная академия железнодорожного  
транспорта**

На правах рукописи

**Линьков Виктор Васильевич**

УДК 629.423.004.5:625.42

**Совершенствование технологии обслуживания и  
диагностирования оборудования вагонов метрополитена**

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
Доктор технических наук,  
профессор, академик ТАСУ  
Тартаковский Эдуард Давидович

**Харьков -1999**

## СОДЕРЖАНИЕ



### Раздел 1 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВАГОНОВ

МЕТРОПОЛИТЕНА .....	10
1.1. Система ТО и ТР вагонов метрополитена.....	10
1.2. Ремонтпригодность вагонов метрополитена. ....	15
1.1. Организация материально-технического снабжения ^рыновского метрополитена .....	18
1.4. Анализ факторов, влияющих на нормирование расхода материалов и запасных частей .....	21
1.5. Назначение и состав ЗИП. ....	22
1.6. Анализ построения и функции систем ТО и ТР метрополитенов.....	24
1.7. Анализ технического состояния подвижного состава Харьковского метрополитена.....	32

### Раздел 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ НА

СОСТАВА МЕТТОПОЛИТЕНА .....	37
2.1. Количественная оценка надежности вагонов метрополитена.....	37
2.2. Определение маршрутной технологии обслуживания и диагностирования .....	41
2.3. Моделирование запаса запасных частей для ПС метрополитена .....	45
2.4. Методика расчета элементов ЗИП.....	50
2.4.1.Определение ЗИП для ремонтируемых элементов...	50

2.4.2.Определение ЗИП для неремонтируемых элементов...	53
2.5. Формирование и методика оценки достаточности ЗИП для ПС метрополитена. ....	56
<b>Раздел 3 ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА .....</b>	<b>69</b>
3.1. Количественная оценка запасных элементов при эксплуатации подвижного состава метрополитена .....	€9
3.2.Определение диагностических весов признаков и диагностической ценности обследования ПС метрополитена	76
3.3.Расчет ЗИП для подвижного состава метрополитена....	83
3.4.Расчет достаточности ЗИП для ПС метрополитена. ....	86
<b>Раздел 4 ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИГОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ....</b>	<b>104</b>
4.1. Специфика виброакустического диагностирования подшипников тяговых двигателей ДК-116 .....	104
4.2. Первичные преобразователи сигналов .....	ПО
4.3. Соптасующие устройства.....	112
4.4. Регистраторы сигналов .....	113
4.4.1. Вибрационный блок ЧМзаписи/воспроизведения ZM0060 .....	113
4.4.2. Измерительный магнитофон 7005 фирмы «Брюль и Кьер».....	114
4.5. Хфактерные диагностические признаки подшипников КЁНСНИЯ.....	115
<b>ШЗДтпЕ</b>	
4.5.1. Статистические методы контроля .....	116
4.6. Вибрационные исследования подшипников 310 тяговых электро д вигателей ДК-116 .....	121

4.6.1. Расчетные диагностические признаки разрушения подшипников .....	121
4.6.2. Диагностические признаки разрушения подшипников в низкочастотном спектре виброскорости....	122
<b>Раздел 5 ОРГАН®АІДІОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ВНЕДРЕНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО И</b>	
<b>ПОДВИЖНОГО СОСТАВА. ....</b>	<b>129</b>
5.1. Организация работы передвижной станции обслуживания и диагностирования.....	129
5.2. Диагностирование ПС метрополитена, .....	134
5.2.1. Электронный стетоскоп .....	134
5.2.2. Устройство для визуального диагностирования .....	137
5.2.3. Переносные приборы частичного излучения типа «СМОТРИЧ» .....	138
5.2.4. Тейбор для оценки скоростных характеристик ТЭД.	140
5.2.5. Индикатор дефектов подшипников электрических машин .....	142
5.3. Оценка экономической эффективности внедрения новой технологии обслуживания .....	143
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>146</b>
<b>СПИСОК 14 СПОЛБЮВАІЗЫІХІСГОЧЕІІКОВ .....</b>	<b>148</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>158</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Метрополитен, как особый вид городского транспорта, является важной составляющей пассажирских перевозок и его нормальная работа во многом зависит от четкого и слаженного функционирования системы обслуживания и ремонта

В условиях разрыва экономических связей между бывшими республиками СССР метрополитен оказался в очень сложном положении. Около 50% парка ^зковского метрополитена составляют вагоны серии Б и их модификаций, возраст которых превышает 20 лет. Остальную часть парка составляют вагоны серии 81-717 (81-714) постройки 70-80 годов. Положение усугубляется отсутствием материально-технической базы метрополитена, позволяющей осуществлять мероприятия, направленные на обеспечение нормальной работоспособности подвижного состава (ПС).

Проведенные ранее научные исследования [64] неоспоримо доказывают, что бесперебойная работа ПС метрополитена во многом зависит от надежности оборудования вагонов, которое поддерживается системой птивно-предупредительных ремонтов. Она включает в себя комплекс взаимосвязанных положений и норм, определяющих организацию и порядок проведения работ по поддержанию и восстановлению работоспособности ПС. Периодичность ремонтов разных видов, их номенклатура, объем, и порядок чередования определяют, в конечном итоге, структуру ремонтного цикла. Поэтому в условиях старения парка и ухудшения его технического состояния, финансовых затруднений и отсутствия централизованного снабжения запасными частями возникает как самостоятельная задача совершенствование технологии обслуживания и диагностирования оборудования вагонов метрополитена те. направление исследований, обеспечивающее

повышение эксплуатационной надежности при сокращении затрат на ремонты, замену запасных частей и их своевременную доставку

#### **Актуальность темы.**

Обеспечение массовых перевозок пассажиров при высокой интенсивности движения поездов метрополитена вызывает повышенные требования по соблюдению безопасности и надежности оборудования вагонов.

Постановлением Кабинета Министров Украины №769 от 2.06.98г утверждена государственная программа развития ПС социального назначения для железнодорожного транспорта и городского хозяйства, которая предусматривает комплекс научно-исследовательских и конструкторских разработок, включая разработку и внедрение новых технологий обслуживания, и ремонт вагонов метрополитена

Исходя из этого, в данной работе предлагается новая технология обслуживания оборудования вагонов метрополитена, которая базируется на применении средств и методов диагностирования, а также научно-обоснованном обеспечении запасными частями.

#### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа является частью направлений исследований, проводимых ХГАЖТ в соответствие с программами и концепциями развития систем диагностирования в локомотивном хозяйстве железных дорог и подвижном составе метрополитенов Украины.

#### **Цель и задачи исследования.**

Целью данной работы является разработка прогрессивной технологии обслуживания оборудования вагонов метрополитена, для достижения которой необходимо:

- проведение анализа системы содержания и эксплуатации ПС с учетом факторов, влияющих на нормирование расхода запасных частей;

- разработка методики количественной оценки надежности вагонов метрополитена, характеризующей их готовность в эксплуатации;

анализ технического состояния оборудования вагонов метрополитена и определение узлов, лимитирующих безотказность и ремонтпригодность;

обзор мирового опыта информатизации технического обслуживания, ремонта, диагностирования и организации материально-технического обеспечения ПС метрополитена;

- разработка методики и проведение расчетов диагностической ценности информации о состоянии оборудования вагонов метрополитена;

- проведение расчетного исследования количества лимитирующих запасных частей для вагонов метрополитена с оценкой их достаточности;

- проведение экспериментального исследования по определению виброакустических характеристик оборудования и виброактивности смазок;

- реализацию новой технологии обслуживания и диагностирования на ^Харьковском метрополитене с применением передвижной станции и переносных портативных устройств;

- проведение опытной эксплуатации и апробация новой технологии с ее технико-экономической оценкой.

### **Научная новизна полученных результатов.**

Обоснована необходимость определения технического состояния оборудования вагонов метрополитена на основании диагностической ценности информации, которая положена в основу расчетов запасных частей и приспособлений (ЗИП). Получены номограммы определения ЗИП для разных наработок ГС, оценена достаточность запаса запасных частей парка. Получены значения браковочных виброакустических спектров

частот подшипников тяговых двигателей, эталонные величины которых использованы при диагностировании этих узлов в эксплуатации.

### **Практическое значение полученных результатов.**

Решена задача совершенствования технологии обслуживания оборудования вагонов метрополитена, которая базируется на применении новой организации диагностического и материально-технического обеспечения. Результаты работы внедрены на Харьковском метрополитене при проведении обслуживания ПС по новой технологии и включают в себя:

- организацию работы передвижной станции обслуживания и диагностирования на базе легкового автомобиля «Газель»;

- внедрением в технологические процессы технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) переносных портативных диагностических устройств на базе волоконно-оптических преобразователей, пирометров и виброиндикаторов контроля состояния подшипников.

### **Личный вклад соискателя.**

В трудах [59,61,62] диссертантом сформулированы основные критерии и требования к формированию запаса ЗИП, количественной оценке надежности ПС и сделаны предложения по применению передвижных мастерских на метрополитене. В труде, опубликованном в соавторстве [60], автору принадлежит постановка задачи и обоснование методики экспертных оценок для усовершенствования технологии ТО и ТР ПС метрополитена

### **Апробация результатов диссертации.**

Основные положения диссертации докладывались на:

- VII Международной научно-технической конференции, «Проблемы развития рельсового транспорта» (Крым, Ливадия, 1997 г);

- VIII Международной научно-технической конференции « Проблемы развития рельсового транспорта» (Крым, Алушта, 1998г);
- заседании научно-технической комиссии по развитию систем диагностики в локомотивном хозяйстве, Харьков, 1998г;
- Научно-технических конференциях кафедр ХГАЖТ и работников предприятий железнодорожного транспорта, 1994 - 1998гг

Полностью диссертационная работа докладывалась на расширенном заседании кафедры ЭРПС ХГАЖТ (1999 г.).

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы в изданиях, утвержденных ВАК Украины

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

#### 1.1. Система ТО и ТР вагонов метрополитена

Система ТО и ТР вагонов метрополитена базируется на планово-предупредительном принципе. Совершенствование системы ремонта происходило и происходит, в основном, за счет изменения цикличности и периодичности обслуживания и ремонтов, не затрагивая по существу технологию технических обслуживания. Вместе с тем, в последние годы в научноисследовательских организациях, транспортных вузах и на предприятиях выполнен ряд исследований, направленных на повышение надежности ГС метрополитена за счет совершенствования системы ремонта. Значительный интерес для решения вопросов рационализации сроков эксплуатации ПЗ между ремонтами и измерителя наработки для определения ресурса представляют исследования, выполненные в МИИГе под руководством проф. ИП №аева [34]. При этом получен важный вывод о возможности использования для измерителя наработки ряда эксплуатационных показателей. Большой вклад в дифференцировании межремонтных пробегов внесли работы МДРахмагулина, КИ Домбровского, АБ.Подшивалова и МИПобедина [71]. Исследования, проведенные под руководством проф. НАМалоземова в РИИЖТе, показали, что знание фактических величин безотказности и долговечности является необходимым условием для правильного определения величин межремонтных пробегов. Однако проведенный анализ технического состояния парка показывает, что жесткие нормативы времени работы или пробега дают приближенное представление о работоспособности ПС метрополитена

Система текущего ремонта, как было обосновано ИБГерцбахом и др. авторами, будет наиболее эффективной, если ремонт предсказывается по измерительным и статистическим протезирующим параметрам [14]. Получение таких данных является одной из основных задач научного обоснования технического обслуживания. В этом плане значительный вклад представляют исследования ОМИИГа, выполнение под руководством проф. Е.С.Павловича и В.А.Четвергова [9,73]. В них рассмотрены теоретические и прикладные вопросы анализа, надежности и оптимизации длительности работы тепловозов между плановыми ремонтами по минимуму удельных суммарных затрат на ремонты. Кроме того, проф. В.А.Четверговым обоснованы принципы и модели, которые должны положиться в основу методов оптимизации надежности и системы ремонта тепловозов [17]. Данные исследования базировались, как правило, на обеспечении заданной вероятности безотказной работы и сокращении внезапных отказов оборудования без учета использования энергетических установок тепловозов. Первая работа по оптимизации энергетических установок тепловозов, на основе параметрической надежности, выполнена проф. В.В.Стрекопытовым, который произвел классификацию причин параметрических отказов, обосновал методы оценки и исследования параметрической надежности энергетических установок, методов разработки и адаптации систем автоматического регулирования [85].

В.В.Стрекопытовым было доказано, что увеличение эффективности тепловозов может быть достигнуто лучшим использованием их энергетических установок. На повышение надежности и топливной экономичности тепловозов направлен ряд исследований по разработке и внедрению методов и средств технической диагностики. К ним относятся работы, выполняемые под руководством; в МИИГе проф. В.Д.Кузмича [48], в ЛИИЖТе проф. В.В.Стрекопыгова [85], в ОМИИГе проф. В.А.Четвергова

[17], во ВНИИЖТе проф. ЕЕКЪссова [45], в ХИИГе проф. Э.ДТартаковского [87,88,89], в ДИИГе проф. Т.Ф.Кузнецова [54].

Большой вклад в решение проблемы внесли работы РИИЖТа, МИИТа, ОМИИГа и др. по метрологическому обеспечению средств диагностики [71]. Ряд исследований и внедрение методов диагностики выполняется непосредственно на гфедгриятиях транспорта. Анализ показывает; что основные работы направляются на создание средств диагностики без достаточного обоснования роли и места диагностики в системе технического обслуживания, корректировки технологических процессов обслуживания, увязки с организацией техобслуживания и созданием нормативно-технической документации. Это, в свою очередь, требует проведения отдельных разработок по корректировке и обоснованию технологии техобслуживания.

При этом следует учитывать накопленный опыт эксплуатации авиационного и автомобильного транспорта, сельскохозяйственной и дорожной техники в нашей стране и за рубежом. Среди этих работ; имеющих теоретическое и народнохозяйственное значение, можно в первую очередь выделить исследования, проводимые под руководством проф. ЕС.Кузнецова, АЯ. Говорущенко, МММихлина, НС.Ждановсюого и др.

совершенствования тактики управления технологическим состоянием машин на базе современного контрольно-диагностического оборудования, создания станции диагностики, математических моделей старения машин. Причем диагностика не должна «приспосабливаться» к существующей организации техобслуживания. Б^жны неучно-обоснованные разработки по корректировке технологии обслуживания применением современных

В последнее время для определения состояния трущихся деталей  
тепловозов

Статистические свойства шума сохраняются постоянными до тех пор, пока в процессе его работы не произойдут существенные изменения, т. е. шум - это стационарный процесс, статистически однородный по времени. Поэтому большинство динамических процедур включает в себя операцию статистической обработки сигнала и при диагностическом анализе, чаще всего оперируют не параметрами самого сигнала, а параметрами его статистических характеристик. Из устойчивых параметров шума наиболее известна его акустическая мощность в децибелах или ваттах, которая стабильна и меняется только при изменении состояния узла или условий, в которых он работает. Но использовать мощность шума как характеристику технического состояния узла чаще всего не удается, так как эта величина появляется только при значительном ухудшении технического состояния

Вместо с определением технического состояния узла по его статистическим характеристикам необходимо это состояние связывать непосредственно с уровнем вибрации, а так как для всего узла в целом такую связь установить невозможно, то с уровнем вибраций связывают техническое состояние его отдельных деталей.

По мере изнашивания механизмов или при возникновении в них каких-либо дефектов нарушаются запроектированные кинематические связи между деталями, вследствие чего характер шума и вибрации изменяется. Это свойство используется для оценки технического состояния объектов по параметрам шума и вибрации.

Для частотного разделения сигналов необходимо знать частоту или период следования каждого из них. Частоты следования импульсов от соударений различных элементов, как правило, отличаются друг от друга.

Разложение сложного колебания на его составляющие называют спектральным разложением или спектральным анализом. Сущность его заключается в том, чтобы из общего колебательного процесса, порождаемого всеми элементами системы, поочередно выделяются полосы

спектров колебаний с последующим определением энергии вибрации в каждой выделенной полосе. Разложение сложного колебания на составляющие производится с помощью спектральной электронной аппаратуры- анализатора спектра

В качестве приемников вибрации обычно используют пьезоэлектрические датчики ускорений, преобразующие механические колебания элементов системы в электрические сигналы. В этих датчиках преобразование неэлектрической энергии в электрическую основано на появлении электрических зарядов на гранях некоторых кристаллических тел при воздействии на них механических сил [4].

Временное разделение сигналов называют стробированием. Стробатор - прибор, пропускающий через себя сигналы только в определенные промежутки времени. Сигналы, идущие вне этих промежутков, подавляются. При временном разделении сигналов полезный сигнал с датчика ускорения вибрации подается на усилитель, откуда после усиления поступает стробатор, а затем в регистрирующее устройство. Стробатор обеспечивает подключение усилителя к регистрирующему устройству в определенные моменты времени, определяемые относительно какого-либо опорного события, происходящего в механизме (например, относительно момента достижения поршнем верхней мертвой точки). Так как после каждого соударения деталей возбуждаются упругие колебания, которые в большинстве случаев не успевают затухать до нового соударения, то сигналы накладываются, друг на друга во времени, и стробатор не может их разделить. Тем не менее, он позволяет существенно повысить долю энергии полезного сигнала данной кинематической пары

Оценивать техническое состояние отдельных элементов по вибрационным характеристикам можно при помощи целого комплекса электронных приборов, соединенных в общую схему. В качестве примера на рис. 1.1 показан один из наиболее простых элементов электронных приборов

для спектрального анализа вибрации. Механические колебания, воспринимаемые датчиком ускорений  $D$ , преобразуются в электрический сигнал, который усиливается усилителем и поступает на вход анализатора. Анализатором поочередно выделяются гармоники (составляющие) колебаний в исследуемой полосе частот и в виде напряжения, получаемого на выходе, подаются на вход квадратора, который на выходе дает значение энергии (квадрата напряжения) выделенной полосы спектра.

Объект измерения  
контроля  $D$  тель

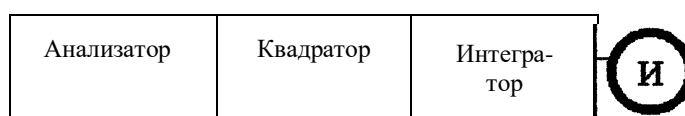


Рисунок 1.1

Сигнал от квадратора подается на вход интегратора, его на выходе средняя мощность вибрации исследуемого диапазона частот за определенный промежуток времени. Эта мощность определяется по шкале индикатора  $I$ . При подключении к выходу усилителя электронно-лучевого осциллографа можно визуально наблюдать и контролировать колебательный процесс.

## 1.2. Ремонтопригодность вагонов метрополитена

Анализ надежности вагонов метрополитена, выполненный ВНИИЖТом показывает; что по вагону в целом велики трудозатраты на неплановые восстановительные ремонты, которые составляют более 10% от плановых [64]. По системам наименее надежно работает электрооборудование, требующее дополнительных затрат труда до 20% плановых. Наиболее слабым звеном является тяговый двигатель, на который расходуется дополнительно до 50% плановых затрат. Остальные крупные аппараты требуют до 15% дополнительных затрат. Очень много трудозатрат приходится на электрическую аппаратуру, что свидетельствует о

необходимости улучшения ее конструкции, повышения надежности и применения диагностики. Очень слабое звено в конструкции вагона - карданная муфта, требующая на проведение восстановительных неплановых работ 50% объема плановых затрат. Ненадежно работает мотор-компрессор, плановые и неплановые затраты на ремонт которого соизмеримы

При анализе объединенной уцельной трудоемкости ТО и ТР и удельной суммарной трудоемкости восстановления для вагона в целом отмечено, что годовые трудозатраты на техническое обслуживание и ремонт вагона составляет 20% трудозатрат на его изготовление. Это означает, что через 5 лет вагон как бы строится заново. Еще более неблагоприятен этот показатель по электрооборудованию, где годовые затраты на ТО и ТР составляют 50% трудозатрат на изготовление, что свидетельствует о ее низком конструктивном техническом уровне.

Большие трудовые затраты на содержание кузова обусловлены применением углеродистых сталей, требующих шпаклевки, окраски, а в эксплуатации постоянного их восстановления; быстрым износом покрытием стен и пола пассажирского салона; применением кондуктной схемы раскладки проводов; несовершенством системы освещения и т.д.

Еъюкий уровень трудозатрат при обслуживании колесных пар в сравнении с изготовлением объясняется тем, что при полном освидетельствовании они фактически собираются заново.

По пневматическому оборудованию следует отметить большую трудоемкость содержания мотор-компрессора, у которого трудозатраты на ремонт за 4 года эксплуатации становятся равным трудозатратам на изготовление. У воздухорасфеделигеля трудозатраты на ремонт становятся равными трудозатратам на изготовление за 3 года, причем главной причиной этого является недостаточный ресурс резинотехнических изделий, определяющих частоту и объем ревизионных работ

Проводимая в настоящее время на заводах-изготовителях вагонов модернизация оборудования несколько улучшила электрозащиту, пожарную безопасность, а также ходовую часть. Однако наблюдения, выполненные ВНИИЖТом за выпускаемыми с 1981г вагонами показывают, что выполненная модернизация отдельных узлов не сказалась на повышении эксплуатационной надежности вагонов 81-717 и 81-714 в целом [93].

Модернизация коснулась в основном электрического оборудования, уровень надежности которого постоянно снижается. Это можно видеть на примере работы вагонов 81-717 и 81-714 в 1987-1988 гг. Количество отказов на 1 млн. км пробега этих вагонов, по данным лаборатории надежности и диагностики Московского метрополитена, составляет: по механическому оборудованию 33,57 в 1987 г и 34,48 в 1988г; по пневмооборудованию соответственно 5,59 и 4,48; по электрооборудованию 291,31 и 303,27.

По механическому оборудованию в два раза увеличился рост отказов колесных пар и рычажной тормозной передачи. В то же время резко сократилось число неисправностей буксового узла благодаря исключению из конструкции поводковой связи ремы тележки с колесной парой

По электрическому оборудованию в три раза увеличилось количество неисправностей по тяговым двигателям, реостатным контроллерам, заземляющим устройствам, токоприемникам, аппаратам электрозащиты, электроконтрактным коробкам автосцепки.

Если рассматривать работу оборудования вагонов 81-717 и 81-714 по категориям надежности, то безотказность не улучшилась, как это видно из приведенного примера, а трудоемкость обслуживания и ремонта не уменьшилась.

№ основании этого ВНИИЖТом сделаны выводы, что:

1 .Ремонтопригодность подвижного состава метрополитена определяется затратами труда, времени и средств на ремонтные работы. Поэтому в ней наиболее ярко проявляются требования к конструкции и

строгую эксплуатацию, включая технологию технических обслуживания и текущих ремонтов.

Из анализов и расчетов следует, что вагонам метрополитена, их системам, узлам и агрегатам приходится выполнять большой объем плановых и неплановых работ на ТО и ТР. При этом неплановые восстановительные работы ложатся серьезным экономическим бременем на предприятие, а при отсутствии должного материального обеспечения они наносят серьезный ущерб качеству ТО и ТР и создают предпосылки неустойчивой работы оборудования в эксплуатации.

### **1.3. Организация материально-технического снабжения Харьковского метрополитена**

Система материально-технического снабжения (МТС) железнодорожного транспорта создавалась с учетом особенностей работы железных дорог, специфических особенностей потребления некоторых материалов и изделий, многочисленности хозяйственных подразделений большого и сложного хозяйства. В отличие сложной и разнообразной техники, которой располагает железнодорожный транспорт; высокие требования, предъявляемые к обеспечению слаженной и бесперебойной работы всех его звеньев, требуют четкого, хорошо организованного, бесперебойного снабжения, производству новых запасных частей, капитальному ремонту железнодорожной техники. Важное место в МТС железных дорог занимают запасные части для подвижного состава, специальное оборудование, аппаратура сигнализации и связи, приборы и аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики [86].

Особое значение имеет МТС метрополитена, который основную часть запасных частей получает по импорту в основном из России. За последние годы объем поставки их значительно упал и, в связи с этим, органы МТС метрополитена на всех уровнях стремятся не только к поддержанию фондов, но и осуществляют контроль за рациональным и экономным

использованием запасных частей. Особое внимание уделяется правильному определению потребности в них, технически обоснованному нормированию расхода, корректировке действующих норм с учетом достижений науки и техники, передового опыта новаторов производства и тд

Структура службы МТС метрополитена состоит из: административно-управленческого персонала; отдела материалов, отдела оборудования; бухгалтерии; материального склада

В административно-управленческом персонале службы состоят: начальник службы; заместитель начальника службы; экономист службы; секретарь.

Отдел материалов состоит из: начальника отдела (инженера ведущего группу сантехники); инженера ведущего группу химикатов; инженера ведущего группу металлов; инженера ведущего группу строительных металлов; инженера ведущего группу спецодежды

Отдел оборудования состоит из: начальника отдела (инженера ведущего группу кабельной продукции, запчастей к подвижному составу и эскалаторам); инженера ведущего группу электрических изделий; инженера ведущего группу электроники, средств связи, средств СЦВ; инженера ведущего группу инструментов; двух инженеров по грузам послужившим из других государств.

Бухгалтерия состоит из главного бухгалтера и 3-х бухгалтеров.

Состав работников материального склада метрополитена состоит из: начальника склада и его заместителя; 4-х кладовщиков; 3-х приемосдатчиков; 2-х грузчиков.

Отделы материалов и оборудования выполняют следующие функции: получение, сведение и анализ заявок технических служб на материалы, и оборудование; выписка счетов под конкретные заявки; контроль отлиты, получения налоговых накладных, своевременной вывозки товара;

распределение полученного товара между службами (выписка расходных накладных на конкретную службу). В задачи решаемые бухгалтерией входят: оплата счетов; расчеты со службами метрополитена за поставленную продукцию; работа с налоговой инспекцией; учет материалов и оборудования.

Работники главного материального склада Харысовского метрополитена выполняют следующие задачи организацию своевременного вывоза товара по заявке инженера отдела; обеспечение его надлежащего хранения; выдана товара службам по предъявляемым расходным накладным.

Структуру управления всем метрополитеном характеризует высокая: степень централизации. Это объясняется тем, что дохода и большая часть эксплуатационных расходов формируются непосредственно на уровне линейных подразделений. Ейедреие вычислительной техники и автоматизированных систем управления, позволяющих лучше организовать сбор и обработку информации, является тенденцией ускорения этого процесса В то же время организационная структура служб метрополитена отличается явно выраженной функциональной направленностью. Они часто решают независимые задачи и имеют автономные звенья с отделами, работающими как самостоятельные подразделения при решении вопросов и взаимоотношениях с другими подразделениями.

Служба МТС метрополитена имеет 4 ПЭВМ. Из них три находится в бухгалтерии, а од на в отделе материалов.

ПЭВМ метрополитена имеют локальную сеть (WINIXWS 95) и выхода в глобальную сеть не имеет.

#### **1.4. Анализ факторов, влияющих на нормирование расхода материалов и запасных частей**

В процессе эксплуатации подвижного состава различные конструктивные элементы его изнашиваются, повреждаются и выходят из строя. Восстановление и замена их осуществляются путем периодического проведения технических осмотров и текущих ремонтов. Главной причиной выхода из строя узлов и деталей подвижного состава является их физический износ. При этом действует ряд факторов, влияющих на степень износа, повреждение деталей и, следовательно, на расход материалов и запасных частей для их восстановления и замены. Основными факторами являются: конструкция подвижного состава, конструктивные особенности его узлов и деталей, виды и количество материалов, из которых они изготовлены; условия и режимы работы; количество и технология ремонта подвижного состава; уровень технологического содержания, уход за состоянием узлов и деталей в процессе эксплуатации. Чем совершеннее конструкция узлов и агрегатов подвижного состава, тем меньше их износ и повреждение, и наоборот; наличие конструктивных недостатков, вызывает преждевременный выход из строя деталей и увеличивает расход материалов и запасных частей на их ремонт и замену.

Большое качество материалов, идущих на изготовление деталей подвижного состава, их термическая обработка и упрочнение рабочих поверхностей повышают износоустойчивость, удлиняют сроки службы этих деталей и сокращают расход новых материалов. Количество антикоррозионных покрытий и красок влияет на сохранность и сроки службы деталей подвижного состава.

Количество и вид материалов, расходуемых при ремонте, зависят от количества и вида материалов, входящих в конструкцию ремонтируемого подвижного состава. Большое количество ремонтных работ повышает надежность и устойчивость в эксплуатации различных узлов и деталей,

увеличивает их срок службы Рациональная технология разборки, очистки и обмывки, тщательный осмотр и отбраковка деталей и узлов, снимаемых при ремонте, повышают сохранность и увеличивают возможность их повторного использования, а также сокращают расход вспомогательных материалов. Все перечисленные факторы оказывают прямое влияние на сроки службы различных материалов и запасных частей. В свою очередь сроки службы определяют степень сменяемости, а, следовательно, и величину норм расхода материалов и запасных частей при ремонте и содержании подвижного состава В связи с этим анализ фактической долговечности различных узлов, деталей и материалов в процессе эксплуатации подвижного состава, а также определение нормативных расчетных сроков службы их имеют большое практическое значение.

### **1.5. Назначение и состав ЗИП**

Термин ЗИП в разное время и в различных работах расшифровывался по-разному.

- запасное имущество и принадлежности;
- запчасти, инструмент и принадлежности;
- запасное имущество и приборы

тфровывают по буквам, а используют в качестве самостоятельного понятия о каких-то запасах [55].

Под ЗИП будем понимать совокупность различных элементов и предметов, придаваемых определенному объекту для обеспечения его бесперебойной технической эксплуатации и ремонта Другими словами, элементы ЗИП предназначаются для нам узлов в эксплуатации, профилактической замены элементов по мере выработки ими своего ресурса, а также для целей выполнения планового ремонта

В общем случае в состав ЗИП могут входить следующие группы элементов и предметов:

- запасные части,
- инструмент,
- приспособления,
- специальное технологическое оборудование для проведения ремонта;
- гонтрольно-измерительню приборы;
- принадлежности для ухода за объектом,
- эксплуатационная техническая документация на предметы ЗИП,
- средства укладки и упаковки ЗИП

В зависимости от вида ЗИП в его составе могут быть перечисленные группы предметов в различных сочетаниях, причем запасные части входят в обязательном порядке в любой вид ЗИП [76].

К запасным частям относятся элементы, взаимозаменяемые с соответствующими съемными элементами рабочей комплекта объекта (блоки, съемные панели, узлы, электровакуумные и полупроводниковые приборы, отдельные агрегаты и детали)

Запасные части можно классифицировать по четырем признакам:

- по назвнению (для внезапной или профилактической замены),
- по безотказности в режиме хранения (зависят или не зависят показатели безотказности при хранении элементов ЗИП от срока их хранения);
- по ремонтпригодности (восстанавливаемые или невосстанавливаемые элементы ЗИП);
- по сохраняемости (элементы ЗИП ограниченного или неограниченного срока годности при их хранении)

Запасные части для внезапной замены должны храниться в составе одиночного комплекта ЗИП в целях быстрого восстановления объектов, в которых обнаружены отказы и повреждения.

Иногда необходимость профилактической замены элементов возникает либо по истечении устанавливаемого срока допустимой эксплуатации отдельных элементов вне зависимости от их фактического состояния, либо по результатам контроля технического состояния элементов. Поэтому ЗИП для профилактической замены целесообразно хранить в групповом комплекте ЗИП

По безотказности в режиме хранения запасные части могут, как зависеть от срока хранения, так, практически, и не зависеть от него. В первом случае число отказов при хранении будет определяться календарной продолжительностью хранения.

Восстанавливаемые запасные части подлежат ремонту и возврату в состав ЗИП, а невосстанавливаемую после их замены списываются.

Сохраняемость ЗИП характеризуется степенью влияния условий хранения и транспортирования на безотказность и долговечность последующего их функционирования в рабочем режиме. Одним из показателей сохраняемости является средний срок сохраняемости (годности) при хранении, назначаемый предприятиями промышленности. Запрещается применять элементы с истекшим сроком сохраняемости, так как из-за возможных недопустимо больших изменений их физико-химической структуры может произойти резкое ухудшение надежности в рабочем режиме.

#### **1.6. Анализ построения и функции систем ТО и ТР метрополитенов**

Две трети затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт объектов железнодорожного хозяйства приходится, как правило, на подвижной состав и путь. Любое снижение этих затрат может оказать существенное положительное влияние на общую экономическую ситуацию. В то же время технологические отказы из-за неудовлетворительной

организации ТО и ТР способны привести к серьезным осложнениям и эксплуатации, которые могут причинить ущерб, намного превышающий достигнутую экономию [28,88].

При разработке новой политики ТО и ТР для лондонского метрополитена компания Cambridge Consultants применила информационно-технологический подход с помощью которого можно создать систему, позволяющую контролировать расхода на обслуживание и ремонт; повысить степень готовности оборудования к эксплуатации и руководить ТО и ТР на основе информации в реальном масштабе времени.

Существующие системы ТО и ТР подразделяются на три категории, хронологически соответствующие их первому, второму и третьему поколениям [83]. В системах первого поколения просто предусмотрен ремонт при отказе оборудования. Основой систем второго поколения являются регулярные планово-предупредительные осмотры и ремонты как способ снижения частоты отказов, что нередко связано с избыточными затратами, поскольку, например, проводимые в определенное время ремонты могут быть и не сопряжены с действительной в них необходимостью. В системах третьего поколения используются некоторые формы мониторинга технического состояния оборудования в целях прогнозирования ожидаемых отказов. Это позволяет проводить ремонты до фактического проявления отказов, сводя к минимуму длительность отвлечения оборудования от эксплуатации. При условии, что капиталовложения и технические средства диагностики для мониторинга оправданы, их применение может дать значительную экономию эксплуатационных расходов. На схеме системы нового, четвертого, поколения (рис. 1.2) показаны разнообразные причины возникновения неисправностей подвижного состава, которые могут привести к потерям доходов от эксплуатации, и возможные пути снижения числа или тяжести отказов, характерные для систем этого поколения.

Дорогостоящие решения, которые обеспечиваю; например, наличие в обращении необходимого числа поездов, связаны с увеличением численности парка подвижного состава или капитальными вложениями в новый, более надежный подвижной состав. Более дешевые решения предусматривают внедрение пересмотренной стратегии обеспечения надежности при меньшей численности парка. Эти методы показаны в центральной части схемы (увеличение численности ремонтного персонала для ускорения оборота транспортных средств и объема складских запасов для гарантированного наличия необходимых запасных частей, совершенствование планирования и управления ТО и ТР и создание таких условий, при которых неисправности появляются только в тех случаях, когда неэффективно работают другие службы).

Обновление подвижного состава линии Central лондонского метрополитена сопровождалось сведением численности парка к минимуму, обеспечивающему нормальную работу в периоды пикового пассажиропотока, плюс некоторый запас полусекций для замещения отставляемых в плановый капитальный ремонт и на техническое обслуживание. Это требует готовности парка подвижного состава к эксплуатации на уровне 98 %, что выше, чем на других линиях. Новая система дает возможность достижения этой цели путем совершенствования управления ТО и ТР и поддержания подвижного состава в работоспособном состоянии за счет устранения непредвиденных неисправностей.

№ линии Central система ТО и ТР четвертого поколения состоит из трех основных составляющих, объединенных открытой компьютерной сетью с образованием системы поддержки ТО и ТР (MSS):

- информационно-управляющая система (MIS) для оценки поведения подвижного состава в эксплуатации на основе базы данных о случившихся



Рисунок 1.2- Система ТО и ТР Лондонского метрополитена

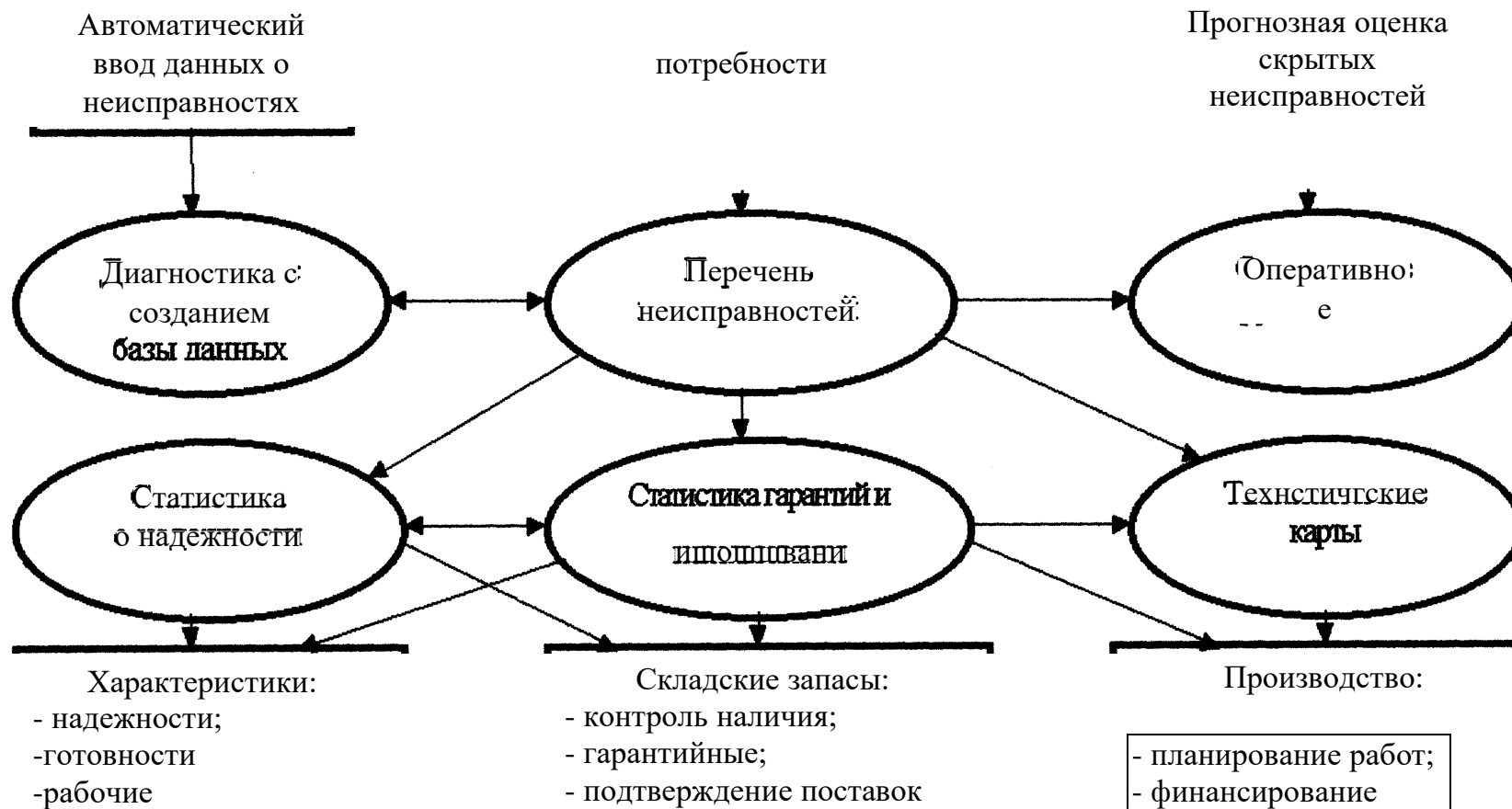


Рисунок 1.3- Система поддержки ТО и ТР подвижного состава метрополитена

- модель непрерывного прогнозирования для упреждающего ВЫЯВЛЕНИЯ возможных неисправностей;

- экспертная система комплексной технической диагностики.

Структура MSS показана на рисунке 1.3.

Гь прибытии поезд а в депо собирается и обрабатывается вся информация о его состоянии для составления перечня неисправностей. В дополнение к обнаруженным при осмотре дефектам и уже намеченным для данного захода в депо работам бортовой компьютер поезда выдает достаточный объем данных для прогнозной оценки в MSS скрытых неисправностей, относящихся, например, к состоянию механизмов открывания дверей или тяговых двигателей Эта информация может быть передана с поездного компьютера по деповской модифицированной линии передачи данных, по кабелю, с помощью подключаемого портативного компьютера или введена вручную.

Когда перечень неисправностей определен, систему MSS можно использовать для запроса в оперативном руководстве сведений по устранению простейших неисправностей или в базе данных экспертной диагностики сведений по более сложным неисправностям. После определения мер по устранению неисправностей составляют график проведения ремонтных работ и приступают к их выполнению.

В случае отсутствия инструментов или запасных частей для выполнения каких-либо из наметенных работ MSS констатирует невыполнение и отмечает необходимость их выполнения при первой же возможности. Если выявлена неисправность, характерная для одной группы конструктивных элементов, можно принять решение о выборочном ремонте только тех единиц подвижного состава, где такие элементы есть, оставив другие в эксплуатации

В системе MSS доступны еще две группы статистических данных, касающихся гарантий и использования, а также надежности. Все это

предоставляет в распоряжение руководства ремонтного предприятия информацию в реальном масштабе времени о поведении подвижного состава в эксплуатации и его надежности. Можно также отслеживать соответствие оборудования, находящегося на гарантии, предъявляемым требованиям. Лондонский метрополитен собирается использовать эти данные для проверки ответственности поставщиков подвижного состава по своим обязательствам, а логическим продолжением этого будет гарантия, что, когда ежедневное обслуживание поездов передано по контракту подрядной организации, оговоренные в контракте уровни готовности к эксплуатации будут соблюдены. Каждое из трех депо линии Central лондонского метрополитена имеет собственную местную информационную сеть с портами для приема информации от поездных бортовых компьютеров по каналам передачи данных или с помощью портативного компьютера. Терминалы на рабочих местах деповского персонала подключены к этой местной сети, а с помощью файл-сервера PC <486 обеспечивается связь по системе Ethernet с другими депо и базой данных технической диагностики, хранящейся в отдельном персональном компьютере.

Такая открытость системы обеспечивает ее максимальную гибкость для дальнейшего развития и эффективную связь для обмена информацией между разными депо. В распоряжение персонала депо предоставлены 12 основных экранных меню (форм), которые могут быть выбраны с помощью MIS. Пять из них относятся к наиболее часто используемым функциям:

- общая сводка неисправностей по каждому составу,
- детальный перечень неисправностей по каждому составу,
- оперативное руководство по ремонту с устранением наиболее характерных неисправностей,
- программа работ с привязкой ремонтных работ к конкретным неисправностям;

- каталогизированный перечень выбранных работ с распечаткой необходимых технологических карт

Кроме того, имеются формы по следующим функциям:

- диагностика (выявление основных причин неисправностей);
- ручной ввод в поездной компьютер сведений о ранее неизвестных неисправностях;
- просмотр и обновление перечня конструктивных элементов и информация о гарантиях;
- статистический анализ надежности;
- комплектование поездов (распределение имеющегося парка подвижного состава по составам поездов);
- маневровый трафик (перемещение подвижного состава в пределах депо);
- вагоны в отстое (просмотр и обновление перечня единиц подвижного состава, находящегося во временном отвлечении от эксплуатации).

Открытая структура программного обеспечения систем ТО и ТР четвертого поколения дает возможность применять их во многих областях железнодорожного хозяйства, а также объединять с другими компьютеризированными системами. Применительно к разработанной системе ТО и ТР недвижимого состава ее логическим развитием представляется распространение на управление деповским складским хозяйством с созданием объединенной базы данных, что позволит депо хранить только действительно нужное количество требуемых запасных частей. Большую пользу персоналу депо принесет также расширение возможностей по въезде дополнительной графической документации.

Использование при этом логистической стратегии может дать существенный экономический эффект за счет оптимального распределения складских запасов и ремонтных операций между несколькими депо с

автоматическим направлением подвижного состава в ремонт в наиболее подходящее депо. Внедрение более производительных средств учета позволит контролировать стоимость приобретения, содержания технических средств и (на железных дорогах, осуществляющих несколько видов деятельности) относить эти затраты на соответствующие службы. Сочетание системы управления материальным хозяйством с системой штрихового кодирования запасных частей снизит трудоемкость конторских работ.

#### 1.7. Анализ технического состояния подвижного состава Харьковского метрополитена

№ 3-х линиях метрополитена эксплуатируется три модификации вагонов. № них серии ЕЖ-3 -47%; 81-717, 81-714-30,3%; 81-718,81-719-22,7%. Сред несуточный пробег вагонов в процессе перевозок колеблется по годам на разных линиях и наименьший на Алексеевской (270-315 км ).№ метрополитене ведется учет отказов в эксплуатации и замен узлов и деталей, определяется количество неисправных вагонов и суммарное время простоя. За последние годы общее количество неисправных вагонов составляло 80-90 при простое 20-30 тыс. часов в под. Вместе с тем, по общим д анным затруднительно оценивать техническое состояние отдельных поездов и вагонов. Очевидно, необходима разработка методики и показателей, оценивающих безотказность и ремонтпригодность подвижного состава метрополитена

Количество массовых отказов в отдельные годы достигало 200 случаев на 1 млн. км пробега, причем по электрическому оборудованию до 85, механическому до 80, пневматическому до 22 случаев на 1 млн. км Пробега Наибольшее количество отказов по тяговым двигателям составляют неисправности коллекторно-щеточного узла; по кулачковым контакторам- износы, изломы, обрывы и распайка шунтов; по

серводвигателям- пробой изоляции обмотки якоря. Гб механическому оборудованию наибольшее число отказов приходится на рамы тележки, колесные пары, карданные муфты Гб пневматическому оборудованию основным являются дефекты резино-технических изделий и излом металлической рамы редуктора № 348. Основные мероприятия, внедряемые на Харьковском метрополитене по повышению надежности оборудования ПС связаны с повышением долговечности рам тележек, модернизации и продления срока службы вагонов, изготовление технологической оснастки и освоении производства отдельных запчастей. Проводятся также работы по внедрению комплекса стандов диагностики электрического оборудования «Импульс» вагонов. Однако мероприятия, связанные с совершенствованием технологии технического обслуживания, повышением оперативности снабжения, улучшением качества информации о каждой единице подвижного состава проводятся незначительно, и они не носят системный характер. Это вызывает необходимость методического объединения различных мероприятий и разработки научного обоснования. При этом нужно изучить опыт других метрополитенов, проанализировать научно-исследовательские работы в смежных отраслях транспорта, наметить конкретные мероприятия для внедрения. Поскольку замена тяговых двигателей является одним из отказов, лимитирующих надежность подвижного состава в эксплуатации, рассмотрим более детально количественную оценку надежности ТЭД за 1998 г по сравнению с 1997 г по данным технического анализа Харьковского метрополитена

Как видно из данных таблицы 11 наибольшее количество отказов тяговых двигателей ДК-116 на 1 млн. км. пробега наблюдалось по выработке коллектора; нарушению коммутации; трещинам и изломам пальцев, щеток. Указанные виды отказов могут приводить к пробое изоляции, перебросам тока, разбандажировке, перегреву и полному выходу двигателя из строя. Вместе с этим, длительные исследования кафедры ЭРПЗ ХГАЖТ в области

надежности тяговых электрических машин на рельсовом подвижном составе [87] показали, что од ним из важных факторов работоспособности коллекторнодеточного узла ТЭД в эксплуатации является техническое состояние подшипников деталей, различного вида вибрации от этого зависящие и оценка виброактивности смазки под шипников. Исходя из этого, целесообразно провести соотаетсгшукщие исследования виброакустических характеристик подшипников ТЭД вагонов метрополитена и смазок к ним Цзедставляет также интерес рассмотреть перечень и порядок выполнения технологических операций технического обслуживания и текущего ремонта ТР-1 с учетом возможности применения современных портативных устройств и приборов технического диагностирования. Анализ нормативных документов, регламентирующих технологию ТО вагонов метрополитена, показывает, что большинство операций проводится как «проверить» и т. д., т. е. без указания как осмотреть, что при этом измерить и какую регулировку или замену произвести. Таким образом, совершенствование технологии ТО должно проводиться, на наш взгляд, с учетом следующего:

- максимально сократить необходимость в постановки вагонов в стойла депо для контроля и регулировки;
- производить оценку технического состояния в основном переносными (портативными) микропроцессорными устройствами без разборки и ремонтного вмешательства;
- выполнять диагностику в периоды, не приводящие к завышению норм простоя на ТО и ТР;
- осуществлять диагностику силами мастеров и слесарей средней квалификации с учетом совмещения профессий и использовании перед вижных станций д иагностики и ТО,

- осуществлять оперативную связь с эвхзтлуагационниками и ремонтниками для сокращения времени на диагностику, регулировку и

Таблица 1.1- Распределение неисправностей по тяговым двигателям на вагонах серии Е\*-3 и Е\*-508 (тип ДК-116):

Узел	Деталь	Вид отказа	Количество отказов на 1 млн .км.	
			1998г.	1997г.
Якорь	Катушка электр.	Пробой межвитковой изоляции	0,39	0,69
		Разбандажирована	0,06	0,12
		Снижение сопротивления изоляции	0,13	
	Подшипники	Разрушение		
		Износ, перегрев	0,13	0,12
	Коллектор	Выработка	0,39	4,89
		Подгар	0,13	0,19
		Пробой изоляции	0,13	0,06
Попадание постороннего предмета			0,06	
Вал	Износ конуса		0,12	
Главные полюса	Катушка электр.	Пробой межвитковой изоляции	0,06	
		Нарушение крепления	0,06	0,12
	Подв. Провода	Нарушение изоляции		0,06
Доп. полюса	Катушка электр.	Пробой изоляции		0,25
Щеточный аппарат	Корпус щеткодерж.	Выработка		
	Подв. Провода	Нарушение изоляции		
	Пружина	Излом	0,06	0,88
	Палец	Трещина, излом	4,01	4,26
	Кронштейн	Трещина	0,98	1,75
	Шунт (наконечн)	Обрыв		0,31
	Изоляторы	Пробой корпусной изоляции	3,09	2,63
		Трещина	3,22	
Щетки	Износ	1,18	2,19	
	Рй\$руОГ5Пйё	О**	0,31	

Таким образом, в настоящей диссертационной работе поставлены следующие задачи исследования:

1. Научно обосновать новые методические подходы к совершенствованию технологии обслуживания и диагностирования оборудования вагонов метрополитена
2. Разработать методику количественной оценки безотказности и ремонтпригодности подвижного состава метрополитена
3. Разработать методику определения резервов сокращения времени на восстановление и регулировку отказавшего оборудования с учетом диагностической ценности информации.
4. Разработать методику виброакустической оценки состояния подшипников тяговых двигателей и смазки в них.
5. Провести исследование виброакустических характеристик тяговых
6. Разработать рекомендации по применению переносных (портативных) современных устройств и приборов технического диагностирования для использования на ТО и ТР
7. Разработать новую технологию ТО с использованием передвижной станции технического обслуживания и диагностирования.
8. Провести эксплуатационные испытания на опытной партии вагонов метрополитена предложенной технологии обслуживания и рассчитать технико-экономическую эффективность.

## РАЗДЕЛ 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

#### 2.1. Количественная оценка надежности вагонов метрополитена

Исследования кафедры ЭРПС ХГАЖТ показали, что средние численности состояния парка ТПЗ стремятся и достигают через определенный интервал времени некоторых предельных значений, а процесс изменения состояний носит характер устойчивого равновесия. Этот вывод был подтвержден проведенными исследованиями процессов на устойчивость (в смысле устойчивости по Ляпунову), выполненными д.т.н. Бутько ТВ. на основании критериев Гурвица, Рауса и метода фазового пространства. При этом определялись величины коэффициентов технического использования  $K_{тс}$  и коэффициента готовности  $K_{г}$ . Было показано, что в переходной период от начального состояния системы ТО и ТР до стабилизации  $K_{тс}$  несколько падает, а потом растет и достигает своего первоначального значения. Величина  $K_{г}$  возрастает асимптотически до постоянной величины в установившемся режиме [89].

Таким образом, для количественной оценки устойчивости функционирования системы ТО и ТР метрополитена возможно использовать указанные коэффициенты и, прежде всего, коэффициент готовности  $K_{г}$ , как комплексный для оценки безотказности и ремонтотойкости [87].

Под коэффициентом готовности понимается вероятность того, что система окажется в работоспособном состоянии в требуемый момент времени. В общем случае этот момент времени может быть фиксированным и конечным. Тогда  $K_{г}$  явится нестационарным коэффициентом готовности. В зависимости от вида распределений времени безотказной

работы и времени восстановления изменения во времени может

$t \rightarrow \infty$  функция  $K_r(t)$  стремится к некоторому стационарному значению. Этот предел и есть коэффициент готовности (стационарный)

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t), \quad (2.1)$$

т.е. стационарная вероятность застать систему в исправном состоянии.

Следовательно, эквивалентное определение коэффициента готовности - это доля времени, в течение которого система находится в исправном состоянии при условии, что время наблюдения очень велико. Этот факт приводит к возможности оценки коэффициента готовности через среднее время работы подвижного состава между отказами и через среднее время восстановления:

$$K_r = \frac{T}{T + T_v}, \quad (22)$$

где  $T + T_v$  - средняя длительность цикла «работа - восстановление»;

$T$  - доля времени, в течение которого система находится в работоспособном состоянии.

Среднее время восстановительного ремонта состоит из 3-х основных

$$T_v = T_v^1 + T_v^2 + T_v^3, \quad (2.3)$$

где  $T_v$  - среднее время, затрачиваемое на анализ причин отказов и поиск

отказавших элементов;

\*

$T_v^1$  - среднее время, затрачиваемое на ликвидацию последствий отказа и восстановление работоспособности;

$T_v^3$  - среднее время регулировки после восстановления.

Аналогом коэффициента готовности, как количественной характеристики безотказности, с точки зрения ремонтпригодности, является коэффициент простоя:

$$K_{\Pi} = \frac{T}{T + T_{\text{пр}}} \quad (24)$$

Связь между этими критериями, как вероятностными коэффициентами такова, что

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_{\text{пр}}} \frac{1}{1 + L}, \quad (25)$$

где  $L$  - показатель использования,

$\eta$  - показатель работоспособности.

Задаваясь значениями  $\Pi = 0,1,2 \dots$  можно получить значения величины  $K_{\Gamma}$ . Естественно полагать, что при нормальной эксплуатации величина  $\eta < 1,0$  тк. в случаях  $\eta = 1$  коэффициент готовности будет стремиться к нулю.

С целью сокращения расчета показателей надежности был составлен алгоритм, который представлен на рис.2.1, (здесь  $N$  - количество наблюдаемых вагонов). Цюграмма позволяет быстро рассчитывать коэффициенты готовности (как для каждого подвижного состава в отдельности, так и для всего исследуемого парка) за месяц, год сутки, а также определять наработку на отказ  $T$  и среднее время восстановления  $T_{\text{пр}}$  для всего исследуемого парка

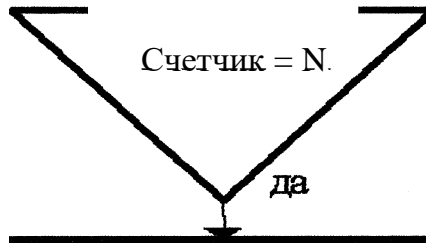
Исходные данные для проведения расчета можно выбирать из книг ремонта и книг сменяемости узлов и деталей ГС метрополитена

ГЪЧЕПЪ/Сг

Вычисление  $K_r$  по каждому вагону за год

Издать  $K_f, T_o, T_g$

нет



каждый месяц

Печать  $K_f, T_o, T_g$

Вычисление  $K_r$  по всем исследуемым вагонам за год

## 2.2. Определение маршрутной технологии обслуживания и диагностирования

№ практике одним из важных вопросов совершенствования технологии техобслуживания является оценка вероятности правильного диагностирования. Будем следующие обозначения:  $D$  - прогнозирующий параметр находится в пределах установленного допуска;  $\bar{D}$  - параметр не находится в пределах допуска;  $\Gamma$  - параметр оценивает по результатам измерений подвижной состав как годный;  $\bar{\Gamma}$  - параметр оценивает подвижной состав как негодный [87].

Отсюда возможны следующие события:

$D\Gamma$  - параметр находится в пределах установленного допуска и оценивает подвижной состав как годный;

$\bar{D}\Gamma$  - параметр находится в пределах установленного допуска и оценивает подвижной состав как негодный;

$D\bar{\Gamma}$  - параметр не находится в пределах установленного допуска, а оценивает подвижной состав как годный;

$\bar{D}\bar{\Gamma}$  - параметр не находится в пределах установленного допуска и оценивает подвижной состав как негодный.

Вероятность перечисленных событий в этом случае определится как

$$P(D\Gamma), P(\bar{D}\Gamma), P(D\bar{\Gamma}) \text{ и } P(\bar{D}\bar{\Gamma}). \quad (2.6)$$

Тогда по теореме умножения вероятностей будем иметь

$$P(D\Gamma) = P(D) * P(\Gamma/D), \quad (2.7)$$

$$P(\bar{D}\Gamma) = P(\bar{D}) * P(\Gamma/\bar{D}), \quad (2.8)$$

$$P(D\bar{\Gamma}) = P(D) * P(\bar{\Gamma}/D), \quad (2.9)$$

$$P(\bar{D}\bar{\Gamma}) = P(\bar{D}) * P(\bar{\Gamma}/\bar{D}), \quad (2.10)$$

где  $P(\Gamma/D)$  - условная вероятность нахождения параметра в пределах, если он на самом деле находится в этих пределах;

$P(\Gamma/D)$  - условная вероятность того, что параметр находится за пределами допуска, если он на самом деле в пределах допусков;

$P(\Gamma/D)$  - условная вероятность нахождения параметра в пределах допуска, если он в действительности находится за пределами допуска;

$P(\Gamma/D)$  - условная вероятность того, что параметр находится за пределами допусков, когда он и на самом деле вне допуска;

$P(D)$  - вероятность того, что параметр в момент измерения находится в заданных пределах;

$P(D)$  - вероятность того, что параметр в момент измерения находится за пределами установленного допуска

Естественно, что полная группа событий должна быть равна

$$P(D\Gamma) + P(D\Gamma) + P(D\Gamma) + P(\text{Ж}) = 1 \quad \blacksquare \quad (2.11)$$

Обозначив полную группу событий как  $k$  необходимо выбрать такое его значение ( $k = k_{opt}$ ) чтобы вероятность была максимальной при фиксированном числе замеров  $n$ .

Отсюда следует; что  $k_{opt}$  может принимать значения

$$1 \text{ при } P(X_n) > P(i, i) \quad (2.12)$$

—

$$n \text{ при } P(1, n) < P(i, zi)$$

или

$$= 1 \text{ при } P(D) > P(D) \quad (2.13)$$

$$n \text{ при } P(D) < P(D)$$

№ основании этого очевидно наиболее вероятны значения

$$P(\Gamma/D) > P(\Gamma/D), \quad (2.14)$$

те. стратегия техобслуживания с диагностикой должна предусматривать расчет положительных значений  $k$  и сравнения их с  $k_{МЛ\%}$  при общем числе измерений  $n$ . Если  $k \geq k_{МЛ\%}$ , то считается возможным выполнение контрольно-диагностических работ и обслуживания по минимальному объему, если  $k < k_{о\text{ят}}$  принимается соответствующее решение об увеличении объема техобслуживания.

Исходя из этого, рассмотрим определение оптимальной стратегии техобслуживания подвижного состава по уровню реализуемой мощности. На основании проведенных исследований в Харьковском метрополитене собраны данные трех замеров на ТО-3, т.е.  $n = 3$ . При этом получены значения  $P(D) = 0,72$ ;  $P(G / D) = 0,81$  и  $P(G / \bar{D}) = 0,28$ . Согласно проведенным расчетам  $k \approx 2$ . Это означает, что для получения максимальной вероятности правильного заключения необходимо всегда иметь не менее двух положительных показаний о нахождении измеренной величины в установленных пределах, т.е. данные двух смежных ТО-3.

Для назначения приоритетов, а фактически для корректировки технологии техобслуживания и создания маршрутной технологии, проведена группировка отказов подвижного состава по параметрической надежности. На основании приведенных выше зависимостей число возможных сочетаний определилось в размере 31. В результате обработки статистических данных, собранных в Харьковском метрополитене, получены математические зависимости количества сочетаний  $y$  от числа отказов  $X$ , выявляемых на ТО-3 при помощи методов диагностирования. Эти выражения, с учетом взаимосвязи и соответственно без нее, имеют вид.

$$y = 0,155 X^{2,7}, \quad (2.15)$$

$$y = 0,286 X^{2,91}. \quad (2.16)$$

При этом были исключены из рассмотрения сочетания отказов, вероятность появления которых составила менее 0,01 (1%) и оставлены для дальнейших расчетов 22 сочетания. Динамика полученных зависимостей приведена на рис.2.2. Расчеты показали, что ввиду большого количества сочетаний организовывать диагностику на ТО-2 отдельно по каждому сочетанию отказов нецелесообразно. Поэтому было предложено объединить близкие по определенным признакам сочетания в группы, чтобы число технологических маршрутов было приемлемым для производственных условий. В результате оценка соотношений вариантов сочетаний технологических групп с выполняемыми работами по ликвидации отказов ПРОИЗВОДИТЕСЬ при постановке подвижного состава на ТР-1 и ТО-3. Находя из проведенного расчетного исследования, были определены основные варианты маршрутов с разбивкой контрольно-диагностических операций по технологическим позициям и их концентрацией в зависимости от сочетаний отказов и трудоемкости по их устранению. Эти данные легли в основу организации работы передвижной станции обслуживания и диагностирования ПС метрополитена

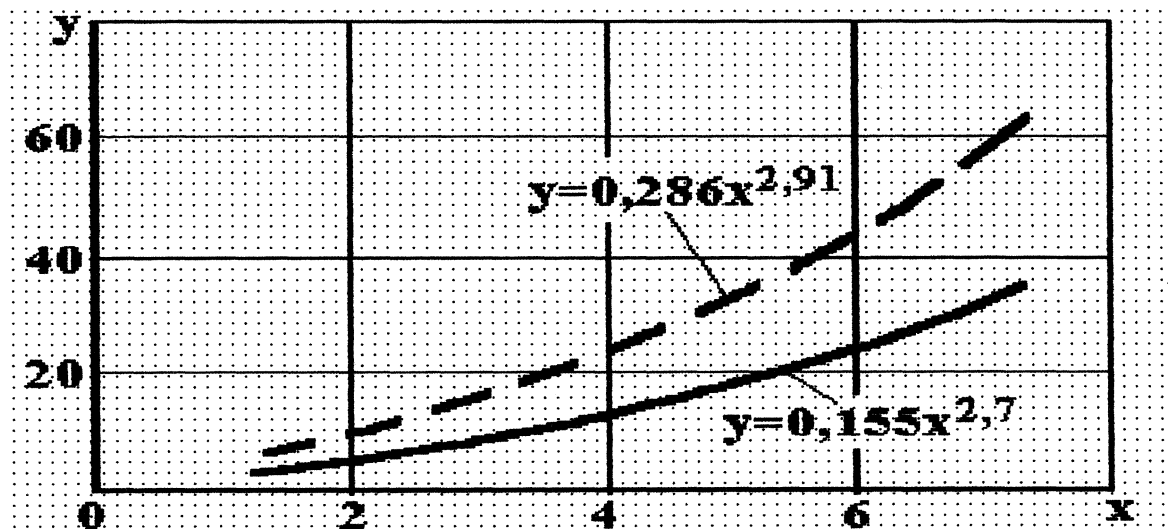


Рисунок 2.2 - Зависимости количества сочетаний от числа отказов с учетом (—) и без учета взаимосвязи (-----)

### 2.3. Моделирование запаса запасных частей для ПС метрополитена

Повышение эффективности работы подвижного состава метрополитена связано с рационализацией материально-технического снабжения (МТО), одна из основных проблем которого состоит в шинировании и управлении запасами запасных частей и материалов. Отсутствие запаса приводит к выводу из эксплуатации и длительному простоя ПС, что в свою очередь вызывает значительные потери от его недоиспользования. Скопление и не расходование запаса связано с замораживанием средств и экономически неоправданно [79].

Практика управления запасами показала, что существует несколько подходов к решению задачи по определению запаса запасных частей и материалов. В них наиболее полно рассмотрены задачи, в которых в качестве критерия управления запасом выбран минимум затрат, связанных с содержанием и дефицитом запаса. Однако эти методики, как правило, не учитывают такие факторы, как сложившаяся экономическую ситуацию, материальные взаимосвязи, сроки поставки, рыночную конъюнктуру, а также их связь с показателями производства и использованием ГС.

Исходя из этого Харьковским метрополитеном совместно с кафедрой ЭРГС ХГАЖТ, была предложена методика выбора параметров и создание математических моделей материальных запасов. Для проведения анализа из выбранной общей совокупности необходимых для производственных целей запасных частей для ГС метрополитена были выделены 150 позиции. На этой основе были определены ежемесячные потребности в этих позициях за продолжительный период времени (несколько лет). Одиннадцать позиций исключены из расчетов, поскольку показатели выдачи указанных наименований из склада неправильно отражали потребности в них

Потребности в остальных 139 видах материалов и запчастей были проанализированы с помощью статистических методов.

Анализ показал, что при работе со стохастическими моделями необходимо выявить отсутствие, во-первых, ярко выраженного тренда, а во-вторых, зависимостей между потребностями, которые возникают в отдельные периоды времени (месяцы). В рис.2.3 показана динамика потребностей в целом и скользящее среднее значение.

Полученные результаты дали возможность описать потребности в материалах и запчастях с помощью функции вероятностей следующего вида

$$P(\xi = k) = \varphi(k) = \binom{n-1+k}{k} (1-q)^k q^n \quad (2.17)$$

где  $q$  и  $n$  - параметры отрицательного биномиального распределения;

$\xi$  - месячные потребности.

При этом имеют силу выражения [15]

$$\mu = n \left( \frac{1-q}{q} \right) \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

где  $\mu$  - среднее значение;

Проведенный тест на соответствие показал, что для практического использования справедливо считать распределение потребностей по большинству наименований отрицательно биномиальным. В рис.2.4 показана взаимосвязь теоретического и статистического распределения.

Поскольку отрицательное биномиальное распределение является дискретным, то потребности необходимо соответствующим образом сгруппировать [15].

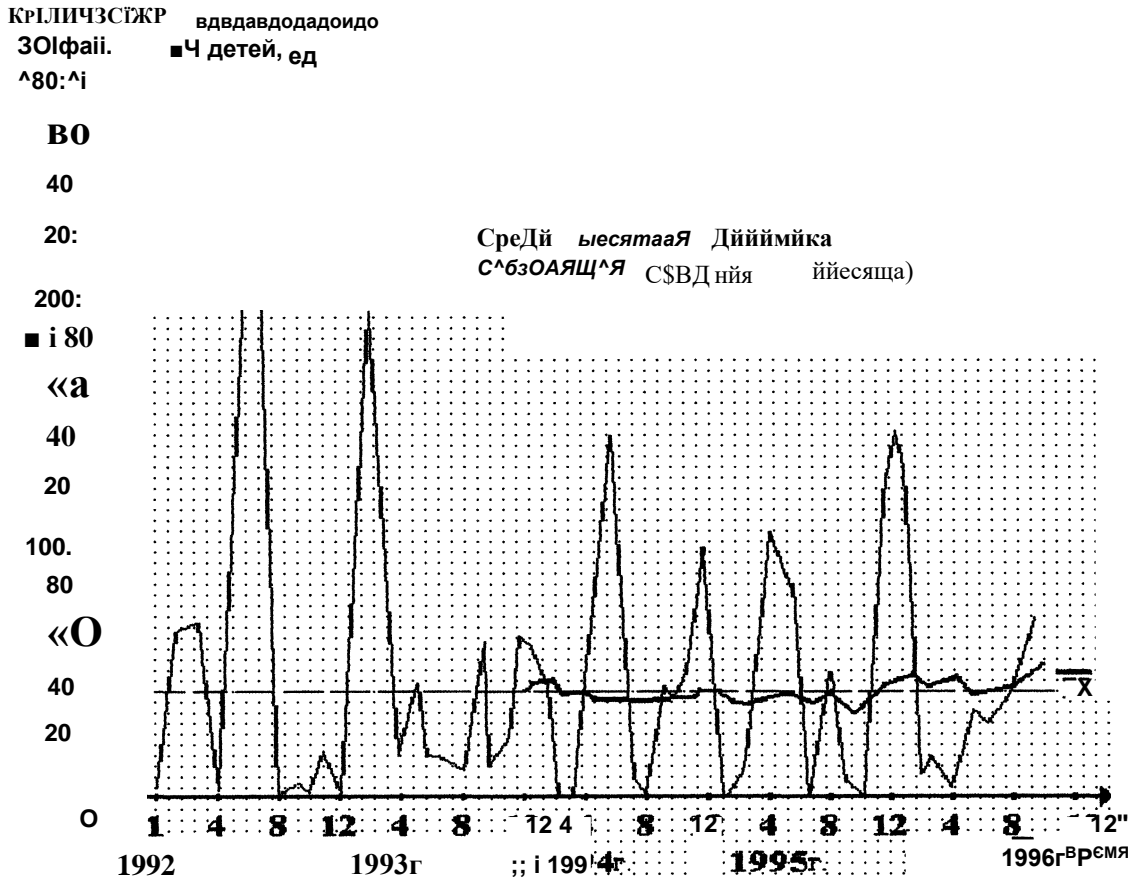


Рисунок 2.3

Параметры отрицательного биномиального распределения определяются исходя из эмпирической величины среднего значения  $X$  и эмпирического значения дисперсии  $O^2$  на основе следующих равенств:

$$q = \frac{x_m}{s_m^2}; \tag{2.20}$$

$$n = \bar{x}_m \left( \frac{q}{1-q} \right); \tag{2.21}$$

$$\bar{x}_m = \frac{1}{d} \left( \bar{x} - \frac{d}{2} \right) \tag{2.22}$$

$$\frac{2}{m} \frac{s^2}{T-2} \tag{2.23}$$

Причем  $Z = \frac{\bar{X} - X}{s}$  и  $CT = s^2$

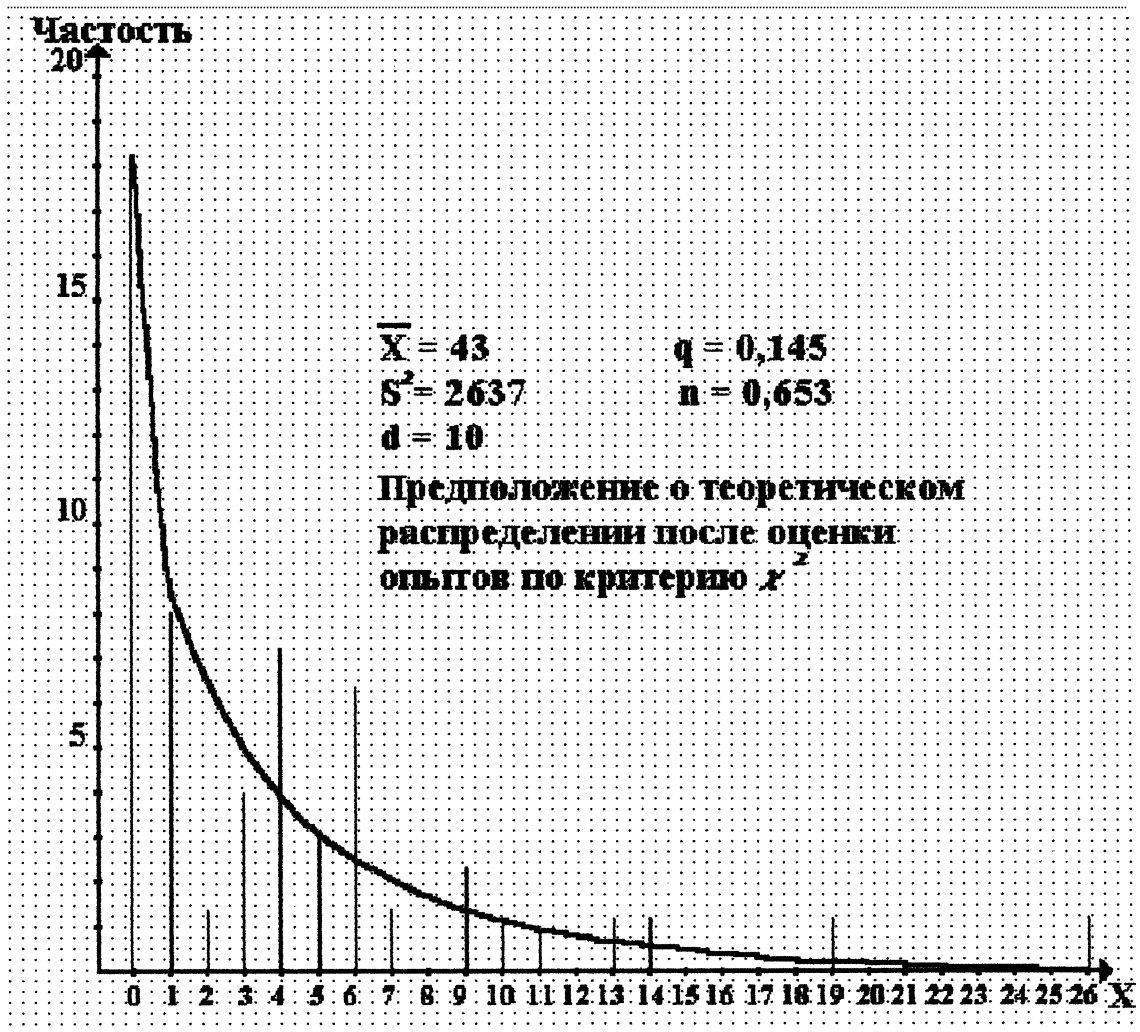


Рисунок 2.4

При анализе потребностей и определении функции вероятностей предполагалось, что никаких существенных изменений в потребностях не происходит (допускались лишь случайные колебания). Было установлено, что, как правило, тренд отсутствует. Тем не менее, следует учитывать определенные изменения, происходящие

что величины математического ожидания, и дисперсии потребностей должны быть записаны в такой математической форме, которая дает

возможность учесть эти изменения. Злобным методом подобной записи является экспоненциальное сглаживание. Для записи средней величины потребностей (при  $0 < \beta < 1$ ) используется следующая зависимость [75]

$$A' = A + \beta(A - A'), \quad (224)$$

где  $A'$  - новая средняя величина потребностей;

$A$  - старая средняя величина потребностей;

$\beta$  - новая величина потребностей;

$\beta$  - константа сглаживания

Соответственно для записи величины дисперсии используется выражение [75]:

$$\sigma'^2 = \sigma^2 + \beta(\sigma^2 - \sigma'^2) \quad (225)$$

где  $\sigma'^2$  - новая дисперсия потребностей;

$\sigma$  - старая дисперсия потребностей;

$\beta$  - новая средняя величина потребностей;

$\beta$  - новая величина потребностей;

$\beta$  - константа сглаживания.

Константа сглаживания может выбираться в пределах, определяемых соотношением  $0 < \beta < 1$ . Чем больше  $\beta$  тем чувствительнее метод, тем больше вес новой величины потребностей. Выбор константы сглаживания связан с определенными трудностями. Он зависит как от модели в целом, в которую входят записанные методом экспоненциального сглаживания величины, так и от цели оптимизации, положенной в основу этой модели. В литературе рекомендуется брать значение  $\beta$  равное 0,1.

В основе полученных таким путем величин математического ожидания и дисперсии вычисляются параметры отрицательного

биномиального распределения  $n$  и  $q$  дюротые позволяют использовать их

## 2.4. Методика расчета элементов ЗИП

### 2.4.1. Определение ЗИП для ремонтируемых элементов

Снабжение ЗИП для ПС метрополитена имеет массовый характер, что позволяет при рассмотрении процесса обеспечения использовать математический аппарат теории массового обслуживания. При этом можно сделать следующие предположения [20]

Имеется система обслуживания запасными элементами, состоящая из большого количества од нотипных элементов входящих в комплект ЗИП Под системой обслуживания будем подразумевать систему ТО и ТР ГС метрополитена, а сам ГС как объект этой системы В систему на обслуживание поступает неограниченный простейший поток требований, состоящий из трех простейших потоков:

- поток отказов элементов  $L_1$  во время эксплуатации объекта с параметрами потока отказов

$$L_{л1} = m L_1 \gg \quad (2.26)$$

$i_{де}$  -интенсивность отказов элементов объекта во время эксплуатации;

- $L_2$  - количество эксплуатируемых элементов.
- поток заявок  $L_2$  на элементы ЗИП с параметрами

$$L_2 \text{ Из } L_2 \cdot \quad (2.27)$$

$i_{де}$  - количество элементов в ЗИГЪ;

- интенсивность ремонта или пополнения элементов в ЗИГЪ.

Отсюда, при наличии запасных элементов в ЗИП, суммарный поток отказов составит

$$\lambda_{\text{с}} = \lambda_{1K} \cdot I_{\text{л.2}} / \lambda_{\text{и}} K_{\text{и}} + \lambda_{\text{з}} \cdot L > 2^9 \quad (228)$$

где  $K_{\text{я}}$  - коэффициент интенсивности эксплуатации элементов объекта

При поступлении потока требований от объекта или от ЗИГЪ на запасной элемент оно немедленно удовлетворяется одним из свободных элементов ЗИГЪ. При отсутствии такового система принимает на обслуживание очередное требование, но при этом возникает определенная вероятность простоя объекта в ожидании ремонта [55].

Каждый элемент комплекта ЗИГЪ может одновременно обслуживать только одно требование. Время обслуживания одного требования одним элементом ЗИГЪ подчинено экспоненциальному закону с математическим ожиданием и временем обслуживания  $T_{\text{об}}$  ■

запасных элементов может находиться в одном из следующих состояний:

- в комплекте ЗИП имеются все элементы;
- в комплекте ЗИГЪ отсутствует один из требуемых элементов;
- заняты  $L-1$  элементов комплекта ЗИГЪ (состояние  $II$ );
- заняты все  $L$  элементов комплекта ЗИГЪ (состояние  $II+1$ ).

Следовательно, возможно всего  $Y+1$  состояний системы обеспечения запасными элементами. Вероятность того, что в момент времени  $t$  занято ровно  $S$  элементов ЗИП, можно определить из выражения [55]

$$P_s(t) = \left[ \frac{(t \cdot \lambda \cdot c)^s}{s!} \right] e^{-\lambda \cdot c \cdot t} \quad (2.29)$$

где  $tp$  - среднее время ремонта или пополнения элементами ЗИПа;

$V$  - интенсивность потока ремонта или пополнения ЗИП

Интенсивность потока ремонта или пополнения элементами ЗИП

определяется как [55]

$$V = I \cdot tp \quad (230)$$

Вероятность того, что в момент времени  $t$  занято не более  $Пз$  элементов ЗИП [55], определяется как сумма вероятностей  $L+1$  несовместных состояний от  $S=0$  до  $S=Пз$ , тогда

$$P_{s \leq Пз}(t) = \sum_{s=0}^{Пз} \frac{(tp \Lambda c)^s}{s!} e^{-tp \Lambda c} (1 - e^{-vt})^s \quad (231)$$

или

$$P_{s \leq n_3}(t) = e^{-tp \Lambda c} (1 - e^{-vt}) \sum_{s=0}^{n_3} \left[ \frac{(tp \Lambda c)^s}{s!} \right] (1 - e^{-vt})^s \quad (232)$$

Вероятность того, что в момент времени  $t$  занято более  $Пз$  элементов ЗИП (событие противоположное предыдущему) [55], равна

$$P_{s > n_3}(t) = 1 - \sum_{s=0}^{Пз} \frac{(tp \Lambda c)^s}{s!} e^{-tp \Lambda c} (1 - e^{-vt})^s \quad (233)$$

$$P_{s > n_3}(t) = 1 - e^{-tp \Lambda c} (1 - e^{-vt}) \sum_{s=0}^{n_3} \left[ \frac{(tp \Lambda c)^s}{s!} \right] (1 - e^{-vt})^s \quad (234)$$

Рассмотрим предельный случай при  $t \rightarrow \infty$ . Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{s > n_3}(t) = P_n(t) = 1 - e^{-tp \Lambda c} \sum_{s=0}^{n_3} \frac{(tp \Lambda c)^s}{s!} \quad (235)$$

Обозначив  $tp \Lambda c$  через  $p$ , можно записать

$$P_n(t) = e^{-\rho t} \sum_{s=0}^n \frac{\rho^s}{s!} \quad (2.36)$$

Данное выражение может быть использовано для расчета потребного количества ремонтируемых запасных элементов ЗИГЪ. Для расчета необходимо задаться допустимой вероятностью простоя объекта в ожидании ремонта  $P_n(\rho)$  и, пользуясь таблицами функций  $\sum_{s=0}^n \frac{\rho^s}{s!} e^{-\rho}$  при известном  $\rho$ , найти значение  $P_n$ .

#### 2.4.2. Определение ЗИП для перемонтируемых элементов

Для перемонтируемых запасных элементов ЗИГЪ, т.е. когда  $t \rightarrow \infty$ , а  $V \rightarrow 0$ , после подстановки  $V = \infty (U = 0)$  в выражение (2.29) и раскрытия неопределенности  $0 = \infty$ , получим [55]

$$\lim_{V \rightarrow \infty} P_s > \dots (') = P_{\dots} \quad 1 \cdot e^{-\dots} \quad (2.37)$$

В данном выражении значение  $\langle L_C \rangle$  есть математическое ожидание числа запасных элементов за время эксплуатации  $t$ . Для раскрытия этого выражения примем, что объект имеет интенсивность отказов  $L_C$ . Распределение плотности вероятности времени безотказной работы  $f(t)$  при экспоненциальном законе распределения отказов имеет вид

(2.38)

Система должна выполнять заданные функции в течение времени  $t$  (период эксплуатации). За это время в системе может произойти случайное количество отказов  $n$ , обусловленное ненадежностью ее отдельных элементов. Вместо отказавшего элемента каждый раз из запаса изымается новый элемент. Поэтому число израсходованных элементов  $N_3$  за время  $t$  будет равно числу отказов  $n$ .

При этих условиях вероятность того, что за время  $t$  объект потребует точно  $n$  запасных элементов, определится по формуле Пуассона [15]

$$P_3(n) = \frac{(\Lambda_c t)^n}{n!} e^{-\Lambda_c t}, \quad (239)$$

где  $\Lambda_c$  - математическое ожидание количества запасных элементов за

Действительно, по определению математического ожидания [55]

$$M_3 = \sum_{n=0}^{\infty} n P_3(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{(\Lambda_c t)^n}{n!} e^{-\Lambda_c t} \quad (2.40)$$

Первый член суммы в этом выражении при  $n=0$  будет равен нулю.

Следовательно преобразовываем его к следующему виду

$$M_3 = \Lambda_c t e^{-\Lambda_c t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\Lambda_c t)^{n-1}}{(n-1)!} \quad (2.41)$$

поскольку

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \quad (2.42)$$

Обозначим  $n-i=k$ . Тогда

$$P_{CP} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2.43)$$

Следовательно, выражение (2.37) можно записать в виде

$$P_n(t) = 1 - e^{-\lambda_{CP} t} \sum_{s=0}^{n-1} \frac{(\lambda_{CP} t)^s}{s!} \quad (2.44)$$

Задаваясь допустимой вероятностью простоя объекта  $P_{пр}(t)$ , а также значением времени эксплуатации  $t$  и зная величину  $\lambda_{CP}$  можно найти  $n_3$ , а затем по формуле (2.44) количество запасных элементов в ЗИП  $n_3$ .

Для корректировки расчетного количества запасных элементов ЗИП применяется коэффициент запаса [55], который определяется как

$$K_3 = \frac{n_3}{n_{CP}} \quad (2.45)$$

Коэффициент запаса можно приближенно определить из следующих зависимостей (при  $P_M(f)=0,05$ )

$$K_3 \text{ ЗИП } [4 < \lambda_{CP} < 20] \sim 1,24 \frac{\lambda_{CP}}{n_{CP}} \quad (2.46)$$

$$K_3 \text{ ЗИП } [20 < \lambda_{CP} < 70] \sim 1,12 \frac{\lambda_{CP}}{n_{CP}} \quad (2.47)$$

$$K_3 \text{ ЗИП } [\lambda_{CP} > 70] \sim 1,06 \frac{\lambda_{CP}}{n_{CP}} \quad (2.48)$$

Рассмотренные зависимости позволяют рассчитывать по ним количество конкретных типов (ремонтируемых и перемонтируемых) запасных частей, входящих в ЗИП, с заданной вероятностью простоя ГС метрополитена на различных видах ТО и ТР

## 2.5. Формирование и методика оценки достаточности ЗИП для ПС метрополитена.

Формирование ЗИП производится на основании установления моментов заказа его объемов для восполнения запаса и распределении вновь прибывшей партии по нижестоящим звеньям системы снабжения. Совокупность правил, по которым принимаются эти решения, называют стратегией управления ЗИП. Стратегия управления ЗИП, как правило, в теории управления запасами считается известной. Неизвестными являются только моменты, объем заказов и время на его пополнение (формирование).

Пополнение запасов ЗИП всегда происходит с некоторой задержкой относительно момента выдачи требования. Его можно подразделить на:

- мгновенное (задержка поставки пренебрежимо мала);
- с задержкой на фиксированный срок;
- с задержкой на случайный интервал времени с известным вероятностным распределением;
- обыкновенное и экстренное.

В зависимости от величины и характера этих задержек определяются стратегии формирования структурных систем ЗИП [ 18].

Исходя из условий эксплуатации объекта, применяется несколько структур систем организации снабжения запасными элементами. В то же время любая из этих структур может включать в себя следующие составляющие.

- одиночный комплект ЗИП (ЗИП-О), представляющий комплект запасных элементов, приданный непосредственно данному объекту для обеспечения его работоспособности;
- обменный фонд ремонтного органа (ОФ-РО), представляющий комплект запасных элементов, придаваемый ремонтному органу который

обслуживает группу объектов (не обязательно идентичных) и служащий для замены отказавших в изделии элементов исправными;

- комплект запасных элементов ремонтного органа (ЗИП-ГО), представит органу с целью обеспечения его работоспособности. Функционирование ремонтного органа (ГО) заключается в устранении отказов в неисправных элементах за счет выявления и замены в них отказавших более мелких конструктивных элементов. Таким образом, ремонтный орган, предназначенный для ремонта объектов, должен быть снабжен запасом типовых узлов, а ремонтный орган, предназначенный для ремонта узлов - определенным запасом деталей.

На основании этого можно выделить несколько, наиболее часто используемых на практике, структур систем обеспечения объектов запасными элементами (СОЗЭ), которые представлены на рис.2.5.

На рис.2.5,а приведена наиболее распространенная СОЗЭ-1 пополняемая из неисчерпаемого источника пополнения (НИП). Под НИП здесь и далее будет пониматься склад, база, завод и т.д, ограниченность которых при пополнении элементов в расчет не принимается. В случае отказа у объекта элементов в комплект ЗИП поступает заявка, которая немедленно удовлетворяется, если соответствующий запасной элемент там имеется. При отсутствии запасного элемента заявка становится в "очередь" и ждет пока не появится возможность ее удовлетворить. Длина очереди неудовлетворенных заявок может быть различной и зависит от основных конструктивных принципов и условий эксплуатации объекта. Если объект не содержит резерва, то отказ любого конструктивного элемента приводит к отказу объекта в целом.

Таким образом, заявка на запасной элемент, поступившая от объекта в комплект ЗИП, может быть удовлетворена либо немедленно, либо с некоторой задержкой.

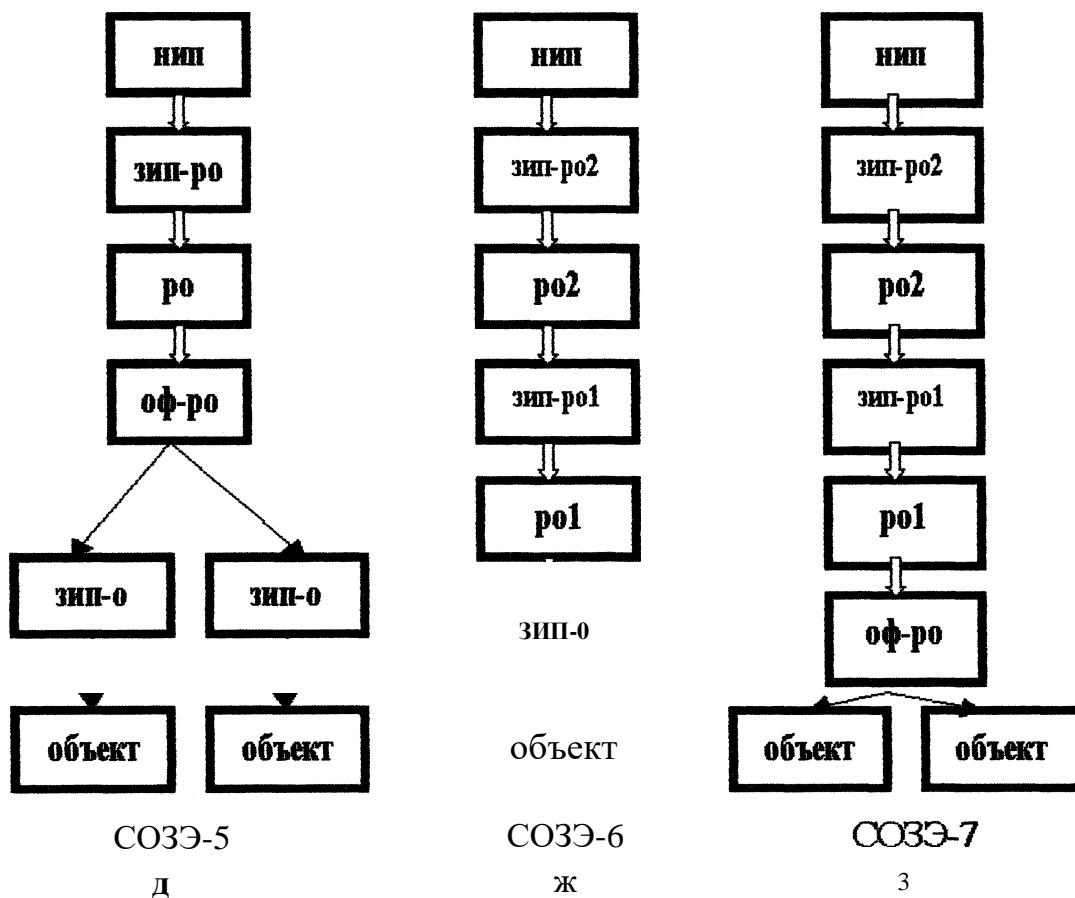
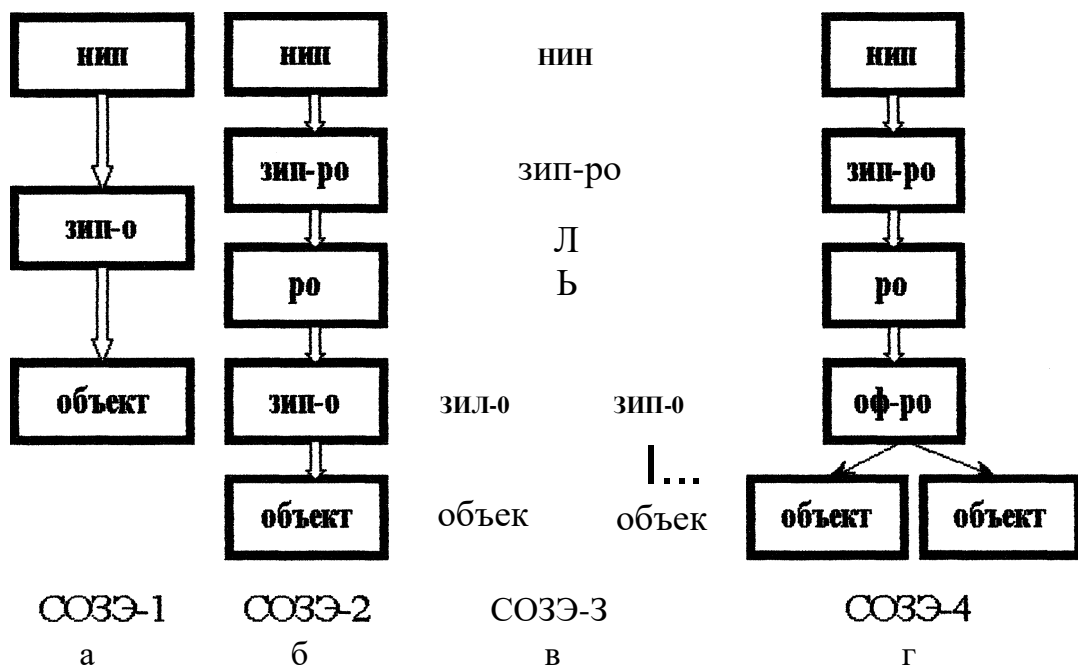


Рисунок 2.5

Среднее время между отказом и восстановлением объекта [18] можно представить в виде

$$\hat{t}_{ож} \sim S_{об} \hat{\lambda}_{ЗИП} \quad (2-49)$$

где  $t_{ог}$ - среднее время обнаружения и поиска неисправного элемента, которое определяется системой диагностирования объекта и не зависит от полноты комплекта ЗИП;

$t_{сам}$ - среднее время замены отказавшего элемента исправным запасным (при наличии его в ЗИП), которое определяется ремонтпригодностью объекта и не зависит ни от системы диагностирования, ни от полноты комплекта ЗИП;

$\hat{\lambda}_{зип}$  Чадаев время задержки в удовлетворении заявки на запасной элемент, которое не зависит от системы диагностирования объекта и определяется потоком отказов элементов и полнотой комплекта ЗИП

Таким образом, зная значение среднего времени задержки в удовлетворении заявки на запасной элемент ( $L/\lambda_{зип}$ ), можно оценить влияние ограниченности комплекта ЗИП на показатель надежности объекта

Система СОЗЭ-2 учитывающая ремонт узлов объекта представлена на рис. 2.56. Основой данной системы является пополнение ЗИП-О за счет ремонта отказавших элементов в ремонтном органе (РО) и пополнение ЗИПО из НИЛ.

Система СОЗЭ- 3 (представленная на рис 2.5в) определяет, что каждому из 5 образцов объектов придан свой ЗИП-О. Всей группе образцов придан РО с комплектом ЗИП-РО. Пополнение комплектов ЗИП О происходит за счет ремонта отказавших элементов в РО, а пополнение комплекта ЗИПРО производится из НИП

Система СОЗЭ-4 представленная на рис. 2.5г, определяет, что группе из  $S$  образцов объектов придан один обменный комплект (ОФ-РО) совмещенный с ремонтным органом, снабженным ЗИП-РО. ОФ-РО восстанавливается за счет ремонта элементов в ГО, а ЗИП-ГО пополняется из НИП.

Структура СОЗЭ-5 представленная на рис. 2.5,д составлена таким образом, что каждому образцу объекта в группе придан свой ЗИП-О, а всей группе придан ГО с ОФ-РО и ЗИП-О. При этом пополнение ЗИП-О происходит за счет замены неисправных элементов исправными в ОФ-РО, пополнение ОФ-РО за счет ремонта элементов в ГО, а пополнение ЗИП-О из НИП

Структура СОЗЭ-6 (рис. 2.5,ж) включает, что объектам придан ЗИП-О, запасы в котором восстанавливаются за счет ремонта элементов в ГО1. При этом ГО1 снабжен комплектом ЗИП-ГО1, запасы в котором восстанавливаются за счет ремонта элементов в РО2. В свою очередь, ГО2 снабжен комплектом ЗИП-РО2 который пополняется из НИП

Система ООЗЭ-7 (рис. 2.5,з) представляет собой группу объектов (не обязательно идентичных) которой придан ОФ-ГО1, запасы в котором восстанавливаются за счет ремонта элементов в ГО1. При этом ГО1 снабжен ЗИП-ГО1, запасы в котором восстанавливаются за счет ремонта элементов в РО2. В свою очередь ГО2 снабжен комплектом ЗИП-РО2, пополняемым из НИП

Для того чтобы учесть ограниченность ОФ-РО или ЗИП-ГО необходимо ввести для этих комплектов ЗИП показатель достаточности

Показателем достаточности ОФ-РО [18] называется стационарное значение отношения

$$\Delta t_{оф} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_{\sum оф}(T)}{\Lambda_{оф}(T)} \quad (2-50)$$

где  $A^{(7)}$  — общее количество заявок на элементы, поступившие в ОФ-РО за время  $T$ ;

$T_{so}^{(fl)}$  — общее суммарное время, за которое все заявки поступившие во время  $T$  ожидали удовлетворения.

Аналогично определяется показатель достаточности ЗИП-РО [18] как стационарное знамение отношение

$$Li_{po} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{L_{\Gamma}^{TZ^{(v)}}}{A_{PO}(T)}, \quad (2.51)$$

где  $L_{po}(l)$  - общее количество заявок на элементы, поступившие из РО в ЗИП-РО за время  $T$ ;

$T_{EPO}(T)$  - общее время ожидания удовлетворения всех заявок, поступивших в ЗИП-РО за время  $T$ .

Опэаниченность комплекта ЗИП-РО увеличивает среднее время ремонта элементов

$$T_p \sim T_{jfto} + \Delta_{po}^5 \quad (2.52)$$

где  $T_{jfto}$  - среднее время ремонта элементов в РО при условии, что необходимые комплектующие элементы всегда имеются в наличии;

$A_{ro} - T_{LOKSB}^{TSb}$  достаточности ЗИП-РО.

Ограниченность ОФ-РО увеличивает среднее время доставки исправного элемента из ОФ-РО в ЗИП-О или непосредственно к изделию

$$T_d \sim T_{dco} + \Delta_{OF} \quad (2.53)$$

где  $T_{dco}$  - среднее время доставки элементов из ОФ-РО при условии, что в ОФ-РО имеются необходимые элементы;

$A_{to}^*$  - показатель достаточности ОФ-РО.

Для того чтобы вычислить показатель достаточности ОФ-РО необходимы следующие начальные данные:

$N_o^*$  — количество типов элементов, на которые могут прийти заявки в ОФ-РО;

$A_{ю}^*$  - интенсивность потока заявок на запасные элементы 1-го типа, поступающих в ОФ-РО от обслуживаемых образцов объекта или комплекта ЗИП-О, т.е. среднее количество заявок на элементы 1-го типа в ед инициу времени;

$T_{\#}^*$  - среднее время ремонта одного элемента 1-го типа в ГО;

$\langle dx \rangle$  - начальное количество элементов 1-го типа в ОФ-РО.

Для того чтобы вычислить значение  $A^{\wedge}$  - интенсивности потока заявок на элементы 1-го типа, необходимо просуммировать по всем образцам объекта в группе, обслуживаемой данным ГО интенсивности потоков замен элементов 1-го типа в объекте [ 18]

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{iO}^* \cdot T_{\#}^* \quad (2.54)$$

где  $\lambda$  - количество образцов объектов в группе;

$\lambda_{iO}^*$  - интенсивность потока замен элемента 1-го типа в  $i$ -ом образце объекта

Показатель достаточности ОФ-РО [18] вычисляется по формуле

$$A_{to}^* = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{iO}^* \cdot T_{\#}^*}{C_{yO}} \quad (2.55)$$

где  $A_{to}^*$  - показатель достаточности запаса элементов 1-го типа в ОФ РО.

При этом

$$\lambda_{iO}^* = \lambda_{iO} \cdot C_{yO} \quad (2.56)$$

и

$$= \hat{C}_{O\Phi} \cdot \hat{I}_{O\Phi} \quad (2.57)$$

Вычисления по данной формуле производятся следующим образом.

$$g = \frac{\epsilon_{p\Phi} \hat{O}\Phi}{\hat{O}\Phi}$$

где  $\epsilon_{O\Phi}$  - требуемая точность расчета достаточности элементов.

По таблицам функции  $F(n, a)$  - суммарного распределения Пуассона [15]

$$F(n, a) = e^{-a} \sum_{j=0}^n \frac{a^j}{j!} \quad (2.59)$$

отыскиваются значения  $P(n_{O\Phi} + 1)$ ,  $P(n_{O\Phi} + 2)$ , и т.д. до такого,  $P(n_{O\Phi} + J)$  которое впервые станет меньше, чем  $\epsilon$ .

Найденные значения суммируются [18] и определяется значение

$$\hat{I}_{O\Phi} \hat{I}_{O\Phi} = \sum_{j=0}^J \frac{a^j}{j!} \quad (2.60)$$

Для того чтобы вычислить значение показателя достаточности ЗИП-РО требуются следующие исходные данные:

$N_{JPO}$  - количество типов комплектующих элементов, которые могут потребоваться для работы РО;

$j$  - номер типа элементов по номенклатуре ЗИП-РО;

$L^{\wedge}O$  - интенсивность потока заявок на элементы  $j$ -го типа, поступающих в ЗИП-РО, т.е. среднее количество заявок на элементы  $j$ -го типа в единицу времени;

тип стратегии пополнения запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО; Значение  $a_{JPO}$  может принимать значения 1,2,3. При  $a_{JPO} = 1$  запас

элементов /го типа пополняется периодически, т.е. восстановление до первоначального уровня производится через фиксированные заранее заданные промежутки времени, называемые периодами пополнения. При пополнение запаса элементов /го типа производится периодически с экстренными доставками, т.е., помимо планового периодического восстановления запаса, допускается еще и внеплановое восстановление его до первоначального уровня, если элемент /го типа требуется для работы РО, а запас элементов /го типа в ЗИП-РО пуст. При  $a^0=3$  запас элементов /го типа в ЗИП-РО пополняется за счет ремонта отказавших элементов в специальном РО<sub>спец</sub>, (отличном от того РО, которому придан данный ЗИП-РО);

$T_{jpo}$  - основной параметр стратегии пополнения запаса элементов /го типа. При  $\gamma^1=1$  или  $T_{po}=2$  значение  $a_{jfo}$  является периодом пополнения запаса элементов /го типа. При  $\gamma^1=3$  значение  $a_{jpo}$  является средним временем ремонта одного элемента/го типа;

$T_{jro}$  - дополнительный параметр стратегии пополнения запаса элементов. При  $T_{jro}=1$  или  $T_{jro}=3$  значение  $a_{jro}$  равно нулю. При  $T_{jro}=2$  значение  $a_{jro}$  представляет среднюю продолжительность экстренной доставки элементов из неисчерпаемого источника пополнения.

$n_{jro}$  - начальное количество элементов /го типа в ЗИП-РО.

Для того чтобы вычислить значение интенсивности потока заявок  $L_{jro}$  на элементы /го типа в комплекте ЗИП-РО, требуются дополнительные сведения о структуре элементов различных типов, подлежащих ремонту в данном РО. Обозначим через  $M_{pp}$  количество элементов подлежащих ремонту в данном РО, а через  $m_g$  количество комплектующих элементов /го типа (по номенклатуре ЗИП-РО) в одном элементе  $i$ -го типа, ремонтируемом в данном РО и через  $\lambda_i$  интенсивность отказов одного элемента /го типа (по номенклатуре ЗИП-РО). Тогда

вероятность того, что для ремонта элемента  $i$ -го типа понадобится комплектующий элемент  $j$ -го типа, определится по формуле [18]

$$p_{ij} = \frac{m_i L_i}{M_{PO}} \quad (2.61)$$

$$j=1$$

Следовательно, интенсивность потока заявок на элементы  $i$ -го типа в ЗИП-РО может быть получена из выражения

$$\Lambda_{jPO} = \sum_{i=1}^{M_{PO}} \Lambda_i P_{ij}, \quad (2.62)$$

где  $L_i$  - среднее количество элементов  $i$ -го типа, поступающих в Ю в единицу времени ( $L_i$  вычисляется аналогично значению интенсивности потока заявок  $L_i$  на элементы  $i$ -го типа в ОФ-РО).

Для решения задачи расчета ЗИП-РО требуются следующие исходные данные:

$N_{JO}$  - количество типов комплектующих элементов, которые могут потребоваться для ЗИП-РО;

- показатель достаточности ЗИП-РО;

$J$  - номер типа элементов по номенклатуре ЗИП-РО;

$L_{jPO}$  - интенсивность потока заявок на элементы  $j$ -го типа, поступающих в ЗИП-РО, т.е. среднее количество заявок на элементы  $j$ -го типа в единицу времени;

$a_{jPO}$  - тип стратегии пополнения запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО; Значение  $a_{jPO}$  может принимать значения 1,2,3. При  $a_{jPO} = 1$  запас элементов  $j$ -го типа пополняется периодически, т.е. восстановление до первоначального уровня производится через фиксированные заранее заданные промежутки времени, называемые периодами пополнения. При  $a_{jPO} = Q$  пополнение запаса элементов  $j$ -го типа производится периодически

с экстренными доставками, т.е., помимо планового периодического восстановления запаса, допускается еще и внеплановое восстановление его до первоначального уровня, если элемент  $j$ -го типа требуется для работы РО, а запас элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО пуст. При  $\theta^0=3$  запас элементов  $j$ -го типа в ЗИП-ГО пополняется за счет ремонта отказавших элементов в специальном РО<sub>спец</sub>, (отличном от того ГО, которому придан данный ЗИП-РО);

- основной параметр стратегии пополнения запаса элементов  $j$ -го типа При  $\theta^0=2$  значение  $a^0$  является периодом пополнения запаса элементов  $j$ -го типа При  $\theta^0=3$  значение  $a_{j\theta^0}$  является средним временем ремонта одного элемента  $j$ -го типа;

$T_{j\theta^0}$  - дополнительный параметр стратегии пополнения запаса элементов. При  $\theta^0=2$  значение  $T_{j\theta^0}$  равно нулю. При  $\theta^0=3$  значение  $T_{j\theta^0}$  представляет среднюю продолжительность экстренной доставки элементов из неисчерпаемого источника пополнения.

$C^0$  - затраты на один элемент  $j$ -го типа в ЗИП-РО.

Вычисление показателя достаточности ЗИП-РО [18] производится по формуле

$$PO \sim \frac{JPO}{PO} \quad (2-63)$$

где  $PO \sim$  - показатель достаточности запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-ГО.

В зависимости от стратегии пополнения запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-ГО (т.е. в зависимости от заданного значения  $a^0$ ) показатель достаточности элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО может быть определен по следующим формулам.

В случае  $a_{jpo} = 1$  (когда пополнение запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО происходит периодически) показатель достаточности определяется из выражения [18]

$$= \sum_{k=l}^{\infty} \sum_{i=r_{ijFO}+K+l}^{\infty} \dots \quad \langle 264 \rangle$$

где

$$= a_{jpo}^{jpo} \quad (2.65)$$

Вычисления по данной формуле производится следующим образом. Первоначально рассчитывается величина [18]

$$- a_{jpo}^{jpo} \quad s_j \sim 2N_{PO}$$

где  $e_{go}$  - заданная точность вычисления показателя достаточности.

По таблицам распределения Пуассона [15]

$$F(n, a) = e^{-a} \sum_{K=n}^{\infty} \dots \quad (2.67)$$

Отыскиваются значения  $F(j_{jpo} + 2, a; \dots), F(n_{jpo} + 3, \dots)$ , до тех пор, пока в первый раз не выполнится неравенство

$$F(n_{jpo} + K^* + \dots) \quad (2.68)$$

В соответствие с найденными значениями

$F(j_{jpo} + K + 1, \dots), K = 1, 2, \dots$  определяется величина

показателя достаточности запаса элементов в ЗИП-РО [18]

$$a_{jpo}^{jpo} \sim \sum_{i=1}^{K^*} F(t_{ijpo} + \dots) \quad (2-^{\wedge})$$

В случае  $ajfQ = 2$  (когда пополнение запаса элементов  $j$ -го типа в ЗИП-РО происходит периодически с экстренными доставками) показатель достаточности определяется из выражения [18]

$$L_{jPO} = \dots, \quad (2.70)$$

где

$$a > (n_{jPO} > a_j) = e^{-\sum_{i=1}^{\infty} \gamma_i} S D' < 2^{-71}$$

$\Gamma = 1, i = K(\pi_{PO} + 1) \text{ Я}$

и

$$F = \dots \quad (2.72)$$

Для того чтобы вычислить значения функции  $G(n_{jPO}, a_j)$ , заданной суммой бесконечного ряда необходимо определить значения  $F(n_{jPO} + 1, G_j), F(2n_{jPO} + 2, a_j) \dots$  до тех пор, пока первый раз не будет выполнено неравенство

$$K(\Gamma \dots + \Gamma^*_{i\gamma}) < \dots \quad (2.73)$$

где  $\epsilon_{PO}$  - заданная точность вычисления показателя достаточности.

Где найденным значениям  $F(K - \pi + K, a)$  определяется

$$a)(n, a) = \dots \quad (2.74)$$

Таким образом, методики, приведенные в данной главе, позволяют определить объем ЗИП для ремонтируемых и перемонтируемых деталей ПС метрополитена при его обслуживании и ремонте а, задаваясь соответствующей структурой СОЗЭ, можно рассчитать его достаточность для заданного интервала времени и сроки пополнения.

**РАЗДЕЛ 3**  
**ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ**  
**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**  
**МЕТРОПОЛИТЕНА**

**3.1. Количественная оценка запасных элементов при эксплуатации подвижного состава метрополитена**

Восстановление работоспособности или исправности технических объектов в ходе их эксплуатации или ремонта связано с проведением операций по управлению техническим состоянием (ОПУТС), при которых улучшается качество работы технического объекта, т.е. возрастает уровень его безотказности. Сами операции носят характер замен или регулировок. Для современных объектов характерно использование типовых элементов замены (ТЭЗ), среди которых имеются и неремонтируемые. Вместе с тем сложные технические системы содержат также и органы регулировки, которые должны обеспечить, с одной стороны, взаимозаменяемость ТЭЗ, а с другой - исключить часть замен, что может оказаться целесообразным по экономическим причинам. Отсюда следует, что задача определения числа запасных элементов (ЗЭ) применительно к восстановлению по состоянию является частью комплексной задачи оценки общего числа ОПУТС, которое послужит основой для выделения части, связанной с заменами, т.е. с определением числа ЗЭ. Помимо этого, число запасных элементов должно быть выбрано с учетом обеспечения требуемых показателей эффективности процесса восстановления [90].

Физическую модель эксплуатации по состоянию и проводимые при этом восстановления можно представить так. Техническая система состоит из  $N$  ТЭЗ. Во времени техническое состояние каждого ТЭЗ изменяется случайным образом, независимо от технического состояния остальных

ТЭЗ. Обслуживающий персонал получает информацию о техническом состоянии на основе результатов измерения параметров  $X_j(t)$ ,  $j = X, M$

причем для каждого из измеряемых параметров, помимо границы области работоспособности  $F$ , внутри области работоспособности определено оптимальное значение  $I < \varepsilon$ . Вычисления значения  $I$  производится по различным алгоритмам в зависимости от того какой математической моделью описывается изменение технического состояния во времени и какой выбран показатель оптимизации.

Обозначим область  $[I, p]$ . При контроле производится сравнение текущего результата измерения параметра  $X(I)$  с величинами

$I$  и  $F$ . Если  $X_j(t) > F$ , то  $j$ -и ТЭЗ считается отслужившим и заменяется

новым. Если  $X_j(t) < I$ , то никаких работ по управлению техническим

состоянием не производится. Если  $I < X_j(t) < F$ , то считается, что техническое состояние  $j$ -го ТЭЗ нуждается в улучшении и может быть выполнено заменой ТЭЗ либо его регулировкой. Улучшение технического состояния при помощи регулировок обеспечивается с вероятностью  $q$ , а при помощи замены  $(1-q)$ . Регулировка может быть выполнена немедленно, а замена - в случае, если имеется запасной ТЭЗ. Любая операция по управлению техническим состоянием приводит к простоям системы [87].

Введем следующие обозначения средних времен простоя:  $C_j$  - при регулировке;  $C_2$  - при замене в работоспособном состоянии;  $C_3$  - при замене устранения отказа,  $C_4$  - запаздывания из-за доставки.

Для того чтобы установить режим рассматриваемого процесса восстановления обозначим вероятность отказа через  $P_p$ , а вероятность

того, что результат измерения будет в области  $I < X \cdot f < F$ , - через  $R_{г}$

Для большого класса технологических систем, рост показателя эффективности которых обусловлен сокращением простоев, распространенным показателем качества процесса эксплуатации и ремонта является величина удельных затрат - математическое ожидание простоя на одно восстановление [90]. При введенных обозначениях она будет иметь вид

$$C = \frac{J(C_3 + C_4) + \frac{1}{\rho_{г}} [C_1 + (1 - \rho_{г})(C_2 + C_4)]}{\gamma} \quad (3.1)$$

Задача заключается в том, чтобы оценить общее число ОПУТС и выделить число ЗЭ с учетом их влияния на показатель эффективности системы восстановления  $C$ . Поскольку техническое состояние одного ТЭЗ не зависит от другого, расчеты, возможно производить только для  $j$ -го ТЭЗ.

Сценка числа ОПУТС, необходима для обеспечения эксплуатации объекта на интервале  $[0, t]$ ,  $\rho_{г}$  случая восстановления работоспособности после отказа  $X$ , с заданной гарантийной вероятностью  $1 - a$  ( $1 > a > 0$ ). Она определяется из выражения [15]

$$n(t) = -\frac{t}{T} + \frac{U_a}{\sqrt{2}}, \quad (T \cdot L) \quad (3.2)$$

где  $T$  - среднее время между отказами;

$(U_a)^2$  - дисперсия времени между отказами;

$U_a$  - квантиль нормального распределения.

Если восстановительные работы производятся с учетом уровня  $I \cdot X \cdot f > F$ , то в выражение (3.2) необходимо подставить величины

и  $O^{\wedge}ж$ , которые отличаются от  $\Gamma$  и  $a$ . Эти величины представляют собой соответственно среднее значение времени попадания в область  $P^*$  и его дисперсию. Способы их определения зависят от вида случайного процесса, описывающего изменения технического состояния во времени: для гауссовских, марковских процессов эти характеристики могут быть определены аналитически, для более сложных - на основе моделирования.

Число ОПУТС, необходимое для обеспечения восстановления, с учетом уровня  $i$ , определится из выражения [90]

$$y(t) = - + U_a^{-\wedge} \cdot \frac{t_{zm} a \cdot y T t}{y^2} \quad (3.3)$$

Целесообразность разделения общего числа ОПУТС  $n$  (0 на число

замен и число регулировок зависит, в частности, от соотношения  $C_j$  и

Пусть  $C_j - fC_j + C_{<} = \xi > 0$  Тогда (3.1) примет вид

$$C = (C_3 + C_4) + \dots - [C_1 - C_2(1 + O)]. \quad (3.4)$$

Тогда как (3.1) линейно возрастает по  $q$ , то минимум  $C$  достигается при  $q=0$ . При  $C_j - (C_2 \wedge C \wedge < 0$  минимум достигается при  $q=l$ . Отсюда следует что при наиболее эффективным способом управления техническим состоянием является замена В этом случае все операции по изменению технического состояния осуществляется только заменой, а число запасных элементов определяется только необходимостью замены при фиксации отказа

Если то управление в работоспособном состоянии целесообразно вести ТОЛЬКО с ПОМОЩЬЮ регулировок. При  $C_j = C_2 \wedge 4$  способы управления техническим состоянием регулировкой или заменой с точки зрения минимума среднего времени простоя равнозначны

Если выбран способ управления техническим состоянием с помощью регулировок, то все оценки ЗЭ совпадают со случаем

При выборе способа управления заменой оценки ЗЭ совпадают с оценкой для случая  $C_j > C_2 + C_4$ . Если в практике эксплуатации существует вероятность восстановления регулировкой  $q > 0$ , то оценка общего числа ЗЭ определится из выражения [90]

$$\langle\langle DO = \langle\langle i(0 \cdot 1 - ? \left[ 1 - \frac{P_F}{P_{r^*}} \right] \rangle \rangle \quad (3.5)$$

Для случая  $\hat{\lambda} \leq 9$ ,

$$\langle\langle g(0 = \langle\langle i(0 - \quad (3.6)$$

При  $\hat{\lambda} = 7$

$$\langle\langle DO = \langle\langle ! (0 \langle \langle \quad (3.7)$$

Таким образом, исходными данными для числа ЗЭ являются средние времена простоя  $Q$ , характеристики безотказности ТЭЗ и вероятность восстановления регулировкой  $q$ . Значения вероятностей  $P_r$ ,  $P_s$ , средних времен  $T$  и  $T_r^*$ , а также дисперсии  $\sigma^2$  и рассчитываются с помощью метода статистических испытаний при моделировании процесса восстановления.

Если процесс изменения технического состояния может быть аппроксимирован марковским процессом, то эти значения определяются аналитически.

Последовательность операций по оценке числа запасных элементов, достаточных для обеспечения процесса эксплуатации по состоянию, представлена в *виде* алгоритма (рис. 3.1).

Блок 1 обеспечивает ввод исходных данных в виде затрат  $C_j$ ,

1.1. В блоке 2 проверяется соотношение между  $C_j$  и  $C^+$ . Если  $C_j > C^+$ , то выбирается  $q=1$  (блок 3). При обратном знаке неравенства между  $C_j$  и  $C^+$  выполняется операция блока 4 ( $q=0$ ). Если  $C_j = C_2 + C_4$ , то в блоке 5 уточняется значение  $q$ . Оно может быть выбрано из условия  $1 > q > 0$ . При выбранном значении  $q$ , структуре ограничений (блок 7) и данных о безотказности (блок 8) в блоке 6 определяются величины  $P_p$  и  $P_p^*$ , с использованием которых в блоке 9 вычисляется величина среднего простоя. Она необходима либо для того, чтобы при сравнении с допустимым значением  $C_{доп}$  (блок И) выяснить, согласуются ли требования по готовности с возможностями системы эксплуатации, либо если таких требований не задано, определить достигнутый уровень. Если  $C > C_{доп}$ , то возможности системы эксплуатации не согласуются с требованиями по готовности. Необходимо (блок ТО) либо улучшить характеристики безотказности (блок 8), либо уменьшить затраты на простой  $C_j$  (блок 1). Если  $C < C_{доп}$  или требования по готовности не задано, то в блоке 12 производится расчет общего числа ОПУТС на основе (3.5) или (3.6). Полученное значение  $n(t)$ , а также найденные ранее значения  $q$ ,  $P_p$ ,  $P_p^*$  используются в блоке 13 для расчета числа запасных элементов на основе (3.6).

На основании данной методики по расчетным данным за время проведения опытной эксплуатации вагонов Уйрьковского метрополитена было определено количество лимитирующих элементов, от которых

отрабатывается их диагностическую информацию в виде признаков проявления их ненадежной работы

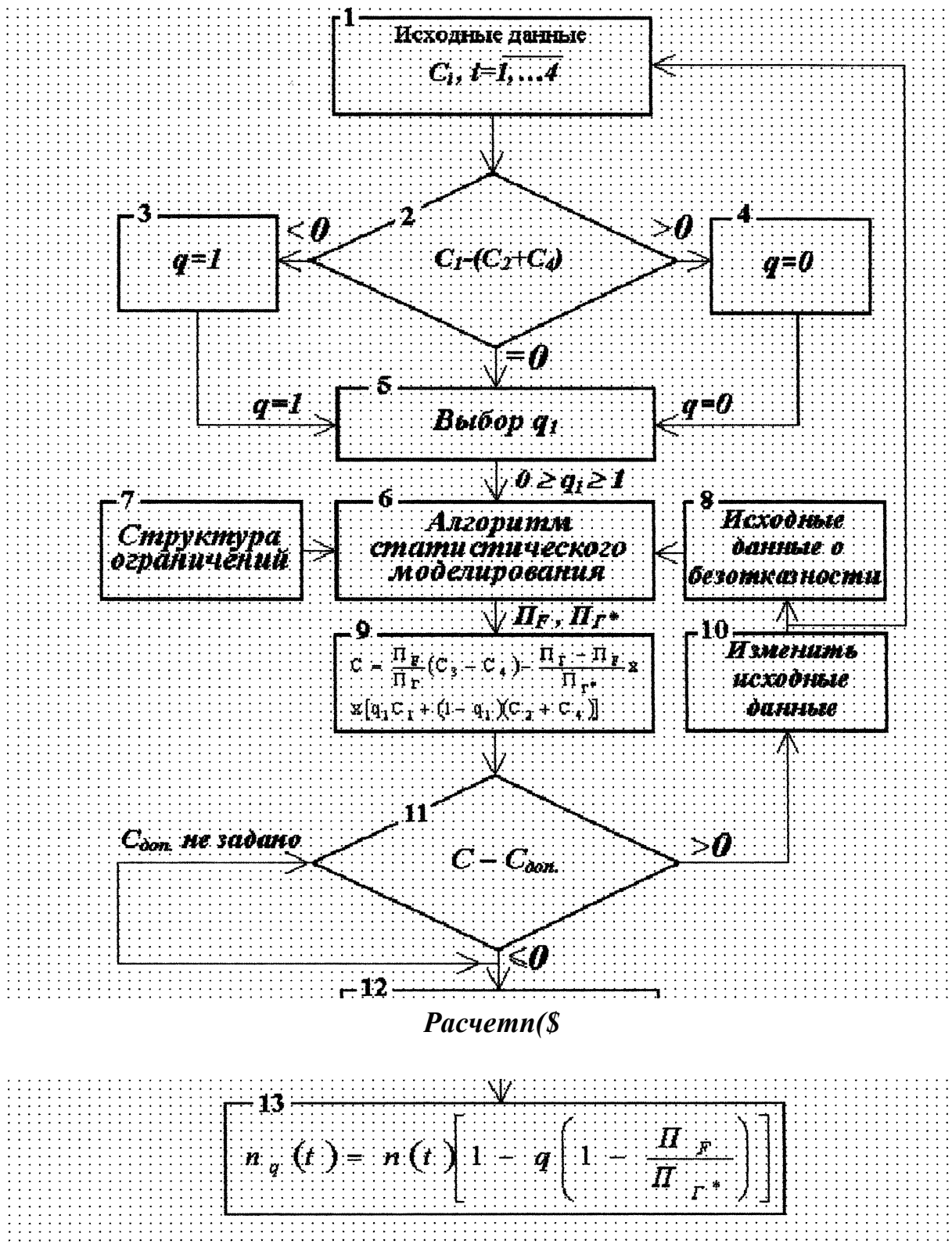


Рисунок 3.1 - Алгоритм оценки числа запасных элементов

## 1.2. Определение диагностических весов признаков и диагностической ценности обследования ПС метрополитена

В задачах диагностики состояние системы  $D$  часто описывается с помощью комплекса, каких либо признаков  $k^k k^k y - k^k j$  -ку [5].

Во многих алгоритмах диагностирования (распознавания) удобно характеризовать систему параметрами  $x_j$ , образующими  $v$ -мерный вектор или точку в  $v$ -мерном пространстве:

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, X_n \quad (3.8)$$

В большинстве случаев параметры  $x_j$ , имеют непрерывное распределение. Например, пусть  $x_j$  параметр, выражающий температуру за турбиной. Предположим, что соответствие между параметром  $x_j$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и трехразрядным признаком  $k_j$  таково

	$< 450^{\circ}\text{C}$
$x_j$	450-55СГС
	$> 550^{\circ}\text{C}$

В данном случае с помощью признака  $k_j$  получается дискретное описание, тогда как параметр  $x_j$  дает непрерывное описание. Необходимо отметить, что при непрерывном описании обычно требуется значительно больший объем предварительной информации, но описание получается более точным. Если, однако, известны статистические законы распределения параметра, то необходимый объем предварительной информации значительно сокращается.

В задачах технической диагностики возможные состояния системы (диагнозы) считаются известными. Поэтому для определения количества дискретных или аналоговых диагностических параметров необходимо знать основные вероятностные характеристики этих параметров в одном или нескольких диагнозах, которые они имеют на данный момент времени.

Для этих целей можно воспользоваться широко распространенным и несложным статистическим методом распознавания на основе критерия Байеса [5]. Если имеется диагноз  $D$  и простой признак  $k$ , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления событий (наличие у объекта состояния  $D$  и признака  $k$ ) определится

как

$$P(P.k) = P(D.-)P(k./D.) = P(k)P(D./k.). \quad (3.9)$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса

$$P(D./k) = \frac{P(k)P(D./k)}{P(k)} = P(D./k) \quad P \ll$$

где  $P(D./k)$  - вероятность диагноза определяемая по статистическим данным или априорная вероятность диагноза;

$P(k./D.)$  вероятность появления признака  $k_j$  у объектов с состоянием  $D_j$ ;

$P(k)$  - вероятность появления признака  $k$  во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта

Так, если предварительно обследовано  $N$  объектов и у  $2V_j$  объектов имелось состояние то

$$P(D_i) = \frac{l}{N} \quad (3.11)$$

Если среда  $M$  объектов, имеющих диагноз у  $N$ у появился признак  $k$  то

$$P(k_j / D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (3-12)$$

Пусть из общего числа  $N$  объектов признак  $k_j$  был обнаружен у  $N_j$  объектов, тогда

$$P(D_i) \quad (3.13)$$

В равенстве (3.10) значение  $P(P^{\wedge} / k$  есть вероятность диагноза после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака  $k_j$  (апостериорная вероятность диагноза).

Количественное определение диагностической ценности признаков и комплексов признаков может быть проведено на основании теории информации. Главный принцип, используемый в этом, состоит в следующем: диагностическая ценность признака определяется информацией, которая выносится признаком в систему состояний.

Пусть имеется система  $D$ , которая находится в одном из  $n$  возможных состояний  $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Условимся теперь называть эту систему "системой диагнозов", а каждое из состояний диагнозом. В большинстве случаев непрерывные различные состояния системы представляются совокупностью эталонов (диагнозов), причём выбор числа диагнозов часто определяется заданными исследованиями. Распознавание

состояний системы  $D$  осуществляется путём наблюдения за другой, связанной с ней системой, системой признаков.

Будем называть простым признаком результат обследования, который может быть выражен одним из двух символов или двоичным числом (например: 1 или 0; "да" или "нет"; и т.д).

Если  $k_j$  простой двухразрядный признак, то два его состояния будем обозначать:  $k_j$  - наличие признака;  $\bar{k}_j$  - отсутствие признака. Простой признак может означать наличие или отсутствие измеряемого параметра в определённом интервале; он может иметь и качественный параметр (например, положительный и отрицательный результат испытаний, и т.п.)

Если в результате обследования выявлено, что признак  $k_j$  имеет для данного объекта значение  $k_{js}$ , то это значение будем называть реализацией признака  $k_j$ . Обозначая её  $k_j^*$ , будем иметь

(3.14)

В качестве диагностического веса реализации признака  $k_j$  для диагноза  $D$  примем

$$\frac{P(D|k_j^*)}{P(D)} \quad (3.15)$$

где  $P(D|k_{js})$  - вероятность диагноза  $D$  при условии, что признак  $k_j$  получил значение  $k_{js}$ ;

$P(D)$  - априорная вероятность диагноза

С точки зрения теории информации величина  $Z_j(k_j^*)$  представляет собой информацию о состоянии  $D$ , которой обладает состояние признака  $k_{js}$  ■

Если вероятность состояния  $D_i$  после того, как стало известно, что признак  $k_j$  имеет реализацию в интервале  $s$ , увеличилась [ $P(D_i|k_j) > P(D_i)$ ], то  $Z(k_j|D_i) > 0$ , т.е. диагностический вес данного интервала признака для данного диагноза положителен. Если наличие параметра в интервале  $s$  не изменяет вероятности диагноза, то  $Z(k_j|D_i) = 0$ , так,  $Y_{aKP}(D_i|k_j) = P(D_i)$ .

Диагностический вес интервала признака  $s$  по отношению к диагнозу  $D_i$  может быть отрицательным (отрицание диагноза). Диагностический вес наличия признака  $k_j$  в интервале  $s$  можно записать в виде, более удобном для конкретных вычислений [5]

$$\frac{P(k_j|D_i)}{P(k_j)}$$

&lt;sup&gt;316&lt;/sup&gt;

где  $P(k_j|D_i)$  - вероятность появления интервала  $s$  признака  $k_j$  для объектов с диагнозом  $D_i$ ;

$P(k_j)$  - вероятность появления этого интервала у всех объектов с различными диагнозами

Простой признак  $k_j$  может иметь две реализации:  $k_{j1}$  и  $k_{j2} = k_{j1}$ .

В связи с этим можно говорить о наличии или отсутствии признака  $k_j$ .

Диагностический вес наличия признака  $k_j$  для диагноза  $D_i$  равен

$$Z(k_j|D_i) = \log_2 \frac{P(k_j|D_i)}{P(k_j)} \quad (3-17)$$

Диагностический вес отсутствия признака равен

$$Z(\bar{k}_j|D_i) = -\log_2 \frac{P(\bar{k}_j|D_i)}{P(\bar{k}_j)}. \quad (3.18)$$

Учитывая соотношения

$$P(\bar{k}_j) = 1 - P(k_j), \quad (3-19)$$

и подставляя их в (3.18) будем иметь [5]

$$v < 7, \dots \quad (3.21)$$

№ формулы (3.21) вытекает, что  $Z_{D_i}(k_f)$  и  $Z_{D_i}(k_j)$  всегда имеют разные знаки.

Необходимо отметить, что если признак  $k_j$  является случайным для данного диагноза, т.е.  $P(\wedge/D) = P\{k_j\}$ , то оба диагностических веса равны нулю.

Диагностический вес той или иной реализации признака не даёт представления о диагностической ценности обследования по данному признаку. Например, при обследовании по простому признаку может оказаться, что его наличие не имеет диагностического веса, тогда как его отсутствие чрезвычайно важно для установления диагноза [5].

Условимся считать диагностической ценностью обследование по признаку в установлении диагноза  $D$  величину информации, вносимую всеми реализациями признака в установлении диагноза  $D$

Для  $n$ -разрядного признака [5]

$$Z_{D_i} < k_j > = \sum_{s=1}^n Z_{D_i} (A_s) \quad (3.22)$$

Диагностическая ценность обследования учитывает все возможные реализации признака и представляет собой математическое ожидание величины информации, вносимой отдельными реализациями.

Так как величина  $Z_{D_i} (k_j)$  относится только к одному диагнозу  $D_i$ , то будем называть её частной диагностической ценностью обследования по признаку  $k_j$  ■

Величина  $Z_0(kj)$  может быть записана в трёх эквивалентных формулах [5]

$$Z^k Z = \sum_{s=1}^m \quad (3.23)$$

$$Z_4(kj) = z \sum_{s=1}^m \quad (3.24)$$

$$Z^k Y = \sum_{s=1}^m PQc^D o^P Wk^P Qij. ')- \quad (3.25)$$

Диагностическая ценность обследования для простого признака будет [5]

$$Z_{s,(kj)} - S P(k, ZDrtozSP(k^DyP(k,s) + \quad , \quad (3.26)$$

$$\wedge \log M/W$$

В задачах диагностики чрезвычайно сложным и существенным оказывается выбор наиболее информативных признаков для описания состояния объекта

Поэтому диагностическая ценность обследования является той мерой информации, по которой, на основании эксплуатационных параметров и статистических данных по результатам проведения испытаний, можно определить характеристики ПС метрополитена и его узлов, а также выявить дефекты или неисправности в начальной стадии, при которой еще не проявляются отрицательные последствия для надежности или работоспособности изделия.

### 1.3. Расчет ЗИП для подвижного состава метрополитена

По методике приведенной в разделах 2.3, 2.4, 3.1 и 3.2 был проведен расчет элементов ЗИП для подвижного состава метрополитена

В соответствии с известным определением вероятность безотказной работы и вероятность отказа объекта являются взаимно противоположными событиями [9].

Следовательно сумма их вероятностей равна 1, т.е.

$$P_s(t) + P_r(t) = 1 \quad (3-27)$$

С другой стороны вероятность безотказной работы определяется как [28]

$$P_s(t) = e^{-At}, \quad (3.28)$$

где  $A$  - интенсивность отказов деталей объекта

Отсюда

$$A = -\ln(P_s(t)), \quad (3.29)$$

или

$$A = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{P_s(t)}. \quad (3.30)$$

Поскольку рассмотренная в 3.2 диагностическая ценность признаков определяется информацией, которая соответствует отказам деталей во время эксплуатации то в настоящей работе предлагается для определения интенсивности отказов деталей и узлов подвижного состава метрополитена использовать эти значения диагностической ценности весов и реализаций признаков [5], т.е.

$$A = Z_{D1}(\hat{\cdot}). \quad (3.31)$$

Исходя из этого была составлена программа на языке Бейсик. На основании статистических данных, собранных в эксплуатации были определены качественные и количественные характеристики отказов

лимитирующих узлов и деталей вагонов метрополитена, на основании которых составлены системы диагнозов и рассчитаны признаки отказов.

Для этого были выбраны следующие системы диагнозов:

Д1 - отказавшее оборудование вагонов метрополитена в неплановом порядке заменяется имеющимися запасными элементами;

Д2 - - отказавшее оборудование вагонов метрополитена в плановом порядке заменяется имеющимися запасными элементами;

Д3 — отказавшее оборудование вагонов метрополитена ожидает замены из-за отсутствия запасных элементов;

Для этих систем в качестве основных признаков для перемонтируемых объектов были выделены

К1 - электровакуумные изделия;

К2 - тормозная колодка;

К3 - детали механизма автосцепки;

К4 - крепежные изделия (метизы);

К5 - смазочные материалы;

К6 - катушки электропневматических вентиляей;

К7 - обшивка салона;

КВ - накладка токосъема (полоз);

К9 - щетки для тяговых электродвигателей

К.10 - контакты реле и контакторов.

Аналогичным образом были выделены признаки для ремонтируемых объектов вагонов метрополитена

В системе Д1 было обследовано 116 объектов, в системе Д2 - 127 объектов, в системе Д3 - 142 объекта.

Количество единичных состояний по признакам в диагнозе Д1 распределилось следующим образом: К1=28; К2=22; К3=34; К4=31; К5=24; К&=11; К7=9; КВ=43; К9=54; К10=37.

Количество состояний по признакам в диагнозе Д2: К1=16; К2=32; К3=24; К4=13; К5=25; К6=18; К7=13; К8=11; К9=33; К10=17.

Количество состояний по признакам в диагнозе Д3: К1=6, К2=12; К3=10; К4=23; К5=12; К6=9; К7=19; К8=21; К9=36; К10=25.

По полученным данным были определены признаки, имеющие наибольший вес и значимость при отказе в работе на подвижном составе.

В качестве временного интервала безотказной работы было принято время между проведением подвижному составу ТР-1, которое составило  $t = 1000$  час. (с учетом работы каждого состава в течение 14 час. в сутки). Отсюда интенсивность отказов, час<sup>-1</sup>, определялась как

$$L = \dots \quad (3.32)$$

Поток отказов определялся как

$$L = y, yL, \quad (3.33)$$

где  $N_o$  - общее количество составов, которые ежесуточно находятся в эксплуатации;

$N_j$  - количество однотипных отказывающих деталей на подвижном составе;

$L_i$  - интенсивность отказов деталей.

Среднесуточное количество составов, которые эксплуатируются на Хэлодногорско-Заводской линии, составляет 16 поездов/сутки. В каждом составе находится 6 вагонов. Отсюда среднесуточное количество эксплуатирующихся вагонов составит

$$N_o = 16 \cdot 6 = 96 \text{ вагонов/сутки.}$$

В расчетах был принята гарантированная вероятность работы подвижного состава равная

$$L(0 = 0,95).$$

Среднее число запасных элементов ЗИП отфеделялось из выражения

$$n_{\text{ср.}} = \sqrt{T}, \quad (3.34)$$

где в качестве  $T$  было принято время между техническими обслуживаниями ТО-2, которое составляет 33бчас. (т.е. 1 раз в две недели при работе 14 час в сутки).

Окончательное количество элементов, которые должны находится в ЗИЛе ( ) рассчитывалось с учетом коэффициента ЗИП ( $K_z$ ), который определялся по методике изложенной в 2.4. Кроме того, на отдельные лимитирующие, быстро расходуемые детали для оперативного шинирования и пополнения ЗИП обслуживающему персоналу были составлены номограммы

На основании проведенных расчетов определен перечень элементов, которые должны находится в ЗИП Расчетные данные сведены в таблицы 3.1, 3.2 и 3.3, а также рассчитаны номограммы для определения их количественного значения (одна из них для определения необходимого количества щеток тяговых двигателей приведена на рис. 3.2).

### 3.4 Расчет достаточности ЗИП для ПС метрополитена

На основании методики, приведенной в 2.5, проведем расчет достаточности ЗИП, приняв за основу структуру СОЗЭ-5, как наиболее соответствующую организации содержания ПС метрополитена По установленной технологии в Харьковском метрополитене на технические обслуживания ТО-2, ТО-3 и текущий ремонт ТР-1 ежесуточно ставятся 5 составов ( $S=5$ ). Согласно анализа технического состояния электрооборудования в реостатных контроллерах ПС наиболее массово выходят из строя следующие элементы

1. изолятор кулачкового элемента КЭ-42 управления (выработка);



Таблица 3.1- Диагностическая ценность информации по отказам ремонтируемых узлов ПЗ метрополитена

<i>Системы диагнозов:</i>				
D1 - Отказы оборудования подвижного состава устраняются на неплановом ремонте				
D2 - Отказы оборудования подвижного состава устраняются на плановом ремонте				
D3 - отказавшее оборудование ожидает замены из-за отсутствия запасных частей				
Признаки:				
Наименование оборудования	№ признака	Системы диагнозов		
		D1	D2	D3
1. Эл лампочки	К1	28	16	6
2. Торм. колодка	к2	22	32	12
3. Детали автосцепки	к3	34	24	10
4. Крепежные изделия	к4	31	13	23
5. Смазочн. материалы	к5	24	25	12
6. Катушки ЭПК	кб	11	18	9
7. Обшивка салона	к7	9	13	19
8. Накладка токосъема		43	11	21
9. Щетки для эл двиг.	к9	54	33	36
10. Контакты реле	кЮ	37	17	25
Количество облс. вагонов	ед.	116	127	142
Вероятности каждого диагноза		0,3013	0,3299	0,3688

Продолжение таблицы 3.1

Система диагнозов D1					
Признак	PCVD,)	W	ZDIOQ)	Z'niCk;)	
к1	0,2414	0,8942	-0,3985	0,0658	
к2	0,1897	0,1458	-0,3034	0,0016	
к3	0,2931	0,7307	-0,5004	0,0586	
к4	0,2672	0,6188	-0,4486	0,0388	
к5	0,2069	0,3850	-0,3344	0,0118	
к6	0,0948	-0,0578	-0,1437	0,0001	
к7	0,0776	-0,4569	-0,1165	0,0069	
к8	0,3707	0,9282	-0,6682	0,1203	
к9	0,4655	0,5431	-0,9038	0,0666	
кЮ	0,3190	0,6364	-0,5542	0,0512	
Система диагнозов D2					
Признак	p(m>			Z'o/ki)	
к1	0,1260	-0,0438	-0,1943	0,0001	
к2	0,2520	0,5556	-0,4188	0,0296	
к3	0,1890	0,0975	-0,3022	0,0007	
к4	0,1024	-0,7656	-0,1558	0,0294	
к5	0,1969	0,3131	-0,3163	0,0075	
к6	0,1417	0,5220	-0,2205	0,0134	
к7	0,1024	-0,0571	-0,1558	0,0001	
к8	0,0866	-1,1694	-0,1307	0,0648	
к9	0,2598	-0,2981	-0,4341	0,0122	
кЮ	0,1339	-0,6163	-0,2073	0,0249	

Окончание таблицы 3.1

<b>Система диагнозов D3</b>					
Признак	WP <sub>i</sub>	2 $\sigma$ <sub>z(k)</sub>	2 $\sigma$ <sub>z(k<sub>i</sub>)</sub>	$\hat{c}_z(ki)$	
K1	0,0423	-1,6199	-0,0623	0,0641	
к2	0,0845	-1,0205	-0,1274	0,0455	
к3	0,0704	-1,3266	-0,1054	0,0693	
к4	0,1620	-0,1036	-0,2549	0,0007	
к5	0,0845	-0,9068	-0,1274	0,0346	
к6	0,0634	-0,6390	-0,0945	0,0114	
к7	0,1338	0,3293	-0,2072	0,0053	
к8	0,1479	-0,3975	-0,2309	0,0108	
к9	0,2535	-0,3336	-0,4218	0,0150	
кЮ	0,1761	-0,2210	-0,2794	0,0039	
<b>Общая диагностическая ценность обследования</b>					
Признак	P(k>)				
K1	0,1299		0,0435		
к2	0,1714		0,0271		
к3	0,1766		0,0435		
к4	0,1740		0,0217		
к5	0,1584		0,0188		
к6	0,0987		0,0087		
к7	0,1065		0,0041		
к8	0,1948		0,0616		
к9	0,3195		0,0296		
кЮ	0,2052		0,0251		

Таблица 3.2 - Диагностическая ценность информации по отказам ремонтируемых узлов ГС метрополитена

<b>Системы диагнозов:</b>				
D1 - Отказы оборудования подвижного состава устраняются на неплановом ремонте				
D2 - Отказы оборудования подвижного состава устраняются на плановом ремонте				
D3 - отказавшее оборудование ожидает замены из-за отсутствия запасных частей				
<b>Признаки:</b>				
Наименование оборудования	№ при знака	Системы диагнозов		
		D1	D2	D3
1. Механизм откр. и закр. дверей	К1	13	25	3
2. Контактторы	к2	7	18	2
3. Реле	к3	27	31	11
4. Вилка карданной муфты	к4	21	17	3
5. Электродвигатель компр.	к5	5	7	14
6. Реверсор	к6	7	4	8
7. Серводв.реостатн. контроллер	к7	3	6	2
8. Переключатель положений	к8	6	8	9
9. Аппаратура защиты	к9	28	27	7
10. Электронные блоки	кЮ	36	23	15
Количество обл. вагонов	ед.	96	74	52
Вероятности каждого диагноза		0,4324	0,3333	0,2342

Продолжение таблицы 3.2

<b>Система диагнозов D1</b>					
Признак	$W_{Di}$	$Z_{D1OQ}$	$Z_m(k_i)$	$Z'_{Di}(k)$	
К1	0,1354	-0,4477	-0,2099	0,0126	
к2	0,0729	-0,7381	-0,1092	0,0184	
к3	0,2813	-0,1442	-0,4764	0,0030	
к4	0,2188	0,2442	-0,3561	0,0053	
к5	0,0521	-1,1691	-0,0772	0,0363	
к6	0,0729	-0,2311	-0,1092	0,0016	
к7	0,0313	-0,6650	-0,0458	0,0059	
к8	0,0625	-0,7291	-0,0931	0,0151	
к9	0,2917	0,0626	-0,4975	0,0005	
кЮ	0,3750	0,1699	-0,6781	0,0055	
<b>Система диагнозов D2</b>					
Признак	$P(k/D_2)$	$Z_{D2}(kO)$	$Z_{iD2}(k_i)$	$Z'_{D1\&}$	
К1	0,3378	0,8713	-0,5947	0,0956	
к2	0,2432	1,0000	-0,4021	0,0805	
к3	0,4189	0,4306	-0,7832	0,0374	
к4	0,2297	0,3149	-0,3766	0,0092	
к5	0,0946	-0,3081	-0,1434	0,0038	
к6	0,0541	-0,6630	-0,0802	0,0104	
к7	0,0811	0,7105	-0,1220	0,0129	
к8	0,1081	0,0614	-0,1651	0,0002	
к9	0,3649	0,3857	-0,6549	0,0249	
кЮ	0,3108	-0,1009	-0,5370	0,0017	

Окончание таблицы 3.2

Система диагнозов D3					
Признак	$P(kj/D_3)$	$2\odot_3(ki)$	$Z_{DSOQ}$	$Z'_{D_3}(ki)$	
KI	0,0577	-1,6786	-0,0857	0,0999	
к2	0,0385	-1,6609	-0,0566	0,0616	
к3	0,2115	-0,5551	-0,3429	0,0356	
к4	0,0577	-1,6786	-0,0857	0,0999	
к5	0,2692	1,2009	-0,4525	0,1240	
к6	0,1538	0,8460	-0,2410	0,0355	
к7	0,0385	-0,3655	-0,0566	0,0020	
к8	0,1731	0,7403	-0,2742	0,0319	
к9	0,1346	-1,0529	-0,2086	0,0866	
к10	0,2885	-0,2086	-0,4910	0,0067	
Общая диагностическая ценность обследования					
Признак	$P(ki)$	$2^* \text{ Побед. 0ч}$			
KI	0,1847	0,0607			
к2	0,1216	0,0492			
к3	0,3108	0,0221			
к4	0,1847	0,0288			
к5	0,1171	0,0460			
к6	0,0856	0,0125			
к7	0,0495	0,0073			
к8	0,1036	0,0140			
к9	0,2793	0,0288			
кЮ	0,3333	0,0045			

Таблица 3.3 - йсчег элемитов ЗИП

Ниймвжван® детали	Интен-сивность отказа детали, 10 <sup>1</sup> /час	Кол-во деталей в сдам вагона, ед	Кол-во еяаэсуг. эксппуаг. вагон® на линии, ед.	Поток отказов деталей	Оеднкоп во деталей вЗИЦ ед	запаса ЗИЦ ед	йжн кол-во деталей в ЖПнаї состав, ед-
1	2	3	4	5	6	7	8
1.Эп.жмпаЖГ 60к€Ю	43,50	30	96	0,125280	43	1,2865	56
2.Эп.лампа СЦ9 (120x15)	41,60	2	96	0,007987	3	1,9067	6
3.Эл. лампаМЭ 36x60	32,80	4	96	0,012595	5	1,6400	9
4.Эп. лампа СМ26Х25	23,60	9	96	0,020390	7	1,5257	11
5.ЭдпдааЭГ-6116x32x80	29,60	32	96	0,090931	31	13045	41
6.Эпдаа ЭГ-2А 16x40x50	24,20	8	96	0,018586	7	1Д257	11
7.Эп.1Ц1ка^-2А 10x25x35	18,60	4	96	0,007142	3	1,9057	6
8.Элп¥1каСТ-2А 10x12,5x20	15,40	4	96	0,005914	2	23400	5
9.ЭшцкаЭ^-2Аа5x12,5x20	11,40	4	96	0,004378	2	23400	5



Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
23.РелеРМ-3001	25,10	17,00	96ДО	0,0410	14,00	138	20,00
24.Реле р-3150	18,30	17,00	96,00	0,0299	11,00	1,42	16,00
25-Реле Р-3100	11,60	17,00	96,00	0,0189	7,00	1,53	11,00
26.Реле Р-3000	21,50	17,00	96,00	0,0351	12,00	1,41	17,00
27.РелеР-25Б	7,40	17,00	96,00	0,0121	5,00	1,64	9,00
28. Реле РЭВ-812	12,70	8,00	96,00	0,0098	4,00	1,74	7,00
29. Реле Р-53	6,80	8,00	96,00	0,0052	2,00	234	5,00
30. Реле Р-54	430	8,00	96,00	0,0033	2,00	234	5,00
31. Реле РЭВ-825	830	8,00	96,00	0,0064	3,00	1,91	6,00
32. Реле РЭВ-811	16,20	8,00	96,00	0,0124	5,00	1,64	9,00
33. Реле РЭВ-821	10,40	8,00	96,00	0,0080	3,00	1,91	6,00
34. Регулятор давл АК-11Б	5,60	1,00	96,00	0,0005	1,00	334	4,00
35.Ярмо контактора КВЦ	18,70	2,00	96,00	0,0036	2,00	234	5,00
36. Д}тоіжит.камера конт КВЦ	31,50	2,00	96,00	0,0060	3,00	1,91	6,00
37.Щугг контактора КВЦ	28,60	4,00	96,00	0,0110	4,00	1,74	7,00

Цюдсйпнные таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
38.Тормззжя молодка	27,10	16	96	0,041626	14	1382857	20
39.Линсжум для тпа.(i/)	4,10	76	96	0,029914	11	1,421818	16
40.С^кгоіастик(к/)	2,60	210	96	0,052416	18	1351111	25
41.КрегЕжндетали (наимэн)	47,60	52	96	0,237619	80	1,265000	102
42С^дврг.юмпесофа	3,80	1	96	0,000365	1	3,240000	4
43. Тяговый двигатель	5670	4	96	0,021773	8	1,490000	12
44. Серводвигатель	2340	1	96	0,002246	1	3,240000	4
45.Предохранители	28,60	36	96	0,098842	34	1398824	45
46. Автолиты іфпейуправпен	17,40	16	96	0,026726	9	1,462222	14
47.Кюпки	3,50	11	96	0,0036%	2	2340000	5
48. Тяга тфмззной передачи	16,80	8	96	0,012902	5	1,640000	9
49Випка к^данной муфты	23,70	4	96	0,009101	4	1,740000	7
дререй	8,60	16	96	0,013210	5	1,640000	9
51.Двернаяцрпъ	3,50	16	96	0,005376	2	2340000	5
52Двфнное стекло	130	32	96	0,003686	2	2340000	5

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
53.Компрессор ЭК-4Б	1&60	1	96	0,0017856	1	3,24	4
54.Электродвигатель ДК-40В	23,40	1	96	0,0022464	1	3,24	4
55.Воздухораспределитель	27,10	1	96	0,0026016	1	3,24	4
56.Авторежим	6,80	1	96	0,0006528	1	3,24	4
57.Кран машиниста 334Э	8,10	1	96	0,0007776	1	3,24	4
58.Клапан ДВР (усл. №87)	15,80	1	96	0,0015168	1	3,24	4
59. Дверной цилиндр	18,50	16	96	0,028416	10	1,44	15
60.Пневм. редуктор №348	13,60	1	96	0,0013056	1	3,24	4
61.Автостоп	5,20	1	96	0,0004992	1	3,24	4
62.Радиостанция	9,40	1	96	0,0009024	1	3,24	4
63.Система информации	3,50	1	96	0,000336	1	3,24	4
64.Система связи с пасс.	1,60	1	96	0,0001536	1	3,24	4
65.Блок БЛПМ	27,10	1	96	0,0026016	1	3,24	4
66.Блок БИС	16,30	1	96	0,0015648	1	3,24	4
67.Блок БУМ	14,60	1	96	0,0014016	1	3,24	4

Скончание таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
68-Блок БСМ	10,60	1	96	0,001018	1	3,24	4
69.Приемные катушки АЛСН	6,50	1	96	0,000624	1	3,24	4
70. Датчик скорости	28,70	1	96	0,002755	1	3,24	4
71.Стабилизатор питания	23,8	1	96	0,002285	1	3,24	4
72.Тирист.роутятф поля	31,80	1	96	0,003053	2	2,24	5
73.Коммугационные элементы	18,60	38	96	0,067853	23	1,33	31
74.Реверсор	16,40	1	96	0,001574	1	3,24	4
75.Пфключатепь положений	23,90	1	96	0,002294	1	3,24	4
76.Реостатный контроллер	27,60	1	96	0,002650	1	3,24	4

2. пружина кулачкового силового элемента КЭ-47 (излом);
3. контакт медно-серебрянный силового элемшта КЭ-47 (выгорание);
4. редуктор реостатного контроллера (поломка).

На основании этого принимаем  $Ng=4$ . При отказе любого из этих элементов подвижной состав к эксплуатации не допускается и подлежит восстановлению. Определены интенсивности замен элементов на подвижном составе:  $L_{10-4}), 002 \setminus A_{20} = 0, 0013 \setminus A_{30} = 0, 0072 \setminus L^{\wedge} O, 0001$

Предположим, что комплект ЗИП-О поставляет для подвижного состава элементы трех типов: 1-го, 2-го и 3-го. Элементы 4-го типа в ЗИП-О не предусмотрены. Их поставляет на подвижной состав непосредственно ОФ-РО. Определены средние времена.

- доставки элементов из ОФ-РО в ЗИП-О, которые составляют  $T_{д(в)}=51$  час. при условии, что в ОФ-РО имеется необходимый элемент;

- ремонта элементов в РО 2%,  $=254$  ас. при условии, что в ЗИП-РО имеется необходимый комплектующий элемент.

Принимаем начальные количества элементов в ЗИП-О и ЗИП-РО:

$$th0 \sim "20 \sim "30 \sim 1$$

$$^1 0 \Phi \sim 1 \wedge 20 \Phi \sim \wedge 30 \Phi \sim \wedge 40 \Phi \sim 1 \bullet$$

Комплект ЗИП-РО состоит из элементов трех типов  $N_{po} \sim 3$  Принято количество элементов у-го типа по номенклатуре ЗИП-ГО /ffy ( $z=7, \dots, 4;$   $7=L-3$ )

$$m_n = 10 \text{ ед.}, \quad m_{12} = 32 \text{ ед.}, \quad m_{13} = 62 \text{ ед.},$$

$$m_{21} = 26 \text{ ед.}, \quad m_{22} = 35^{\wedge}, \quad m_{23} = 39 \text{ ед.};$$

$$m_{31} = 52 \text{ ед.}, \quad m_{32} = 35^{\wedge}, \quad m_{33} = 33 \text{ ед.}^{\wedge}$$

$$m_{41} = 12 \text{ ед.}, \quad m_{42} = 34^{\wedge}, \quad m_{43} = 54 \text{ ед.}$$

Принята интенсивность отказов элементов ЗИП-ГО, которая

составляет

$$L_2 = L_2^* = 0, 000001 \text{ ч/ж}^1.$$

Все запасы в ЗИП-РО пополняются периодически со средним периодом 500 час.

Заданы начальные количества элементов в ЗИП-РО:  $t_{пл} = 2 \text{ ед.}$ ;  
 $m_{IPO} = 1 \text{ ед.}$ ;  $i_{1,л?} = 2 \text{ ед.}$

На основании этих данных произведем расчет показателя достаточности при условии, что в течение 8 часов (установленный срок нахождения ПС на обслуживании или ремонте) отказ заданного элемента будет устранен.

Составляем исходные данные по всем комплектам ЗИП. Значения  $A_{jpo}$  определяем по формуле (2.62), а  $L_{ю\&}$  по формуле (2.54).

Таблица 3.4 - Для комплекта ЗИП-О ( $N_o = 4$ )

$I$	До	До	Пю	До
1	0,002	50	1	1
2	0,0013	50	1	1
3	0,0072	50	1	1
4	0,0001	50	1	1

Таблица 3.5 - Для комплекта ОФ-РО

$i$	ДоФ	ДоФ	ДоФ
1	0,01	25	1
2	0,0065	25	1
3	0,036	25	1
4	0,0005	25	1

Таблица 3.6 - Для комплекта ЗИП-РО ( $N_{PO}=3$ )

$J$	$A_{jPO}$	$\&JPO$	$T_{jPO}$	$t_{jPO}$
1	0,0186	1	500	12
2	0,0166	1	500	12
3	0,0178	1	500	12

Определяем показатель достаточности ЗИП-РО:

$$A_{PO} = \sum_{j=1}^3 A_{jPO} = 0,053$$

$$L_{PO} = \sum_{j=1}^3 L_{jPO} = 0,045 + 0,040 + 0,033 = 0,118$$

Следовательно показатель достаточности ЗИП-РО будет равен

$$A_{PO} = (0,045 + 0,040 + 0,033) / 0,053 = 2,23$$

Корректируем исходные данные по ОФ-РО

Таблица 3.7 - Для комплекта ОФ-РО

$I$	ДоФ	$T_{iOF}$	$P_{iOF}$
1	0,01	27,2	1
2	0,0065	27,2	1
3	0,036	27,2	1
4	0,0005	27,2	1

Определяем показатель достаточности ОФ-РО:

$$L_{OF} = \sum_{i=1}^4 L_{iOF} = 0,031 + 0,014 + 0,355 + 0,0005 = 0,4005$$

$$L_{OF} = A_{PO} = 0,053$$

Следовательно показатель достаточности ОФ-РО будет равен

$$0,37 + 0,04 = 0,41$$

Корректируем данные по ЗИП-О, сводим их в таблицу 3.8 и на основании этих величин вычисляем показатель достаточности ЗИП-О

$$L_o = 0,002 + 0,0013 + 0,0072 + 0,0001 = 0,0106$$

Таблица 3.8 - Для комплекта ЗИП-О

$I$	$A_{iO}$	До	$P_{iO}$	$P_{iO}$
1	0,002	57,5	1	1
2	0,0013	57,5	1	1
3	0,0072	57,5	1	1
4	0,0001	57,5	1	1

Поскольку длина очереди  $p=1$  то значения  $L_{iO}$  определяются из выражения

$$A_{iO} K_{iO} \quad (3.35)$$

где  $\sim A_{iO} T_{iO} \cdot \quad (3.36)$

Исходя из этого имеем

$$L_{1O} D_{1O} = 0,0059 ; L_{2O} D_{2O} = 0,0024 ; L_{3O} D_{3O} = 0,0571 ; L_{4O} D_{4O} = 0,0056 -$$

Отсюда показатель достаточности СОЗЭ будет равен

$$At = (0,0059 + 0,0024 + 0,0571 + 0,0056) / 0,106 \approx 0,74 \text{ аса.}$$

Расчетные данные вполне удовлетворяют поставленным условиям, так как замена отказавших деталей деталями из комплектов ЗИП производится за время меньшее, чем время простоя ПС на обслуживании или ремонте.

Проведенные в данной главе расчеты позволили:

- определить диагностическую ценность эксплуатационной информации и на ее основе рассчитать интенсивность отказов деталей ПС метрополитена;
- рассчитать количество деталей ПС для формирования ЗИП;
- получить номограммы для оперативного определения количества деталей в ЗИПе в зависимости от интенсивности отказов и однотипного количества этих деталей на ПС;
- выполнить и оценить количественную достаточность рассчитанного ЗИП

## РАЗДЕЛ 4

### ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### 4.1. Специфика виброакустического диагностирования подшипников тяговых двигателей ДК-116

Сущность проблемы виброакустического диагностирования состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки параметров технических состояний объекта диагностирования без его разборки в рабочих условиях по характеристикам виброакустических процессов, сопровождающих его функционирование. Таким образом при помощи виброакустического диагностирования можно получить оценку степени отклонения технического состояния объекта от нормы по косвенным признакам, а именно, по изменению свойств виброакустических процессов в механизме, зависящих от характера взаимодействия комплектующих его узлов и деталей.

Исследованиями проведенными ВНИИЖТом [84], ВНИГИ [65], МИИТом [35] показывают, что отказы тяговых двигателей, вызванные механическим воздействием (динамические нагрузки, вибрации, удары и т.д), составляют основную часть всех неисправностей подвижного состава. При этом чаще других возникают в эксплуатации отказы подшипникового узла. На преждевременный выход из строя подшипников тяговых двигателей оказывают влияние следующие факторы

- качество изготовления подшипников и точность обработки посадочных мест; точность сборки, центровка;
- качество смазок, воздействие вибрации от посторонних источников, наличие паразитных и блуждающих токов, качество обслуживания,

- способ хранения и транспортировки (бриннелирование, коррозия).

Повреждения подшипников в эксплуатационных условиях можно условно разделить на следующие группы

- разрушение от усталости материала;
- повреждение от повышенного износа.
- разрушения, вызываемые изменением зазоров и посадок между

детальными подшипниками и опорами статора или якоря;

- повреждения из-за недостаточности или прекращения подачи смазочного материала

Усталостное разрушение подшипников качения проявляется в виде выкрашивания материала дорожек колец и тел качения и может происходить из-за чрезмерно больших нагрузок или частот вращения.

Износ деталей подшипника выше допустимого, особенно тел качения и поверхности колец, приводит к увеличению радиальных зазоров, вызывающих смещение якоря двигателя

Изнашивание гнезд сепаратора происходит в результате неправильного монтажа подшипников, от действия больших осевых нагрузок, от выкрашивания дорожек качения и других причин. Наряду с изнашиванием имеются случаи усталостного разрушения сепаратора, появления трещин и разрывов перемычек и сепаратора

При некоторых условиях работы возможно проскальзывание внутреннего кольца подшипника относительно тел качения, что приводит к износу поверхностей качения.

Определенное место среди разрушений подшипников качения занимает масляное голодание, приводящее к появлению наплывов и изнашиванию тел качения, наволакиванию материала на поверхности беговых дорожек, изнашиванию сепаратора

При определении основных частот возмущения подшипников исходят от гипотезы преимущественного действия ударных возбуждающих

сил. Основные частоты возбуждения колебаний при работе и следующие [70]:

япников

частота вращения якоря

$$f_{\text{я}} = \frac{n}{60} \quad (41)$$

частота вращения сепаратора

$$f = \frac{2V_D}{\pi D} \cos^3 \alpha \quad (42)$$

частота вращения тел качения

$$f_{\text{ТМ}} = \frac{v}{\pi d} \cos^2 \alpha \quad (43)$$

частота мелькания тел качения по наружному кольцу

$$f_H = \frac{z}{\pi d} (i - \cos^2 \alpha) \quad (44)$$

частота мелькания тел качения по внутреннему кольцу

$$f = \frac{zL}{\pi d} (y \pm \cos^2 \alpha) \quad (4.5)$$

В формулах (4.1) - (4.5)  $n$  - частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $d$  - диаметр тел качения;  $D = (D_h + E)/2$  - диаметр окружности, проходящей через центры тел качения;  $D_B$  и  $R_H$  - соответственно диаметры внутреннего и наружного колец подшипника;  $\rho$  угол контакта в градусах;  $Z$  - число тел качения.

Наряду с этим в процессе эксплуатации при возникновении и с развитием повреждений элементов конструкции подшипников до определенного уровня в спектре колебаний работающего двигателя появляются дискретные составляющие, частоты которых определяются видом повреждения. Эти дефекты достаточно разнообразны: волнистость

на дорожках тел качения, повышенный зазор в обойме, овальность тел качения и колец, гранность, увеличенный зазор в гнездах сепаратора, повреждение тел и дорожек качения вследствие выкрещивания и др.

Основные частоты возбуждения, ВОЗНИКЕ из-за повреждений элементов роликовых п **№11111**пников следующие [70]:

из-за дефекта формы тел качения

$$f_1 = \frac{v}{d} \cdot n \tag{4.6}$$

из-за изменения формы внутренней дорожки

$$f_2 = \left( \frac{D+d}{D} \right)^{n-2} \cdot \frac{v}{d} \tag{4.7}$$

из-за изменения формы внешней дорожки

$$f_3 = \left( \frac{D-d}{D} \right)^{n-2} \cdot \frac{v}{d} \tag{4-8}$$

Резонансные колебания элементов п ипника могут быть получены при периодических ударах тел качения, проходящих дефектные точки дорожки на частоте вращения. Эти колебания характеризуются затухающими высокочастотными импульсами. Одним из таких резонансов является резонанс шариков, частота которого может быть определена из формулы [70]

$$f_{ш} = 0,848 \cdot \frac{E}{d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho} \tag{4-9}$$

где E - модуль упругости; ρ - удельная плотность шариков.

Помимо основных частот возбуждения, приведенных выше, в подшипниках двигателей возбуждается масса комбинационных частот; яви ихся результатом взаимодействия вращающихся и неподвижных источников колебаний, обусловленных дефектами контактируемых поверхностей.

Из-за одновременного взаимодействия нескольких дефектов возможна многократная модуляция сигналами разных частот. Так, например, дефект сепаратора возбуждает модуляционные компоненты ( $kf_H \pm nf_{cep}$ ) в окрестности гармоник частоты мелькания по наружному кольцу  $kf_H$ ; дефект внутреннего кольца возбуждает частоты взаимодействия с наружным кольцом ( $kf_H \pm nf_B$ ) и с телами качения  $k(f_B - f_{en})/2_{ш}$ . Возможны другие комбинации частот возбуждения, в том числе с якорными частотами, обусловленными неуравновешенностью механической системы

Для диагностирования по подшипникам тяговых двигателей наиболее приемлемым является метод оценки их вибрационных параметров. При этом регистрируется только один диагностический сигнал - вибрация корпуса. Исходя из этого при проведении экспериментальных исследований для извлечения из такого диагностического сигнала полезной информации были созданы определенные условия и сделаны следующие допущения:

- имитация различных наработок должна производиться путем постановок подшипников с различными зазорами и дефектами;
- при проведении испытаний износ механических узлов должен отсутствовать;
- процесс монтажа и демонтажа подшипников не должен оказывать влияния на виброактивность тягового электродвигателя.

Для проведения экспериментальных исследований на стационарном стенде испытательной станции был выбран метод моделирования технического состояния подшипника тягового двигателя в целом. Основной подход данного метода состоит в том, что в рабочих условиях процесс выхода из строя подшипников тягового двигателя складывается из разрушения нескольких элементов подшипника и одновременного развития нескольких повреждений. При этом процесс разрушения отображается на

спектрограммах изменением амплитуд целого ряда составляющих. Поэтому при проведении экспериментальных исследований было предложено оценивать степень развития деградиционных процессов в целом по подшипнику и на основании этого определять его остаточный ресурс. Такой подход характерен тем, что при потере работоспособности этого узла в эксплуатации обслуживающему персоналу безразлично, что в подшипнике вышло из строя, важно, что его необходимо заменить.

анализа спектрального состава вибраций тягового электродвигателя были определены частоты вынужденных колебаний электрохимического происхождения по каждому его узлу, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Источник вибрации	Частота вибрации, Гц
От неравномерностей сепаратора	13-26
От шероховатости внутреннего кольца	103 - 210
От шероховатости наружного кольца	165 - 330
От неровностей на телах качения	31-60
От щеточного аппарата	1950 - 3700
От магнитной составляющей	460 - 925
От неуравновешенности масс якоря	33-66
От радиального зазора	125 - 266

По рассчитанным данным вынужденных колебаний механического происхождения была определена необходимая полоса пропускания фильтра, при которой они должны четко разграничиваться. Определение полосы пропускания фильтра по частотам вынужденных колебаний механического происхождения обусловлено генерацией этих колебаний

подшипниковым узлом, который лимитирует общую надежность ТЭД. Из расчетных данных был определен частотный диапазон для исследования технического состояния по, **ЧШГ** шинкового узла, который составил 50-1350Гц.

## 4.2 Первичные преобразователи сигналов

Измерение и обработка вибрационных процессов с помощью аналого-цифровых комплексов состоят из нескольких этапов, каждый из которых преследует определенную цель.

На первом этапе проводится измерение вибрационных процессов с помощью первичных преобразователей информации (датчиков), согласующих устройств (усилителей зарядов) и запись в оперативную и долговременную память (магнитофон). Структурная схема измерений приведена на рис. 4.1. Качество диагноза зависит не только от вида измеряемых колебательных процессов, но и от режима диагностирования, мест установки датчиков, параметров измерительной аппаратуры

Основные требования к первичным преобразователям - обеспечение заданной линейной зависимости между выходным сигналом и уровнем измеряемого параметра, заданного рабочего диапазона частот, малой зависимости выходного сигнала от измерений внешних условий. Не менее важными требованиями являются малогабаритность, долговечность, надежность и универсальность.

Для замера вибрационных характеристик по **ШШ** ШПИКОВ электродвигателя ДК-116 в качестве первичного вибропреобразователя использован 3-х компонентный пьезоэлектрический акселерометр 4321 фирмы «Брюль и Кьер» [101,102].

Основные характеристики акселерометра 4321:

чувствительность по заряду  $1\text{пКл}/\text{мс}^2$ ;

чувствительность по напряжению  $-0,8\text{ мВ}/\text{мс}^2$ ;

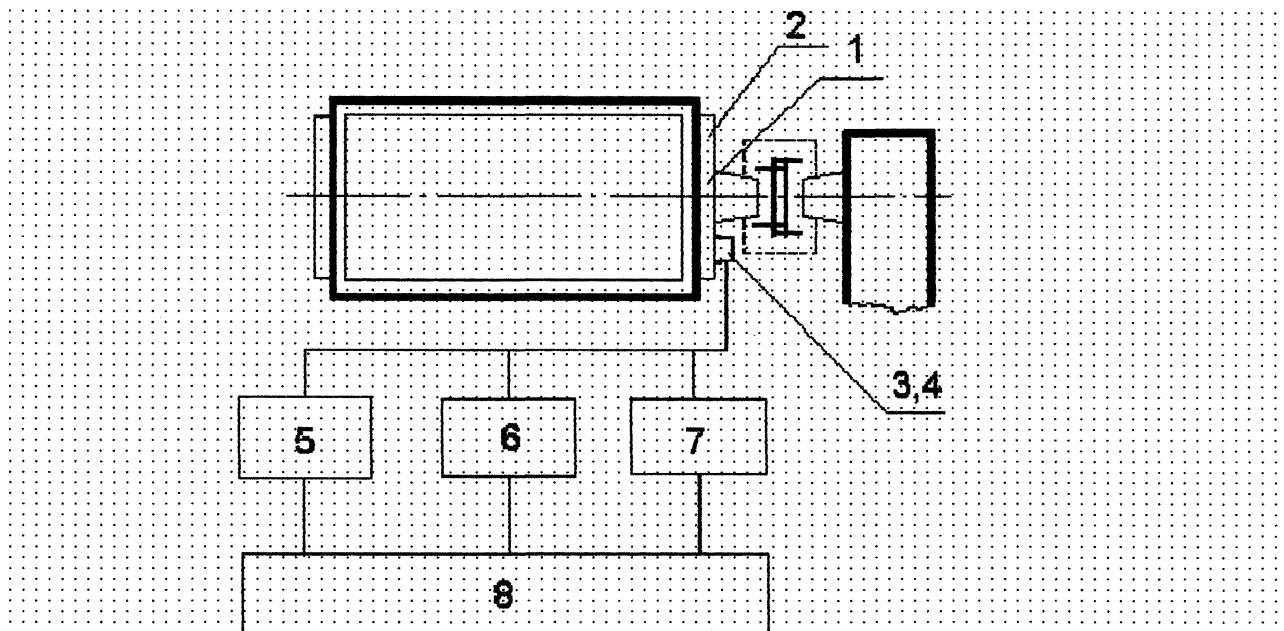
рабочий частотный диапазон -  $12\text{кГц} \pm 10\%$ ;

максимальное ускорение  $1000 \text{ *}$ ;

максимальная температура  $250^\circ\text{C}$ ;

масса  $55\text{г}$ ;

чувствительность к условиям окружающей среды - «малая».



1 - подшипник тягового электродвигателя;

2 — корпус электродвигателя ДК-116;

3 ,4 - трехкомпонентный датчик с магнитом крепления;

4 ,6,7 - усилители заряда (усилители записи/'воспроизведеЕТИя);

8 — измерительный магнитофон 7005 фирмы «Брюль и Кьер».

Рисунок 4.1

### 4.3 Согласующие устройства

Сигнал с первичного преобразователя информации (акселерометра) поступает на вход согласующего устройства, обеспечивающего согласование выходного импеданса с блоками усилительно-преобразующей аппаратуры

В качестве согласующих устройств обычно используют выносные или встроенные усилители (напряжения). Для получения сигнала, пропорционального смещению скорости или ускорению, вводят операции интегрирования сигнала с акселерометра. При однократном интегрировании сигнал пропорционален скорости, при двойном интегрировании - смещению. Вид преобразования и, соответственно, частотный диапазон определяются характером исследуемых процессов. В низкочастотном диапазоне (0-500Гц) колебательные процессы целесообразно измерять в режиме перемещения, в диапазоне средних частот (500-2000Гц) в режиме измерения скорости, а в высокочастотном диапазоне (2-20кГц и выше) в режиме измерения ускорения. Дальнейшее преобразование измерительной информации осуществляется в соответствии с требованиями к характеру информации, необходимой для постановки диапазона

Для согласования пьезоэлектрического 3-х компонентного датчика 4321 был использован сменный вибрационный блок ЧМ записи/воспроизведения ZM 0060 с встроенным усилителем заряда. Технические характеристики в связи с тем, что он входит в состав регистратора, будут приведены ниже.

#### 4.4 Регистраторы сигналов

Регистрация вибрационных сигналов производится на измерительный магнитофон с целью дальнейшей ее обработки с помощью специализированного устройства или на универсальной ЭВМ. Условно измерительной магнитофон можно разбить на два самостоятельных, функционально законченных блока, это усилитель записи/воспроизведения с встроенным усилителем заряда и непосредственно сам магнитофон как кинематический узел, включающий лентопротяжный механизм, блок головок, стабилизацию всех режимов движения магнитофонной ленты, блок питания и т.д. Как уже отмечалось выше для согласования акселерометра с регистратором был использован сменный блок магнитофона 7005 фирмы «Брюль и Къер» ZM 0060.

##### 4.4.1 Вибрационный блок ЧМ записи/воспроизведения ZM0060

Предназначен для использования с пьезоэлектрическим акселерометром и представляет собой всесторонне оснащенный частотно-модулирующий запись/вакве-воспроизводящий блок, который специально предназначен для записи широкого диапазона вибрационных сигналов, включая механические удары. Имеется возможность записи вибрационного ускорения и скорости. Блок имеет встроенный усилитель заряда позволяющий локальное или дистанционное использование акселерометра без соединительного кабеля, влияющего на тарированную чувствительность [101].

Блок ZM 0060 согласован на использование одноусиливающих акселерометров типа 4321 фирмы «Брюль-Къер», которые имеют заводскую протарированную чувствительность 1 ПкК/м сек<sup>2</sup>. При необходимости использования с другими акселерометрами необходимо

ввести поправочный коэффициент или эталонный уровень вибрации, записанный для оценки записываемых уровней.

Блок способствует записи/воспроизведению в простирающемся до ОГц в частотном диапазоне. Верхний предел общего частотного диапазона записи/воспроизведения 12,5кГц (скорость движения ленты 381 мм/с) и 1,25кГц (скорость движения ленты 38,1 мм/с). Блок ZM 0060 обеспечивает линейную фазовую характеристику в области низких частот и высокую стабильность амплитуды вне зависимости от характеристик намагничивания и параметров магнитной ленты. Следовательно этот блок эффективен при записи/воспроизведении процессов с низкими и средними частотами. В частности при записи/воспроизведении сохраняются формы волн и пиковых и среднеквадратичных значений, подлежащих исследованиям и анализу процессов. Примером таких процессов являются механические колебания и удары, статистическая и динамическая деформация, акустические шумы и разного рода кратковременные процессы. Его полная чувствительность оптимизирована для 3 дБ верхней ограничивающей частоты 16кГц при скорости ленты 381 мм/с, а с применением акселерометров типа 4321 увеличивается приблизительно до 20кГц с помощью резонансной частоты акселерометра

Передняя панель блока ZM0060 содержит переключатель режимов (калибровка, внутренний генератор, виброскорость, виброускорение, выключено), фильтр ограничивающий НЧ (0,3, 1 и 10Гц) входной акселерометр (1 - 10000 мВ/ед.), гнезда вход и выход, и индикаторы перегрузки.

#### **4.4.2 Измерительный магнитофон 7005 фирмы «Брюль и Кьер»**

Возможности магнитофона согласно технического паспорта следующие: магнитная запись механических колебаний, звука и других

процессов с их частотами от 0 до 60кГц на каждом из четырех каналов; накопление и хранение информации, подвергающейся оценке и подробному анализу при воспроизведении в лаборатории; сменные блоки записи воспроизведения; блок компандеров, позволяющий обеспечить отношение сигнал/шум превышающий 70дБ; прямой вход и выход предусилителя в каждом сменном блоке; линейная частотная характеристика во всем частотном диапазоне (0-60кГц); стандартная частотная коррекция; лентопротяжный механизм с сервоуправлением; двумя кобесбанами; с дифференциальной переданей и стабилизированным кварцевым за [102] генератором такта, гарантирующим точно определенную и стабильную скорость движения магнитной ленты; осуществляемую после записи; компенсация высокочастотной детонации, позволяющая существенно уменьшить помехи связанные с фтутстуацией магнитной ленты, вызванной механическими колебаниями, сотрясениями при записи сигнала; внутреннее устройство автоостановки и автокомпенсации помех и шумов, обусловленных склейкой магнитной ленты; закрытый прозрачной крышкой отсек позволяющий применение катушек диаметром до 180мм; устройство управления позволяющее обеспечить необходимый режим работы (воспроизведение, запись, стирание, отключение стирания, переключение скорости движения ленты в 10 раз); съемный батарейный блок, содержащий перезаряжаемые аккумуляторные элементы; сетевой источник питания и зарядное устройство [102].

## **4.5 Характерные диагностические признаки подшипников качения**

### **4.5.1 Выделение дискретных составляющих**

К этой группе следует отнести все методы, которые основаны на выделении и анализе дискретных составляющих вынужденных колебаний

либо на основных частотах возбуждения колебаний в пр; япнике, либо на частотах возбуждения, которые возникают по причине появления различных дефектов п ипника На основе этих методов возможно диагностирование местонахождения повреждения в подшипнике (внешнее, внутренние кольца, сепаратор, или тела качения).

Характерными диагностическими признаками повреждения внешнего кольца являются спектральные амплитуды на частотах, кратных частоте возбуждения.

Характерными диагностическими признаками разрушения подшипников служат характеристики импульсов, следующих с частотами прокатывания тел качения по местам выкрашивания; амплитуда импульса, отношение энергии импульса к уровню шума, амплитуды спектральных составляющих на частоте повторения импульсов и ее гармониках, выделения комбинационных частот. Для выделения этих параметров из сложного виброакустического сигнала используют спектральные и корреляционные методы

При вычислении основных частот возмущения подшипников качения исходят от гипотезы преимущественного действия ударных возбуждающих сил. Основные частоты возбуждения колебаний при работе ипников тягового двигателя ДК-116 приведены в таблице 4.1.

#### 4.5.2 Статистические методы контроля

Ко второй группе можно отнести методы диагностирования технического состояния подшипников качения в целом. В рабочих условиях процесс выхода из строя подшипниковых узлов часто складывается из разрушений нескольких элементов подшипника и одновременного развития нескольких повреждений. При этом процессе разрушения отображается на спектрограммах изменением амплитуд целого

ряда составляющих Поэтому предлагается диагностировать состояние

**III** Янников качения, в целом оценивая степень развития деградационных процессов в подшипнике и остаточный ресурс. Такой подход имеет право на существование в связи с тем, что при потере работоспособности механизма обслуживающему персоналу безразлично, что в п **III** япнике вышло из строя, важно что его надо заменить [70].

Наиболее перспективным в настоящее время является метод ударных импульсов. Подшипник качения в данном случае рассматривается как генератор случайных импульсов, следующих через неравные промежутки времени, на каждый из которых в отдельности прибор не реагирует. Характерным диагностическим признаком этого метода является отношение между максимальным и пороговым значением контролируемой величины В зависимости от соотношения между этими значениями можно различать повреждение подшипника (загрязнение или недостаток смазочного материала, перекос муфты или зубчатого колеса привода).

Существует способ диагностирования по, **III** ипников качения, основанный на статистическом анализе его вибрации. Проводится оценка статистического момента четвертого порядка - эксцесса - в 4-х частотных диапазонах вибрации п **№11111** пника

1. 3Гц - 5кГц;
2. 5 т 10кГц;
3. Ю-s- 15кГц;
4. 15-е- 20кГц.

Характерным диагностическим признаком данного метода является равенство нулю эксцесса во всех полосах частот при отсутствии дефекта (закон распределения амплитуд - Гаусовский). Начальное повреждение вызывает изменение главным образом в полосах низких частот; а более развитое повреждение в наибольшей мере влияет на высокие частоты, возвращая эксцесс снова к исходному значению в области низких частот.

Это обстоятельство обеспечивает уникальную возможность количественной оценки степени повреждения п япника, вследствие чего этот метод может быть использован для прогнозирования. Главным преимуществом этого метода является то, что он не чувствителен к изменениям скорости и нагрузкам поврежденного и ипника.

При статистической обработке непрерывных процессов анализируются свойства выборочной функции  $X(t)$  зарешетрированной на интервале времени  $OT$  называемой реализацией исследуемого процесса. Следует отметить, что анализатор спектров 2034 при статистической обработке непрерывной функции автоматически преобразует ее и выдает результат в виде спектральных отчетов.

Более концентрированную информацию о свойствах случайного процесса можно получить из моментных характеристик [15], т.е. математических ожиданий соответствующих степеней случайной функции (начальных моментов):

$$m_{\gamma} = E x^{\gamma} P, \quad (4-Ю)$$

где  $\gamma$  - порядок начального момента;

$j$  - порядковый номер (индекс) амплитудного интервала;

$X_j$  - значение случайной функции в  $j$ -м интервале;

$P_j$  - вероятность появления значения  $X$ , или степени отклонения случайной функции от ее математического ожидания (центральных моментов):

$$(4.11)$$

где  $E$  - математическое ожидание.

Совокупность моментов распределения полностью характеризует функцию плотности распределения вероятностей и, следовательно, эти

моменты можно использовать для описания изменения свойств вибрационных процессов машин и механизмов.

Наибольшее применение в задачах диагностики находят моментные функции низших порядков, которые в общем случае являются функциями времени

Начальный момент первого порядка, это математическое ожидание. Для дискретных отчетов математическое ожидание рассчитывают по формуле [15]

$$m_1 = \sum_{i=1}^n x_i P_i \quad (4-12)$$

Начальный момент второго порядка является мощностью случайного процесса, а положительный корень из среднего квадрата процесса есть среднее квадратичное значение. Мощность случайного процесса для дискретных значений рассчитывают по формуле [15]

$$m_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 P_i \quad (4-13)$$

Продолжая можно рассчитать начальные моменты более высоких порядков необходимые для расчетов центральных моментов.

Центральный момент первого порядка равен нулю

$$M_1 = 0 \quad (4-14)$$

Центральный момент второго порядка является дисперсией, а корень из дисперсии обычно называется средним квадратическим отклонением. Дисперсия для дискретных значений рассчитывают по формуле [15]

$$M_2 = a^2 = m_2 - m_1^2 \quad (4-15)$$

Центральный момент третьего порядка используют для расчета коэффициента асимметрии плотности распределения вероятностей.

где:  $m_3$  - начальный момент третьего порядка

Расчетная формула коэффициента асимметрии плотности распределения вероятности для дискретных значений выглядит [15]

$$A_3 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (4.17)$$

Центральный момент четвертого порядка требуется для расчета коэффициента эксцесса который характеризует степень отклонения плотности распределения от нормального распределения вероятностей. Центральный момент четвертого порядка для дискретных значений определяют по формуле [15]

$$M_4 = m_4 - 4m_3m_1 + 6m_2m_1^2 - 3m_1^4 > \quad (4.18)$$

где:  $m_4$  - начальный момент четвертого порядка

Расчетная формула коэффициента эксцесса для дискретных значений имеет вид [15]

$$E^{\text{ДД-3}} = \frac{M_4}{m_2^2} \quad (4.19)$$

Кроме того, используя моментные значения, можно рассчитать еще ряд параметров, характеризующих поведения вероятностной функции.

Коэффициент вариации [15]

$$V^2 = \frac{m_2}{m_1^2} - \frac{(m_1)^2}{m_1^2} \quad (д 2QJ)$$

Пикфактор амплитуды, характеризующий отклонение формы волны от синусоидальной [70]

$$F_2 = \frac{X_{\text{max}}}{\sigma} \quad (4.21)$$

где:  $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение;

$X_{\text{max}}$  - пиковое значение сигнала

Характеристики случайных процессов, приведенные выше, являются функциями времени, т.е. могут быть использованы для исследования свойств любых процессов, в том числе нестандартных, характеристики которых изменяются со временем.

#### **4.6. Вибрационные исследования подшипников 310 тяговых электродвигателей Д К-116**

##### **4.6.1. Расчетные диагностические признаки разрушения подшипников**

В соответствии с вероятностно-детерменистким подходом к разработке методов вибродиагностики, спектр вибрации в точке измерения представляется набором дискретных частотных составляю **ших**, амплитуды которых являются вибрационными признаками состояния подшипниковых узлов. Поэтому при анализе полученных спектров, прежде всего рассматривались частотные составляющие отображающие основные источники вибрации в самом подшипнике. Кроме того, спектры содержат большое число составляющих обусловленных многочисленными резонансами деталей конструкции самих электродвигателей и вибрационных шумов. Большая избирательная способность частотного анализатора 2034 позволила успешно решить задачу выделения информационных спектральных составляющих и при дальнейшем анализе сравнить их с расчетными (Таблица 4.2)

Следует отметить, что частотные составляющие обнаруженные в спектре могут незначительно отличаться от расчетных вследствие флуктуации частоты вращения якоря электродвигателя при различных нагрузках, направлениях вращения якоря, а так же разрешающей способности анализатора спектров 2034 в заданном частотном диапазоне.

Таблица 4.2 - Расчетные частоты подшипника 310 в тяговом электродвигателе ДК-116

Нагрузочные обороты ЭЛ. двигателя, мин <sup>-1</sup>	Частота вращения якоря,	Частота вращения сепаратора подшипн. Гц	Частота вращения тел качения, Гц	Частота мелькания тел качения по наружи. кольцу, Гц	Частота мелькания тел качения по внутр. кольцу, Гц
855	14,25	5,6	31,1	40,4	59,4

#### 4.6.2. Диагностические признаки разрушения подшипников в низкочастотном спектре виброскорости.

Измерение виброскорости проводилось на корпусах обоих подшипников типа 310 электродвигателя ДК-116 по часовой и против часовой стрелки. Исследована партия электродвигателей с исправными (здоровыми) подшипниками, и дефектными подшипниками, поломка которых произошла за несколько минут до разрушения. Дефектные подшипники были обнаружены в процессе проведения экспериментов случайно, без внесения искусственной неисправности. Дефект происходил в результате длительных испытаний под нагрузкой электродвигателя.

В качестве точек измерения вибрации были выбраны корпуса подшипников. Выбор корпусов подшипников в качестве точек измерения обусловлен тем, что это наиболее допустимые и информативные точки съема диагностической информации. Первоочередной задачей виброисследований являлось получение спектра вибрации корпусов подшипников для бездефектного электродвигателя. Для этого необходимо было обнаружить и выделить характерные расчетные частоты в спектре вибрации, затем пронормировать уровни выделенных частотных

составляющих и определить мощность полосовых участков спектра, где находятся выделенные диагностические признаки.

Исследования спектра вибрации подшипниковых узлов электродвигателей ДК-116 показали, что во всем исследуемом диапазоне частот наблюдается непрерывный спектр с дискретными выбросами на частотах, соответствующих расчетным. Уровни виброактивности дискретных частотных составляющих, несущих информацию о техническом состоянии подшипников, значительно превышают непрерывный спектр. Принято уровень сплошного непрерывного спектра считать акустическим шумом, а дискретные частотные составляющие использовать как диагностические признаки для выявления зависимости их уровня от наличия дефекта и степени его развития.

Исследования проводились в двух частотных диапазонах: низкочастотном (0-3200Гц) и среднечастотном (3200-12500Гц). Наиболее информативным и достаточным с точки зрения обнаружения дефекта подшипников качения спектральным методом оказался низкочастотный диапазон в полосе частот до 100Гц.

В этом частотном диапазоне спектра явно выражены амплитуды гармоник якоря (частоты кратные частоте вращения якоря:  $\Gamma_p=14\text{Гц}$ ;  $2\Gamma_p=28\text{Гц}$ ;  $3\Gamma_p=42\text{Гц}$ ;  $4\Gamma_p=56\text{Гц}$ ;  $5\Gamma_p=70\text{Гц}$ ;  $6\Gamma_p=84\text{Гц}$ ;  $7\Gamma_p=98\text{Гц}$ ).

Присутствует частота вращения тел качения  $\Gamma_{\text{тк}}=31\text{Гц}$ , частота мелькания тел качения по наружному кольцу  $\Gamma_{\text{н}}=40,5\text{Гц}$  и частота мелькания тел качения по внутреннему кольцу  $\Gamma_{\text{в}}=60\text{Гц}$  (рис. 4.2,4.3). Обнаруженные частоты спектра, хорошо согласуются с расчетными значениями (табл 4.1).

Автоспектры виброакустического сигнала трех направлений для бездефектного подшипника приведены на рис. 4.2 (направление вращения якоря электродвигателя по часовой стрелке). Из приведенных вибрационных спектральных составляющих видно, что уровни

виброскорости дискретных частотных составляющих не превышают 2,5мм/с, что соответствует норме.

Распределение спектральных гармоник якоря в вертикальном и поперечном направлениях носит экспоненциальный убывающий характер. В осевом направлении преобладает гармоника якоря (рис.4.2), что свидетельствует о двоякой жесткости якоря. Причиной двоякой жесткости являются особенности конструкции якоря или овальность шеек якоря в подшипнике.

Приведенная функция когерентности (рис. 4.3, 4.5) свидетельствует, что вибрационные спектры в окрестности третьей гармоники якоря сильно когерентны, что является признаком подшипниковых частот. В этот частотный диапазон входят дискретные частотные составляющие тел качения ( $\Gamma_{\text{тк}}=30\text{Гц}$ ) и мелькания по наружному кольцу ( $\Gamma_{\text{н}}=42\text{Гц}$ ). Бездефектное состояние подшипника подтверждается также низким уровнем мощности сигнала (не превышающим 4,5 мм/с) в частотном диапазоне ( $\Gamma=15\text{Гц}$ ) с центральной частотой на третьей гармонике якоря  $3\Gamma_{\text{р}}=42\text{Гц}$

Таким образом, получен характерный спектр виброскорости по подшипника качения типа 310, включающим три гармоники якоря и полосу шириной  $\Gamma=15\text{Гц}$  с центром на третьей гармонике якоря  $3\Gamma_{\text{р}}=42\text{Гц}$ . Уровень виброскорости в первой гармонике якоря составляет = 2,5 мм/с, а уровень мощности в полосе частот  $\Gamma=15\text{Гц}$  составляет 4,5 мм/с.

Следующим этапом исследования являлся отбор спектров с повышенным уровнем вибрации для агрегатов в предаварийном состоянии на различной стадии развития повреждения подшипника. Такие спектрограммы отбирались по данным замеров, произведенным за несколько десятков минут до разрушения подшипника в условиях эксплуатации. Момент разрушения не фиксировался, т. к. в этом случае возможно повреждение виброизмерительной аппаратуры В результате

виброобследования по, VIII ИПНИКОВЫХ узлов тяговых электродвигателей был накоплен обширный статистический материал, позволяющий при наличии различных видов дефектов определять техническое состояние

п №1111 ипниковых узлов по одному диагностическому признаку, присущему большинству видов дефектов. Таким диагностическим признаком является рост третьей гармоники якоря в вибрационном спектре. Рост третьей гармоники якоря сопровождался также значительным увеличением мощности сигнала в окрестности этой гармоники в полосе частот  $f = 15 \text{ Гц}$

Эффект роста мощности виброакустического сигнала в полосе частот  $f = 15 \text{ Гц}$  в окрестности третьей гармоники якоря  $3\Gamma_p = 42 \text{ Гц}$  обусловлен несколькими причинами. Во первых рост третьей гармоники якоря является диагностическим признаком разболтанности п шпика, во вторых в этом диапазоне присутствует частота мелькания тел качения  $f_{\text{TK}}$  и частота мелькания по наружному кольцу п шпика  $f_n$ . Все эти частоты при возникновении дефекта увеличивают уровни амплитуд. Кроме того, здесь происходит явление резонанса для всех трех видов частот.

Автоспектры низкочастотного сигнала вибрации корпусов подшипников электродвигателя за 39 минут до разрушения подшипника показывают, что уровень третьей ГарМОНИКИ якоря превышает уровень первой гармоники якоря и достигает величины 4 мм/с. Кроме того, наблюдается нарушение экспоненциального закона убывания гармоник якоря с ростом их порядка.

Характер распределения частотных составляющих виброспектров аварийной п Юшп шпика полностью отличается от экспоненциального, а рост амплитуды сигнала в окрестности третьей гармоники якоря свидетельствует о зарождении дефекта в подшипнике. Кроме того, вблизи частоты третьей гармоники якоря в частотном диапазоне  $\Gamma = 15 \text{ Гц}$  наблюдается возрастание мощности сигнала до величины 11,5 мм/с. При этом возрастание когерентности отражает усиление виброскорости на дискретных частотных составляющих  $\Gamma_{\text{TK}} = 27,5 \text{ Гц}$  и  $\Gamma_n = 39,5 \text{ Гц}$ .

Таким образом, получен диагностический процесс зарождения дефекта в **фиш** япнике тягового электродвигателя в виде частотного выброса спектра в частотном диапазоне  $f=15Fn$  со средней частотой 42Гц. Дальнейшее развитие дефекта приведено на спектрограмме снятой за 15 минут до разрушения подшипника (рис. 4.4, 4.5).

Наличие разрушения в подшипнике характеризуется еще большим увеличением амплитуды третьей гармоники якоря до величины 11,4 мм/с, что значительно превышает норму. В этом случае происходит сильное возрастание мощности сигнала в частотном диапазоне  $\Gamma=15\Gamma$  в окрестности третьей гармоники якоря до величины 30 мм/с. Лифтрация виброспектра (рис. 4.5) наглядно иллюстрирует и подтверждает наличие явного диагностического признака полностью локализованного на третьей гармонике якоря в частотном диапазоне  $\Gamma=14\Gamma$ . Лифтрация произведена с целью объединения всех резонансных гармоник в частотном диапазоне  $\Gamma=14\Gamma$  с центром  $3\Gamma_r^41\Gamma$ . Пиковое значение огибающей сигнала наглядно демонстрирует диагностический признак разрушения подшипника. Получить автоспектр за несколько минут до разрушения подшипника не удалось, т.к. в этом случае необходимо было вносить искусственный дефект в подшипник и четко фиксировать момент разрушения, что в условиях эксплуатации затруднено.

Таким образом, получены диагностические признаки дефектного и бездефектного подшипников в низкочастотной части виброакустического сигнала, что позволило использовать эти данные, как эталонные, при создании диагностических приборов для определения технического состояния **донн** тяговых электродвигателей вагонов метрополитена в эксплуатации.

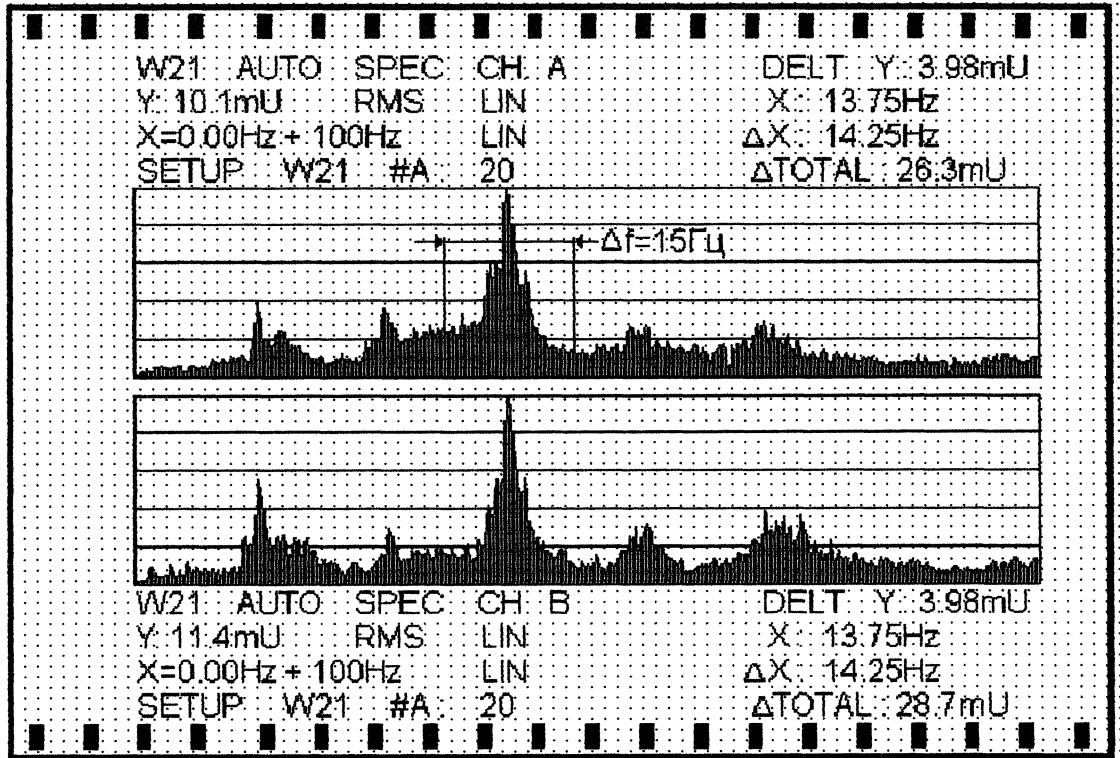


Рисунок 4.2 - Спектр виброскорости бездефектного подшипника тягового двигателя (при вращении якоря по часовой стрелке)

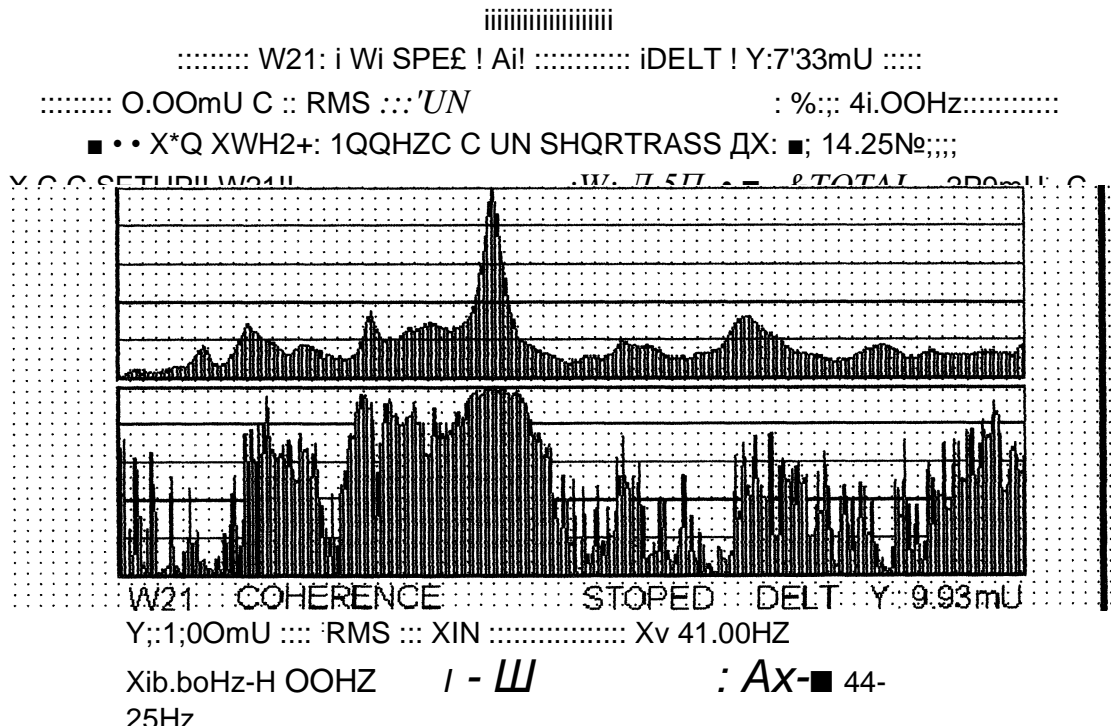


Рисунок 4.3 - Спектр виброскорости бездефектного подшипника тягового двигателя (при вращении якоря против часовой стрелке)

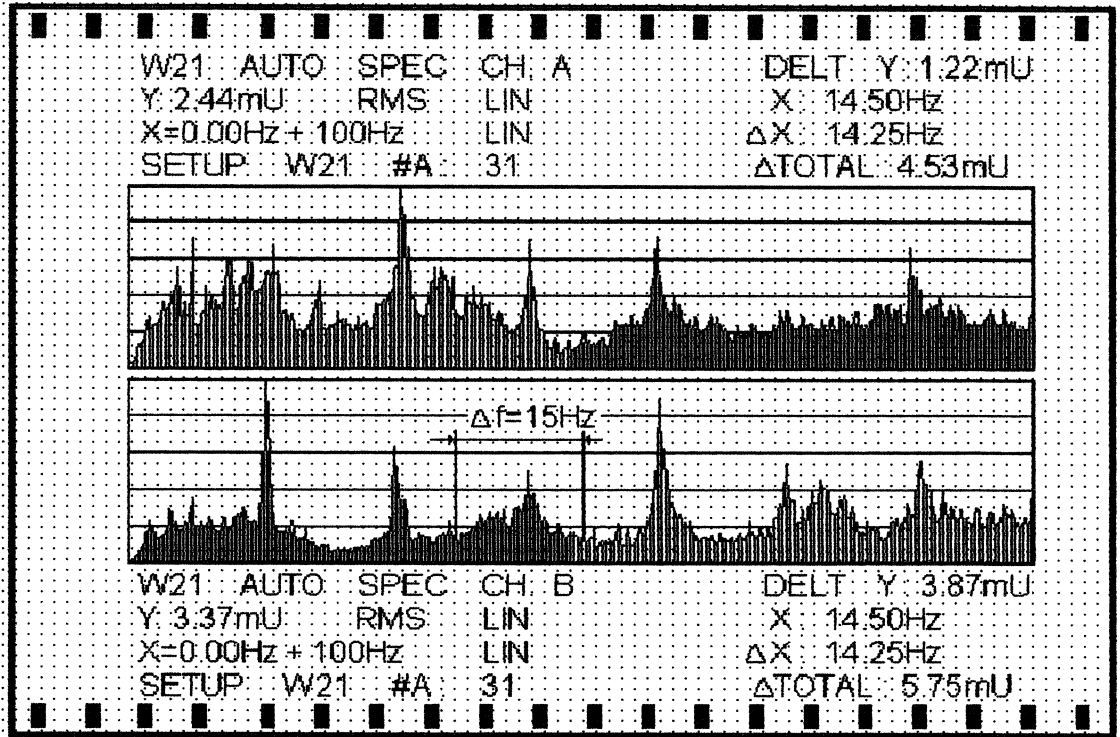


Рисунок 4.4 - Оспектр виброскорости корпуса подшипника тягового двигателя за 15мин. до разрушения (вращение якоря по часовой стрелке)

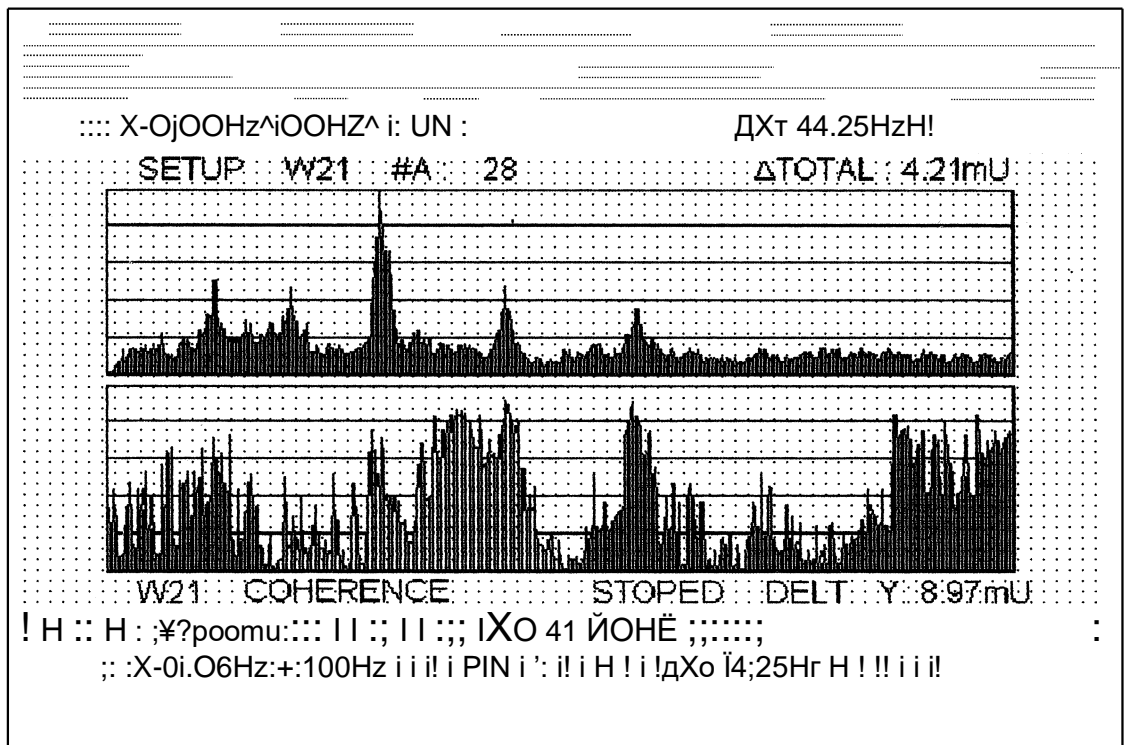



Рисунок 4.5- Спектр виброскорости корпуса п  йпнника тягового двигателя за 15мин. до разрушения (вращение якоря против часовой стрелки)

## РАЗДЕЛ 5

### ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ВНЕДРЕНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО И МАТЕРИАЛЬНО- ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

#### 5.1. Организация работы передвижной станции обслуживания и диагностирования

Процесс технического обслуживания и замены запчастей подвижного состава З^фьковского метрополитена рассматривался КЕК система, предназначенная для обслуживания конечного (и притом практически постоянного) числа требований. Как только требования обслужены, они возвращаются в источник. Кроме того, было предположено, что источник этот имеет интенсивность, пропорциональную числу содержащихся в нем требований. Таким образом, формулировка задачи представлена следующим образом [30].

Пусть в метрополитене имеется  $m$  составов, постоянно эксплуатируемых, и  $n$  бригад, занимающихся обслуживанием, ремонтом и наладкой оборудования. Предположим, что любой вагон метрополитена, исправный к моменту  $t$ , может выйти из строя с вероятностью  $A'dt$  в течение интервала  $(t, t+dt)$  и вагон, находящийся в ремонте в момент  $t$ , может быть отремонтирован с вероятностью  $p.dt$  в течение этого же интервала. Если в некоторый момент число вагонов, ожидающих ремонта или ремонтируемых, равно  $k$ , то число исправных равно  $(m-k)$  и тогда вероятность отказа хотя бы одного из них в интервале  $(t, t+dt)$  равна  $(m-k)kdt$ .

Таким образом, интенсивность потока изменяется скачкообразно всякий раз, когда вагоны выходят из строя или подлежат плановому ремонту, т.е. данные задачи можно отнести к процессу гибели и размножения для замкнутых систем с ожиданием или систем массового обслуживания с ограниченным потоком заявок.

Для нашего случая (наличие 2-х депо метрополитена и центрального склада запчастей и материалов) с учетом анализа технического состояния парка и организации материально-технического снабжения формализуем задачу. Имеется три пункта ремонта и наличия запчастей для  $n_2=10$  основного оборудования, распределенного по этим пунктам. Кроме того, обслуживание и замену отдельных запчастей можно организовать силами передвижных мастерских с учетом проведения диагностики, контроля и наладки оборудования.

Суммарное время, необходимое для ремонта  $t_p$  будет состоять из времени требуемого для вызова мастерской, ее движения к месту ремонта  $t_{де}$  времени осмотра и собственно ремонта с заменой и регулировкой  $t_{рем}$ .

Полагаем, что время обслуживания - случайная величина с показательным законом распределения и параметром  $d$ , где  $f_i = 1/t_p$ .

При этом

По статистической информации Харьковского метрополитена установлено, что среднее значение  $\lambda = 5$  отказов/месяц, поток поступления заявок пуассоновский с  $X=1$  отказ/месяц.

**KE**

Проведем оценку технической эффективности обслуживания подвижного состава метрополитена подвижными мастерскими.

Определим относительную пропускную способность

$$p = 2/\rho = 0,2. \quad (5.1)$$

Далее определим вероятность того, что в системе находится  $k$  требований ( $k=n$ ) как

$$P_k = \frac{m!}{k!(m-k)!} P_0 \rho^k, \quad (5.2)$$

где  $P_0$  - вероятность того, что все каналы обслуживания свободны

Результаты вычислений на ПЭВМ сведим в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

$k$	$P_0$	$P_k$	$kP_k$	$(k-m)P_k$	$(n-k)P_k$
0	0	0,1548	0	—	0,466
1	2	0,3096	0,3069	—	0,6192
2	1,8	0,2786	0,5572	—	0,2786
3	0,96	0,1486	0,4558	—	0
4	0,448	0,0693	0,2772	0,0693	
5	0,179	0,0277	0,1385	0,0554	
6	0,056	0,0087	0,0522	0,0261	
7	0,012	0,0018	0,0126	0,0072	
8	0,0025	0,0004	0,0032	0,0020	
9	0,0004	0,0001	0,0009	0,0006	
10	0	0	0	0	
X	6,4579	0,9996	1,7972	0,1606	1,3622

Значение вероятности равно  $P_0=0,155$  означает, что 4-5 дней в месяц пункты ремонта (имеются в виду локомотивные депо Московское и Салговское) и склад могут быть свободными при наличии неснижаемого технологического запаса

Среднее число вагонов, ожидающих ремонта (обслуживания)

$$M_{ож} = \sum_{k=4}^{10} P_k = 0,16$$

Отсюда средний процент подвижного состава, ожидающий ремонта в очереди

$$K_{нмпр} = \frac{M_{ож}}{10} \cdot 100\% = 1,6\%$$

Из таблицы также находим

$$N_o = \sum_{k=0}^3 P_k = 1,3622,$$

а коэффициент простоя достигает

$$K_n = \frac{N_o}{1} \cdot 100\% = 136,22\%$$

Среднее число узлов и агрегатов вагонов, находящихся в ремонте и в очереди, составляет

ю

$$M = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1,79 \text{ вагона в месяц.}$$

Общий коэффициент простоя подвижных мастерских может

На основании проведенных расчетов на Харьковском метрополитене была внедрена передвижная станция обслуживания и диагностирования на базе легкового автомобиля "Газель". Общий вид передвижной станции показан на рис. 5.1



Рисунок 5.1 - Гъредвижна станция обслуживания и  
д иагностирования ПС метрополитена

## 5.2. Диагностирование ПС метрополитена

Основными задачами диагностирования ПС метрополитена, как совокупности технологических операций, являлись:

- общая проверка работоспособности ПС и уточнение выявленных в процессе скрытых неисправностей;
- поиск неисправностей и определение характера, а также выявление объемов работ по устранению неисправностей;
- выявление ПС, техническое состояние которых не соответствует требованиям нормативно-технической документации;
- выдача информации ремонтному персоналу для планирования, подготовки и оперативного управления;
- измерения диагностических параметров при проведении обслуживании и ремонтов ПС.

Исходя из этого, для диагностирования узлов ПС метрополитена, были применены следующие диагностические средства

### 5.2.1. Электронный стетоскоп

Электронный стетоскоп предназначен для акустического стереофонического прослушивания в обычном режиме и в двух частотных диапазонах с фильтрацией прослушиваемых сигналов. Отличительной особенностью данного прибора является то, что звуковые сигналы прослушиваются при помощи высококачественных стереофонических наушников. Это позволяет оператору более качественно оценивать весь спектр сигнала.

Прибор имеет возможность оценивать уровень этих сигналов по показаниям стрелочного индикатора

Электронный стетоскоп обеспечивает:

- регистрацию шумовых и вибрационных сигналов с выдачей их на

специальное акустическое устройство, позволяющее с минимальными искажениями прослушивать эти сигналы;

прослушивание полного спектра входных сигналов и прослушивание этих сигналов через два фильтрационных канала;

- частотный диапазон прямого канала составляет от 5 до 20000Гц;

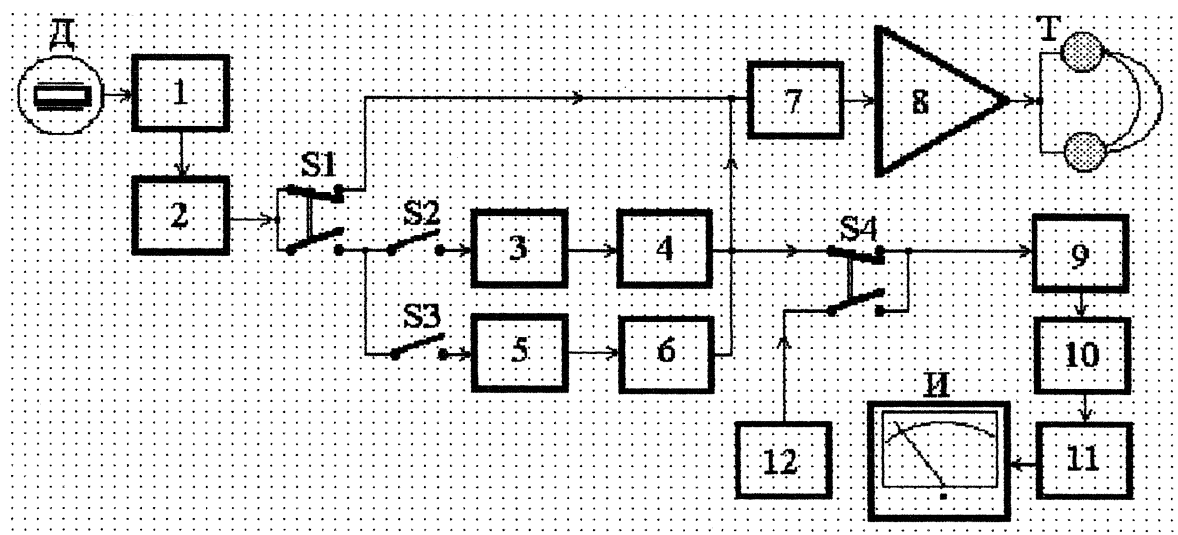


Рисунок 5.2 - Структурная схема электронного стетоскопа

- частотный диапазон низкочастотного канала от 5 до 400 Гц;
- частотный диапазон среднечастотного канала от 600 до 20000 Гц;
- визуальную индикацию уровня сигнала, в дБ, с дискретной регулировкой ослабления через каждые 2 дБ;
- плавную регулировку уровня сигнала от нуля до максимального значения;
- акустическое прослушивание сигнала на стереофонические наушники, позволяющие воспроизводить уровень в большом частотном диапазоне от 10 до 20000 Гц. Питание прибора осуществляется от бортовой сети подвижного состава

Электронный стетоскоп представляет собой переносной прибор, выполненный в малогабаритном корпусе.

Структурная схема 1-го канала электронного стетоскопа (рис. 5.2)

состоит из следующих составных частей: датчика сигнала (Д); узла согласования (1); предварительного усилителя (2); формирователей НЧ (3) и СЧ (5) сигналов; активных фильтров НЧ (4) и СЧ (6) сигналов; узла согласования и регулировки уровня сигнала (7); оконечного усилителя мощности (8); формирователя пикового значения сигнала (9); детектора (10); усилителя (11) и стрелочного индикатора (И); преобразователя и стабилизатора питающего напряжения (12); коммутационных устройств (S1, S2, S3 и S4).

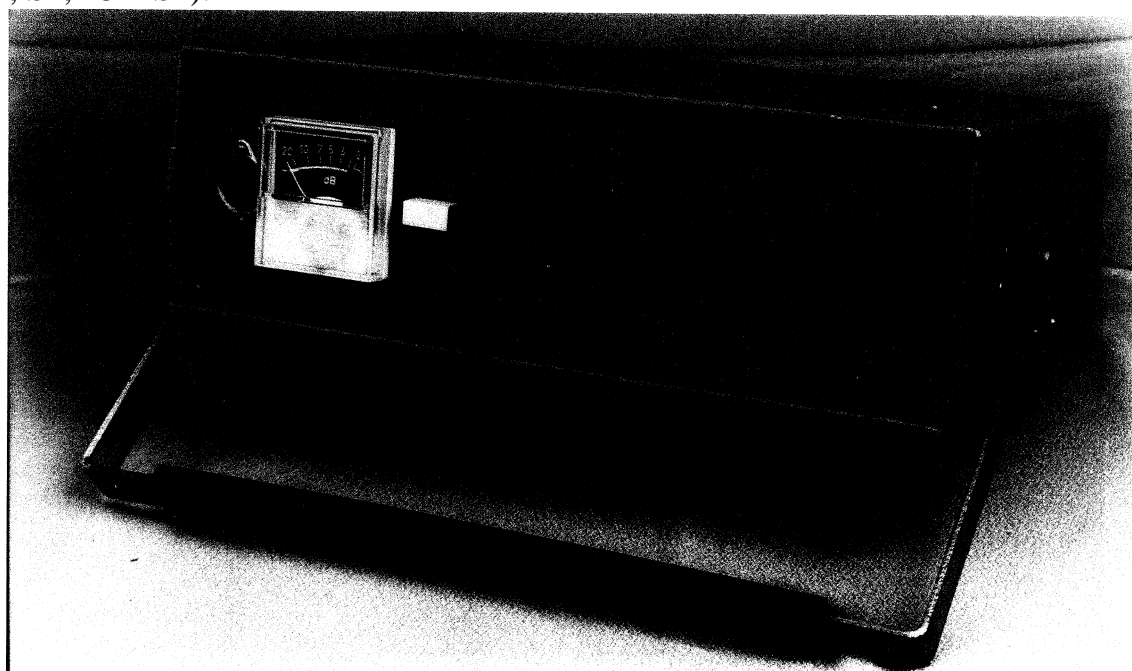


Рисунок 5.3 - Общий вид электронного стетоскопа

Сигнал, вырабатываемый датчиком, поступает на узел согласования (1) с усилителем (2), который согласовывает его с последующими электронными блоками и усиливается до уровня, необходимого с работой схемы. Согласованный и усиленный сигнал поступает на коммутационное устройство (S1), которое по выбору оператора позволяет пропускать полученный сигнал непосредственно в усилитель мощности или направлять его для фильтрации. В последнем случае сигнал поступает на активные фильтры НЧ (3,4) или СЧ (5,6), и после прохождения коммутирующего устройства направляется в оконечное усилительное устройство (7,8).

С выхода коммутирующего устройства сигнал (как прямой, так и отфильтрованный) одновременно поступает на согласующее устройство (9), где преобразовывается по входному сопротивлению и поступает на узел выделения его пикового значения (10). Полученное таким образом значение выпрямляется в детекторе (11) и поступает на стрелочный индикатор (И). При этом индикатор может работать в двух режимах режим индикации текущих значений сигнала и контроль значения питающего напряжения сети. Выполнение этих режимов обеспечивается при помощи коммутирующего устройства на переключателе S4.

Общий вид электронного стетоскопа показан на рис. 5.3.

### **5.2.2. Устройство для визуального диагностирования**

Эндоскопы предназначены для осмотра и фотографирования труднодоступных мест через специальные смотровые окна или другие технологические отверстия. Волоконно-оптический эндоскоп представляет собой равномерно уложенный волоконно-оптический жгут с высокой разрешающей способностью (диаметр одиночного волокна  $1 \pm 5$  мкм), состоящий из двух частей - центральной и периферийной. Общий вид волоконно-оптического эндоскопа представлен на рисунке 5.4.

Центральная часть предназначена для передачи изображения от объектива до экрана, а периферийная часть волокон служит для освещения обследуемого объекта с помощью источника света. Обе части жгута заключены в эластичную оболочку и металлическую оплетку. Плотность укладки волокон в жгуте эндоскопа достигает 1 млн. на  $1 \text{ см}^2$ . Для проектирования изображения на торец жгута наконечник имеет призму и объектив. Для обеспечения визуального наблюдения внутренних полостей свет от источника по периферийным волокнам направляется на обследуемый объект. Отраженный от объекта наблюдения свет'

транспортирует изображение по центральным волокнам до выходного торца, где оно и рассматривается на экране.



Рисунок 5.4- Общий вид волоконно-оптического эндоскопа

В случае необходимости фото и киносъемку можно осуществлять непосредственно с экрана. Сам прибор состоит из трубок смотрового и подсветочного световодов, блока питания; рабочей и окулярной части смотровой трубки, гайки диоптрийной настройки; наглазника;

### **5.2.3. Переносные приборы частичного излучения типа «СМОТРИЧ»**

Пирометры частичного излучения переносные типа «Смотрин» предназначены для бесконтактного дистанционного измерения температуры тел в диапазоне от 0 до 3500°C. Работа этих приборов основана на улавливании инфракрасного излучения, которое испускает нагретое тело с дальнейшим преобразованием его в электрический сигнал.

Конструкция пирометров выполнена в виде пистолетного типа. В передней части прибора имеется специальное фокусирующее отверстие

для улавливания инфракрасного излучения. На тыльной стороне, обращенной к оператору, расположен цифровой индикатор, отображающий фактическое значение измеряемой температуры. На рукоятке прибора сделана кнопка куркового типа для фиксации измеренного значения температуры.

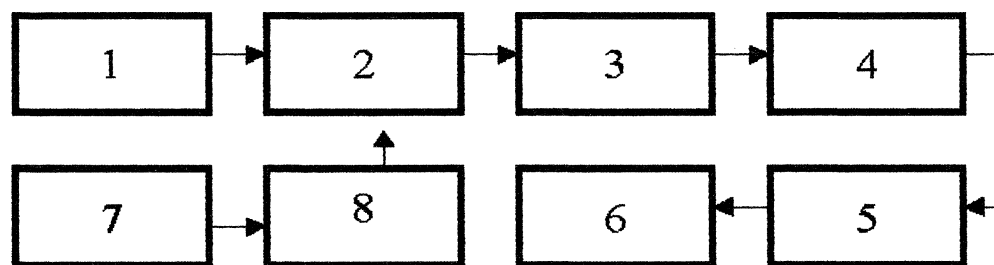


Рисунок 5.5- Структурная схема пирометра «Смотрин -4П»

Структурная схема пирометра приведена на рис. 5.5. В состав пирометра входят следующие узлы: оптическая система (1), приемник излучения (2), функциональный преобразователь (3), усилитель постоянного тока (4), аналого-цифровой преобразователь (5), цифровое табло (6), блок питания (7) и преобразователь напряжения (8).

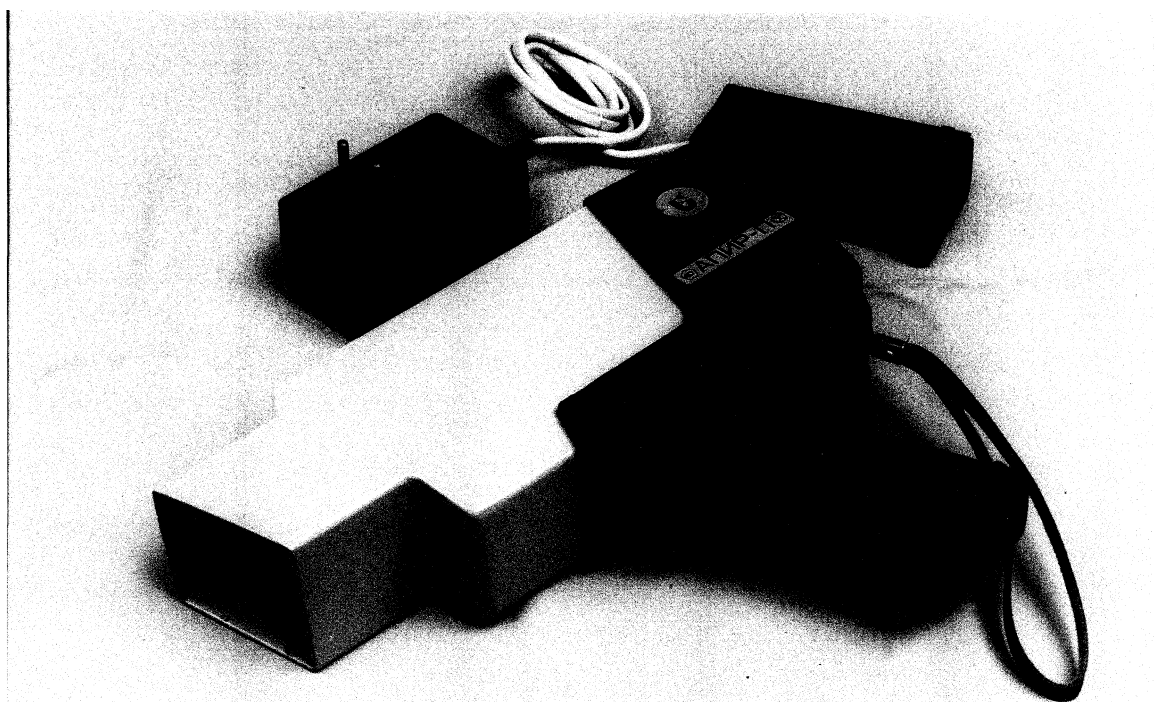


Рисунок 5.6- Общий пирометра «Смотрин - 4П»

Предел среднего квадратичного отклонения случайной составляющей основной погрешности пирометров не превышает 0,5 предела допускаемой основной погрешности.

Для измерения температуры необходимо включить пирометр при помощи специального тумблера, установленного на корпусе прибора, направить прибор на измеряемый объект и на тыльной стороне на цифровом индикаторе прочесть значение температуры в градусах. Общий вид пирометра «Смотрич - 4П» показан на рисунке 5.6.

Информация по измеренным значениям температуры может накапливаться в приборе, считываться через интерфейс и обрабатываться на ПЭВМ по специальной программе.

#### **5.2.4. Прибор для оценки скоростных характеристик ТЭД**

Прибор предназначен для оценки разности скоростных характеристик тяговых электродвигателей. Он состоит из вольтметра ( $V$ ), тумблеров  $S1-S7$ , кнопки  $K1$ . и соединительных проводов с зажимами на концах (рис. 5.7). Прибор работает следующим образом. Провода 1-IV под ключают соответственно к проводам катушек реле боксования РБ1-РБ3 и попарно соединяют с вольтметром для измерения разности потенциалов между двумя тяговыми двигателями через тумблера  $S1-S5$ . Для исключения возможности одновременного включения двух тумблеров предусмотрена механическая блокировка. Полярность и разность потенциалов между двигателями определяют с помощью вольтметра ( $V$ ) с пределами измерения 75мВ.; 9В; 15В и 150В; При отклонении стрелки вольтметра в сторону противоположную нормальным измерениям, тумблер  $S6$  переключается. Положение тумблера  $S6$  указывает также на большой потенциал в двигателе. В зависимости от надобности пределы измерения устанавливают тумблером  $S7$  и кнопкой  $K1$ .

Прибор используют при периодических контрольных поездках на ПС, склонному к повышенному буксованию и имеющему следы перегрева тяговых двигателей. В результате поездок выявляют причины неравномерности нагрузки двигателей.

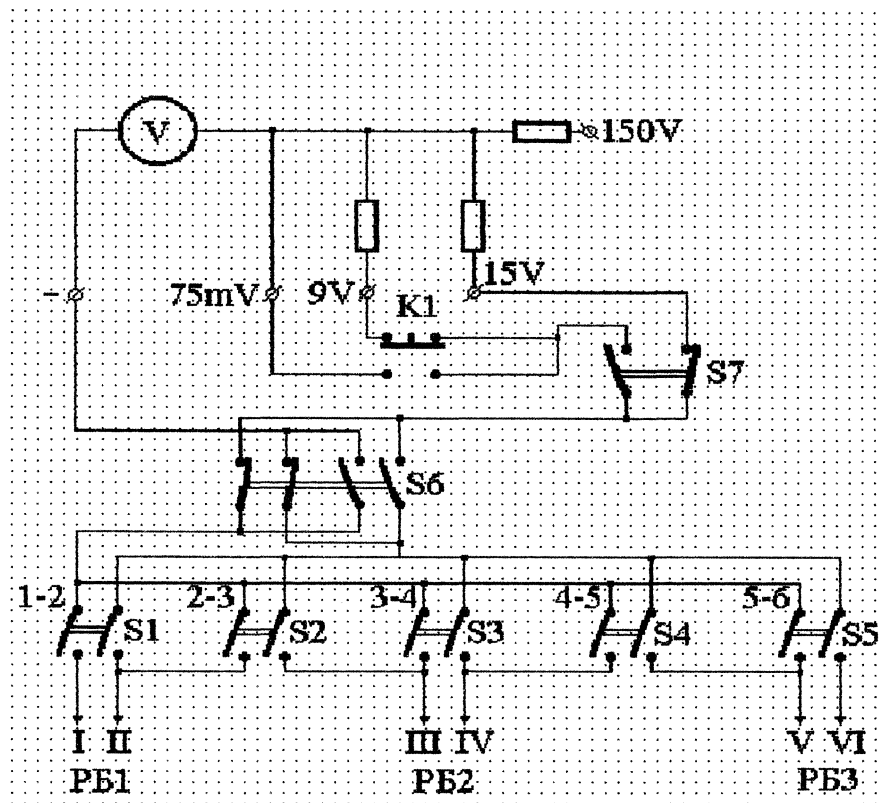


Рисунок 5.7 - Принципиальная схема прибора для оценки разности скоростных характеристик тяговых двигателей

Опыт эксплуатации показал, что допустимые значения разности токов в номинальном режиме находятся в пределах 50-70А для всех тяговых двигателей одного вагона. При больших значениях причинами завышения разности токов являются расхождения скоростных характеристик (завышенная разность диаметров колес или нарушение коммутации). При включенном шунтировании завышенное расхождение токов нагрузки чаще всего наблюдается из-за нарушения силовых контактов контакторов, ослабления возбуждения или значительного разброса величины шунтирующих резисторов.

### 5.2.5. Индикатор дефектов подшипников электрических машин

Индикатор ориентирован на углубленное диагностирование

подшипников качения и обеспечивает:

- контроль износа дорожек и тел качения по, **11\*11** подшипника,
- контроль режима смазывания смазкой тел качения подшипника

Индикатор позволяет осуществлять качественный анализ состояния подшипника на работающем механизме при номинальной нагрузке, а также осуществлять качественный контроль состояния механизмов.

содержащих подшипники качения, по останову переключения светодиодов индикатора в красной, желтой или зеленой зоне, что означает, аварийное, удовлетворительное и нормальное состояние подшипника

Принцип работы индикатора основан на анализе виброакустического сигнала по амплитуде и частоте, излучаемого подшипниками вращающихся машин, сравнении его с пороговыми значениями в двух (наиболее информативных для данного вида дефектов) диапазонах частот.

В состав индикатора (рис. 5.8) входят: вибропреобразователь (1); управляющий усилитель (2); фильтр полосовой НЧ (3); фильтр полосовой ВЧ (4); компаратор (5); цифровой блок управления индикатором (6); светодиодный индикатор (7); блок питания (8); преобразователь напряжения (9).

Индикатор работает следующим образом. После включения прибора напряжение с блока питания 8 поступает на питание непосредственно цифровых микросхем в блоки 6 и 7, а также в блок 9, который преобразует однополярное напряжение 7,2В в двухполярное  $\pm 8В$ , необходимое для питания блоков 2, 3, 4, 5.

Пьезоэлектрический вибропреобразователь 1 преобразует механические колебания в электрические, которые поступают на управляющий усилитель 2. Усилитель ступенчато увеличивает свой коэффициент усиления по алгоритму, задаваемому блоком 6.

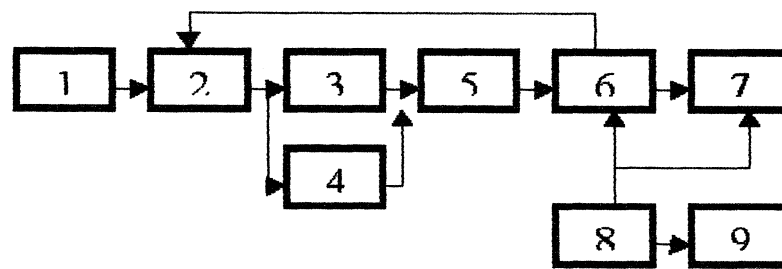


Рисунок 5.8 - Структурная схема индикатора дефектов подшипников

Далее сигнал проходит через фильтр 3 и 4, в зависимости от режима измерения (смазка или дорожки), детектируется и поступает на вход компаратора 5. Если уровень сигнала превышает уровень опорного напряжения компаратора, последний формирует управляющий сигнал для блока 6, который останавливает переключение светодиодного индикатора 7 в красной, желтой или зеленой зоне, что означает, соответственно, запрет эксплуатации, необходимость обслуживания или продолжения нормальной

### 5.3. Оценка экономической эффективности внедрения новой технологии обслуживания.

Полученные данные эксплуатации вагонов метрополитена, обслуживание которых осуществлялось с применением методов и средств технической диагностики, свидетельствуют с возможности повышения коэффициента готовности на 0,12; сокращении времени непроизводительного простоя на 8%; повышении безотказности в эксплуатации на 14%.

При этом стоимость дополнительного оборудования на опытную эксплуатацию составила порядка 60,0тыс.грн. Источники инвестиций:

собственные средства (20%) и внутренние кредиты других служб (80%) с годовой ставкой 110%. Погашение долга осуществляется согласно договору равномерно в течение 5 лет. Годовой прирост чистой прибыли метрополитена после внедрения прогнозируется в размере 19,0 тыс.грн. на один состав.

Для установления нормы дисконта  $E$ , соответствующей приемлемой для инвестора норме дохода на капитал, определяем "цену" авансированного капитала:

$$Ц_1 = 0,01 \times 16 \times 110 = 17,6\%$$

где - 16%- доля ежегодного погашения кредита в стоимости создания и закупки средств диагностики для метрополитена в размере 9,6тыс. грн.

"Цена" авансированного капитала соответствует минимальному значению приемлемой нормы дохода  $V$  соответствии с полученным значением "цены" авансированного капитала и результатами инвестиционной деятельности служб метрополитена

За предшествующий период инвестор принимает норму дохода на капитал 25%, что регламентирует норму дисконта  $E = 0,25$ .

Тогда интегральный эффект инвестиций

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = p \sum_{t=0}^5 X_t \cdot (1+E)^{-t} \quad (5.3)$$

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \frac{19,0 \times (1 - (1,25)^{-5})}{0,25} - 12,0 \times (1,25)^{-1} = 58,0 \text{ тыс}$$

Индекс рентабельности инвестиций

$$\mathcal{I}_k = \frac{\mathcal{E}_{\text{инт}}}{E_k \times \Pi_i} = 1,15 \quad (5+)$$

Норма рентабельности инвестиций  $E_p$  была приближенно вычислена по формуле

$$E_p = R/K_0 = 19,0/60,0 = 0,3.$$

Срок окупаемости инвестиций  $T_0$  определился по зависимостям, взятым из литературы, и составил примерно 5 лет. Так как  $\Delta_{итк} > 0$ ,  $\Delta_k > 1$ ,  $E_p > C$ » то считаем, что внедрение новой технологии обслуживания с диагностированием экономически оправданным и эффективным при выбранных источниках финансирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ источников

1. Авакян В.А Исследование качества монтажа подшипников электрических машин путем вибродиагностики // Электротехника - 1980. - №8. - С. 29-33.
2. Акулиничев В.М, Кудрявцев В А, Корешков АН Математические методы в эксплуатации железных дорог. - М: Транспорт, 1981. - 253 с.
3. Александров В.Г., Глазков Ю.А, Александров АГ. Контроль технической исправности самолетов и вертолетов. - М: Транспорт, 1976.-360 с.
4. Балицкий Ф.Я., Иванова МА, Соколова АГ. и др. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. - М: Машиностроение, 1984. - 176 с.
5. Биргер ИА Техническая диагностика. - М: Машиностроение, 1978. - 240 с.
6. Браун С, Датнер Б Анализ вибрации роликовых и шариковых подшипников // Конструирование и технология машиностроения. - 1979. - №1. - С.65-72.
7. Букам Д, Кенигсберг Э. Научное управление запасами: Пер. с англ - М: Наука, 1967.-312 с.
8. Виноградская С.В, Железнов ГВ, Радюкова НГ. Методические указания по расчету комплекта ЗИП устройств тепловой автоматики и измерений электростанций. - М: СПО Союзтехэнерго, 1984. - 102 с.
9. Галкин В.Г, Парамзин В.П, Четвергов В.А Надежность тягового подвижного состава - М: Транспорт, 1981. - 184 с.
10. Галкин В.Г, Челобанов ПС. Испытание тяговых двигателей // Электрическая и тепловозная тяга - 1988. - №12. - С. 27.
11. Генаджиев Г Определение сменяемости ответственных узлов и деталей подвижного состава//Железные дороги мира - 1997. - №6. - С. 5-6.

12. Генкин МД., Соколова АГ. Виброакустическая диагностика мяпгин и механизмов. - М: Машиностроение, 1987. - 288 с.
13. Геращенко О.А, Гордов АН, Еремина АК *и др.* Температурные измерения: Справочник. - Киев.. Наук, думка, 1989. — 704 с.
14. Герцбах И Б., КбрдонскийХБ. Модели отказов. - М: Сов.радио, 1966. — 166 с.
- 15,Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика- М: Высшая школа, 1977.- 479 с.
16. Головатий АТ., Лебедев Ю.А Техническое обслуживание и ремонт локомотивов за рубежом. - М: Транспорт, 1973. - 112 с.
17. Головатий АТ, Четвергов В.А Влияние параметров системы технического обслуживания и ремонта локомотивов на ее технико-экономическую эффективность // Вестник ВНИИЖТ. - 1974. - №3. - С. 1-8.
18. Головин ИН, Чуварыгин Б.В., Щура-Бура АЭ. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем. - М: Радио и связь, 1984. - 204 с.
19. Головин С.Ф. Цибближенный метод определения среднего расхода запасных частей. // Тр. МАДИ -1978. - Выл. 152. - С.61-63.
20. Горелик В А, Ушаков ИА Исследование операции. - М: Машиностроение, 1986. - 288 с.
21. Горский АВ, Воробьев А А, Агапов ММ Особенности эксплуатации и надежность оборудования вагонов метрополитена // Электрическая и тепловозная тяга - №6. - 1992. - С.33-34.
22. Горский АВ., Воробьев А А, Агапов ММ Оценка показателей непараметрической надежности электроподвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. - 1991. - №5. - С. 21-24.
23. Ждановский НС. Диагностика дизелей автотракторных двигателей с использованием электронных приборов. - Л.: ЛСХИ, 1973. - 218 с.

24. Ждановский НС., Мануков НП, Улитовский Б. А и др. Безразборное определение технического состояния тракторных двигателей. - М: Коже, 1987. - 174 с.
25. Ждановский НС., Улитовский Б. А Аллилуев В. А Диагностика дизелей автотракторного типа. - М: Колос, 1970. - 192 с.
25. Заикин Г.И, Семенов ИМ Повреждаемость подшипниковых узлов тяговых редукторов электропоездов. // В сб. 'Работоспособность подшипников качения в узлах локомотивов'. - Транспорт. - 1975. с.107-113.
27. Засименко В.М, Самченко Т.П Цифровые пирометры «Смотрич-4П» и «Смотрин 5П» агрегатного комплекса АПИР-11 // Приборы и системы управления. - 1987. - №2. - С.20-21.
28. Зубко НФ. Надежность и оптимизация запасов деталей портовых машин. - М: Транспорт, 1992. - 144 с.
29. Иванова МА Автоматизированная система вибродиагностирования технического состояния механизмов на базе ЭВМ // Точность и надежность систем // Сб. науч. тр. РКИИГА - Рига - 1983. - Вып.2(346). - С.49-60.
30. Ивченко Г.И, Каштанов В.А, Коваленко ИН Теория массового обслуживания. - М: Высш, шк., 1973. - 184 с.
31. Инструкционная книга ТИБИ. 1447 Тяговое электрооборудование вагонов метрополитена типов 81-717 БВ, 81-714 БВ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - 90с.
32. Исаев ИП Стабильность характеристик электрических локомотивов. - М: Трансжелездориздат, 1956. - 118 с.
33. Исаев ИП, Горский АВ, Воробьев А А Методика анализа влияния условий эксплуатации на использование ресурса тяговых двигателей электровозов. //Тр.МИИГ. - 1983. - Вып. 738. - С.75-80.

- 34.Исаев ИП, Горский А В., Козырев В. А и др. Требования к проведению эксперимента по определению оптимальной структуры ремонтного цикла электроподвижного состава // Тр.МИИТ. - 1978. - Вып.605. - С.93-100.
- 35.Исаев ИП, Горский АВ, Хлопков СМ От чего зависит ресурс тяговых двигателей // Электрическая и тепловозная тяга - 1982. - №6. - С. 20-21.
- 36.Исаев ИП, Матвеевичев АП, Козлов Л.Г. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов. - М: Транспорт, 1984. - 246 с.
- 37.Исаев ИП, Козлов Л.Г., Матвеевичев АП Методика выбора параметров стенда ресурсных испытаний тяговых электродвигателей. // Тр.МИИТ. - 1983. - Вып. 721. - С. 11-23.
- 38.Исследование надежности работы тяговых двигателей подвижного состава метрополитена/ Демченко О.Ф.; ХИИТ. -Харьков, 1988. -5с. Рус-Деп. ВЦНИИТЭИМПС 11.04.88. - №4347.
- 39.Каменецкий Б.Г., Егоров А Я. Условия возникновения кругового огня на коллекторе тягового электродвигателя. // Электротехника - 1967. - №5.-С.21-24.
- 40.Капранов НН Расчет межремонтных пробегов электровозов для конкретнихустановітйзксплуатаціи// Тр. ВЗИИГ. - ЕЬш.117. - С. 155-161.
- 41.Козлов Б.А, Ушаков ИА Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. - М: Сов.радио, 1975. 472с.
- 42.Козлов Л.Г. Матвеевичев АП, Коновалов В.А Выбор основных элементов стенда для проведения тренировочных испытаний электрооборудования подвижного состава // Оборудование электроподвижного состава Об. науч. тр. МИИТ. - Efcin. 464. - С.85-90.

43. Козлов Л.Г., Матвеевичев АП Выбор кинематической схемы стенда для испытаний тяговых двигателей на виброустойчивость и вибростойкость. // Тр.МИИТ. - 1978. - Вып. 585. - С.56-64.
44. Колчин АВ. Датчики средств диагностирования машин. - М: Машиностроение, 1984. - 124 с.
45. Конюхов Б.М, Ахмедзянов АМ, Шпилевский Э.К Диагностика состояния ГТД по моделям, отражающим динамику изменения контролируемых параметров // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника - 1983. - №1. - С.33-42.
46. Коссов Е.Е. Оценка возможности применения тепловозной тяги на участках с гфотяженными тоннелями. // Тр.МИИТ. - 1979. - Вып.627. - С.94-109.
47. Кудинов В. С. Проблемы нормирования и расчета потребности в запасных частях тепловозов. // Тр. ВНИТИ - Коломна - 1987. - Вып.66. - С.64-71.
48. Кузмич В.Д. Анализ характеристик различных типов воздухоочистителей и возможностей их применения в системах охлаждения тяговых электрических машин тепловозов. // Тр.МИИТ. - 1978. - Вып.603. - С. 167-171.
49. Кузмич В.Д. Исследование эксплуатационного состояния тяговых электрических машин тепловозов и их систем охлаждения. // Тр.МИИТ. - 1978. - Вып. 611. - С.110-118.
50. Кузмич В.Д. Методика испытаний воздухоочистителей для тяговых электрических машин тепловозов // Тр. МИИТ. - 1977. - Вып.558. - С.82-89.
51. Кузмич В.Д. О возможности регулирования режимов охлаждения тяговых электрических машин тепловозов. // Тр.МИИТ. - 1979. - Вып.627. - С. 119-127.

52. Кузмич В.Д. Технические требования к воздухоочистителям систем охлаждения тяговых электрических машин тепловозов. // Тр.МИИТ. - 1978. - Вып.611. - С. 136-142.
53. Кузнецов ЕС. Исследование эксплуатационной надежности автомобилей. -МЛ: Транспорт, 1969. - 136 с.
54. Кузнецов ЕС. Рациональные режимы технического обслуживания и методика их корректирования. -МЛ: Автотрансиздат, 1960. - 100с.
55. Кузнецов Т.Ф., Боднарь Б.Е, Ляшук В. МЛ станция для испытания тепловозов с гидравлической передачей. // Инф. письмо ЦБНТИ МйнчерметаУСССР. - №4-86. - Днепропетровск. - 1986. - С. 4.
56. Кульбак Л. И Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами. - МЛ: Сов. радио, 1970. -236 с.
57. Курасов ДА Диагностирование состояния тяговых электродвигателей электровозов в эксплуатации. // Тр.МИИТ. - 1982. - Вязл.703. - С. 80-83.
58. Курбасов АС. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. - МЛ: Транспорт, 1977. - 311 с.
59. Линьков В. В. Основы формирования запаса запасных частей для подвижного состава метрополитена // Міжвуз. зб. наук, праць - ХарДАЗТ. - 1998. - Вип.34. -С.19-21.
60. Диковенко О. МЛ, Линьков В В. Використання експертних систем для удосконалення технології ТО і ПР локомотивів // Міжвуз. зб. наук, праць - ХарДАЗТ, 1998. - Вип.34. - С.88-90.
61. Линьков В. В. Количественная оценка надежности вагонов метрополитена // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. -1998. -№6. - С. 68.
62. Линьков В. В. Оценка возможности применения передвижных мастерских на метрополитене // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1999. -№ 1. - С.38-39.

- 63.Мазорчук РИС, Шаройко АВ., Берлин В.И Нормирование расхода материалов и запасных частей на железнодорожном транспорте. — МЛ: Транспорт, 1984. - 272 с.
- 64.Матюшин В. А, Королев А И Ремонтпригодность вагонов метрополитена// Вестник ВНИИЖТ. - 1990. - №4. - С. 11-14.
- 65.Методические указания по нормированию расхода и расчету потребности запасных частей на техническое обслуживание и ремонт тепловозов. - Коломна - ВНИТИ - 1984. - 144 с.
- 66.Методы контроля состояния подшипников качения механизма привода в процессе работы// Экспресс-информация ВНИТИ Детали машин. - 1979. - Ж. - С. 5-12
- 67.Мирошников Л. В, Болдин АП, Пал ВИ Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. - М: Транспорт, 1977. - 263с.
- 68.Михлин В.М Прогнозирование технического состояния машин. - М: Колос, 1976. - 186с.
- 69.Павленко К И Основы эксплуатации радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов. -М: Воениздат, 1987. - 168 с.
- 70.Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. - МЛ: Машиностроение, 1971. -224 с.
- 71.Павлович ЕС. Определение оптимальных пробегов между ремонтами // Омск. - Тр.ОМИИТ. - 1968. - Вып.87. - Ч. 1.
- 72.Павлович Е.С. Основы расчета надежности и технико-экономической эффективности тепловозных дизелей // Омск. Тр.ОМИИТ. - 1968. - Вып. 87. - 4.2.
- 73.Павлович ЕС., Агошко О.П, Архангельский С. В. и др. Проблемы создания автоматизированных систем диагностики узлов подвижного состава //Тр.МИИТ. - 1982. - Вып.703. - С. 19-23.

- 74.Перельман Д.Я. Комплексная механизация и автоматизация ремонта подвижного состава - МЛ: Транспорт, 1977. - 199 с.
- 75.Пославский О.Ф. Методы расчета числа запасных частей. - МЛ: Знание, 1977.-48 с.
- 76.Прабху Н Методы теории массового обслуживания и управления запасами. - М: Машиностроение, 1969. - 356 с.
- 77.Пушкарев И.Ф., Пахомов Э.А Контроль и оценка технического состояния тепловозов. - МЛ: Транспорт, 1985. - 160с.
- 78.Равич ИС., Ахмедов МХ Оптимизация производственных запасов материалов на дороге // Железнодорожный транспорт. - 1992. - №5. - С.63-65.
- 79.Рубальский Г. Б. Управление запасами при случайном спросе (модели с непрерывным временем) / Под ред. ИА Ушакова. - М: Сов.радио, 1977. - 160 с.
- 80.Рубин В.Ф., Зиновьев АА, Зайцев АН Вагонымоделей 81-720, 81-721: от эксплуатации до воплощения // Локомотив. - 1997. - №2. - С.38-40.
- 81.Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента - МЛ: Наука, 1971. -192с.
- 82.Савоськин АН, Бурчак Т.П, Матвеевичев А Пи др. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог - М: Машиностроение, 1990. - 288 с.
- 83.Система технического обслуживания и ремонта на лондонском метрополитене // Железные дороги мира - 1997. - №3. - С.42-45.
- 84.Соенский Л.Н Повышение качества испытаний тяговых двигателей электроподвижного состава // Сб. науч. тр. "Вопросы совершенствования системы ремонта электроподвижного состава при применении средств и методов технического диагностирования" - М - Транспорт. - 1991. - 117с.

85. Стрекопылов В.В, Пушкарев ИФ. Надежность и техническая диагностика локомотивов. Л.: ЛИИЖТ, 1988. - 60с.
86. Тагунцев С.Д, Пьройко АВ, Хибриков ЕА Материально-техническое снабжение железнодорожного транспорта. - М: Транспорт, 1985. - 380с.
87. Тартаковский Э.Д. Исследования контрольно-диагностических работ на поточной линии диагностики тепловозов // Межвуз. сб. науч. тр. «Оптимизация управления и совершенствование узлов локомотивов» - Гомель. - БелИИЖТ. - 1981. - С.84-86.
88. Тартаковский Э.Д. Качество ремонта и надежность тепловозов. - М: Транспорт, 1973. - 134с.
89. Тартаковский Э.Д. Маршрутная технология технического обслуживания локомотивов с применением диагностики. // Тр.МИИТ. - 1982. - Вып.703. - С.30-33.
90. Тартаковский Э.Д. Предпосылки автоматизации проектирования технологических процессов обслуживания и ремонта локомотивов. // Тр. МИИТ. - 1987. - Вып. 795. - С.8-12.
91. Тартаковский Э.Д., Ефименко В. И, Бабанин АБ. Развитие математических моделей технологии обслуживания и ремонта локомотивов // Совершенствование конструкции, технологии, эксплуатации и ремонта подвижного состава Тр. ХИИТ - Харьков. - 1987. - Вып. №2. - С.65-69.
92. Техническая диагностика электроподвижного состава // Серия «Локомотивы и локомотивное хозяйство». - М - ДИИТЭИ МПС. - 1971. - №60. - С. 1-44.
93. Усовершенствование устройств электрической тяги поездов метрополитенов. // Тр. ВНИИЖТ. - 1979. - Вып. 615. - 144 с.

94. Учет особенностей эксплуатации метровагонов в расчетах долговечности // Надежность подвижного состава Об. науч. тр. ВНИИЖТ. - 1989. - Вып. 782. - С. 14-24.
95. Хомич АЗ., Жанкин С. Г., Симсон АЭ., Тартаковский Э.Д. Диагностика и регулировка тепловозов. - М: Транспорт, 1977. - 222 с.
96. Четелова В. А Информационно-справочная служба материально-технического обеспечения // Железнодорожный транспорт - 1993. - №11.-С.65-68.
97. Шишков АД, Козырев В.А Эксплоатационные показатели локомотивных двигателей // Железнодорожный транспорт. - 1993. - №8. - С.34-37.
98. Щетина В.А, Лукинский В.С, Сергеев В. И Снабжение запасными частями на автомобильном транспорте. - М: Транспорт, 1988. - 112 с.
99. Якиманский НА, Гринберг ПВ, Апокорин ДВ. и др. Потребление и нормирование запасов ремкомплектов. // Автомобильный транспорт. - 1983. -№11.-С.42-45.
100. Янг С, Эллисон А Измерение шума машин: Пер. с англ. - М: Энергоатомиздат, 1988. - 144с.
101. Bruel & Kjaer Application 169-80 / Machine Health Monitoring Using an FFT Frequency Analyzer Type 2031 or 2031 with Desk-top Calculator.
102. Bruel & Kjaer Application Note 106-81 / Analysis Techniques for Gearbox Diagnosis Using the High Resolution FFT Analyzer.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствие с задачей повышения эффективности работы подвижного состава метрополитена обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы - разработка совершенной технологии обслуживания оборудования вагонов метрополитена, базирующейся на применении средств и методов диагностирования и научно-обоснованном обеспечении ЗИЛом.

Для достижения поставленной цели проведены теоретические и экспериментальные исследования, обоснованы и разработаны организационно-технические мероприятия по организации диагностического и материально-технического обеспечения вагонов метрополитена.

В работе выполнены и решены следующие вопросы

- разработана методика количественной оценки надежности вагонов метрополитена, которая характеризует их готовность к эксплуатации;

- проведен анализ технического состояния оборудования подвижного состава метрополитена и выделены узлы, лимитирующие их безотказность и ремонтпригодность;

- проведен обзор мирового опыта технического обслуживания, информатизации ремонта, диагностирования и организации материально-технического обеспечения подвижного состава метрополитена;

- разработана методика и проведены расчеты диагностической ценности информации о состоянии оборудования вагонов на основании которой, определена интенсивность отказов лимитирующих узлов и деталей ПС метрополитена;

- разработана методика, проведен расчет ЗИП и на основании этого получен перечень требуемых ремонтируемых и перемонтируемых деталей

вагонов метрополитена при выполнении им ТО или ТР. Выполнена оценка достаточности ЗИП для конкретного вида ТО или ТР;

проведены стендовые исследования виброакустических характеристик тяговых электродвигателей и получены эталонные спектры частот, которые в последующем были заложены в разработанные приборы для диагностирования этих узлов в эксплуатации;

- разработана новая технология обслуживания и диагностирования с применением передвижной станции, применением переносных портативных устройств диагностирования (волоконно-оптических эндоскопов, пирометров, измерителей уровня вибрации и др.);

- выполнена технико-экономическая оценка внедрения новой технологии обслуживания подвижного состава метрополитена, показавшая ее эффективность.

В результате проведенных исследований решена задача совершенствования технологии обслуживания оборудования вагонов метрополитена, которая базируется на применении новой, имеющей логистическую направленность, организации работы материально-технического и диагностического обеспечения.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

ОТКАЗЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДК-116 И ИХ УЗЛОВ



Рисунок А1. - Распределение отказов узлов тяговых двигателей ДК-116

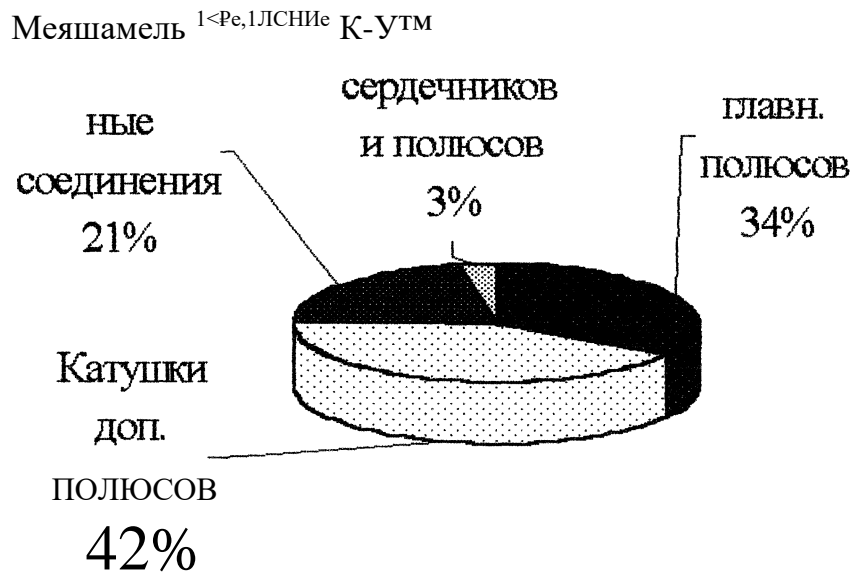


Рисунок А 2. - Распределение отказов магнитной системы тяговых

двигателей ДК-116

Продолжение приложения А

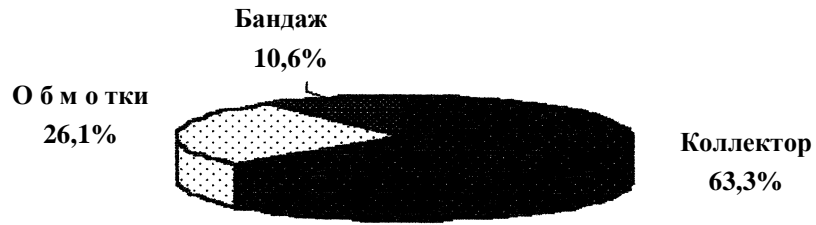


Рисунок А3. - Распределение отказов деталей якоря тягового двигателя ДК-116

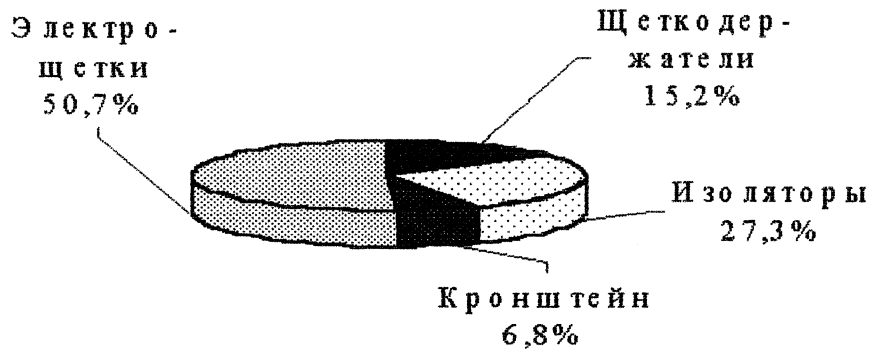


Рисунок А 4. - Распределение отказов щеточного аппарата тяговых двигателей ДК-116

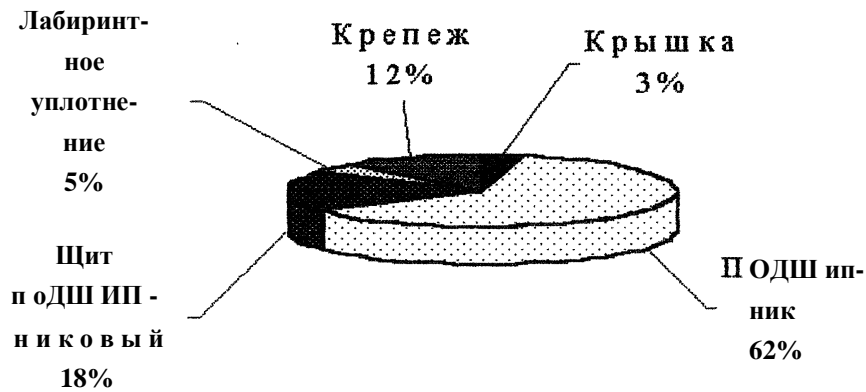


Рисунок А 5. - Распределение отказов деталей подшипникового щита тягового двигателя ДК-116

## Приложение Б

Таблица Б. 1 - Электрические отказы тяговых двигателей ДК-116 за 1998г.

Вид дефекта	Кол-во	В %от общ.кол-ва
Короткое замыкание в обмотках якоря	4	3,9
Обрыв проводников обмотки якоря	5	4,8
Замыкание обмотки якоря на корпус	67	64,4
Замыкание пластин коллектора на корпус	3	2,9
Пробой изоляции главных полюсов	7	6,7
Пробой изоляции доп. полюсов	5	4,8
Отгорание перемычек полюсов	10	9,6
Перегорание силового кабеля	3	2,9
Всего	104	100%

Таблица Б. 2 - Механические отказы тяговых двигателей ДК-116 за 1998г.

Вид дефекта	Кол-во	В % от общ. кол-ва
Размотка бацдажа	16	14
Разрушение якорных под шипников	53	46,5
Обрыв болтов якорного шита	5	4,4
Проворот шестерни	1	0,9
Увеличенный осевой разбег якоря	33	28,9
Задир по коллектору	4	3,5
Разрушение щеточного аппарата	2	1,8
Всего	114	100%

Приложение В

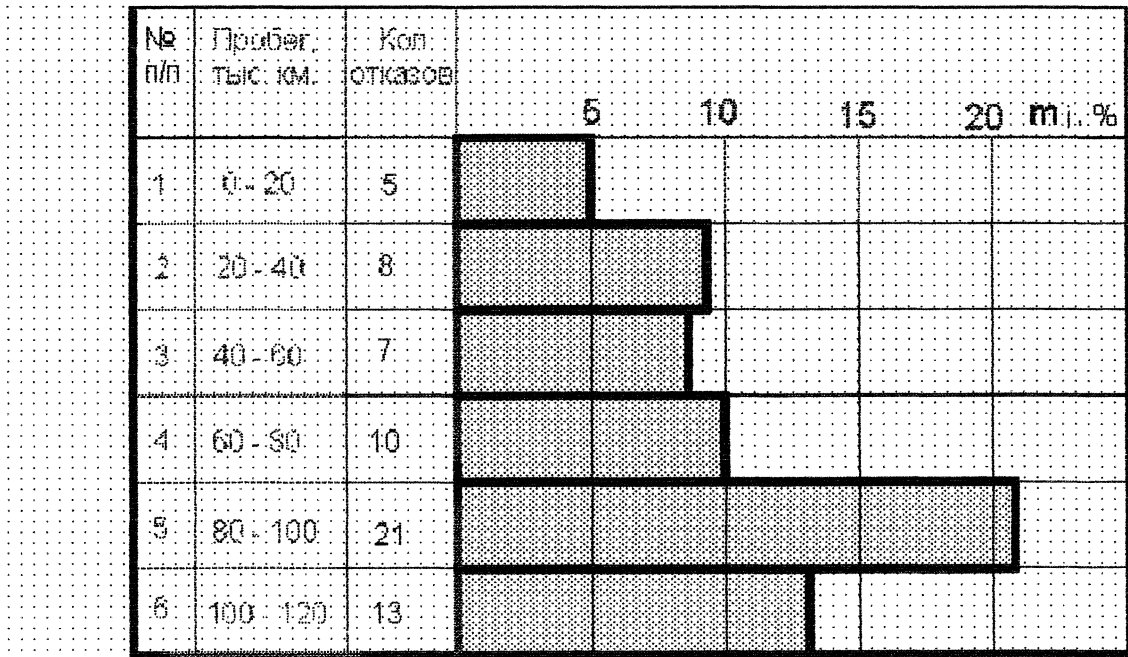


Рисунок В. 1 - Распределение отказов тяговых двигателей ДК-116 по

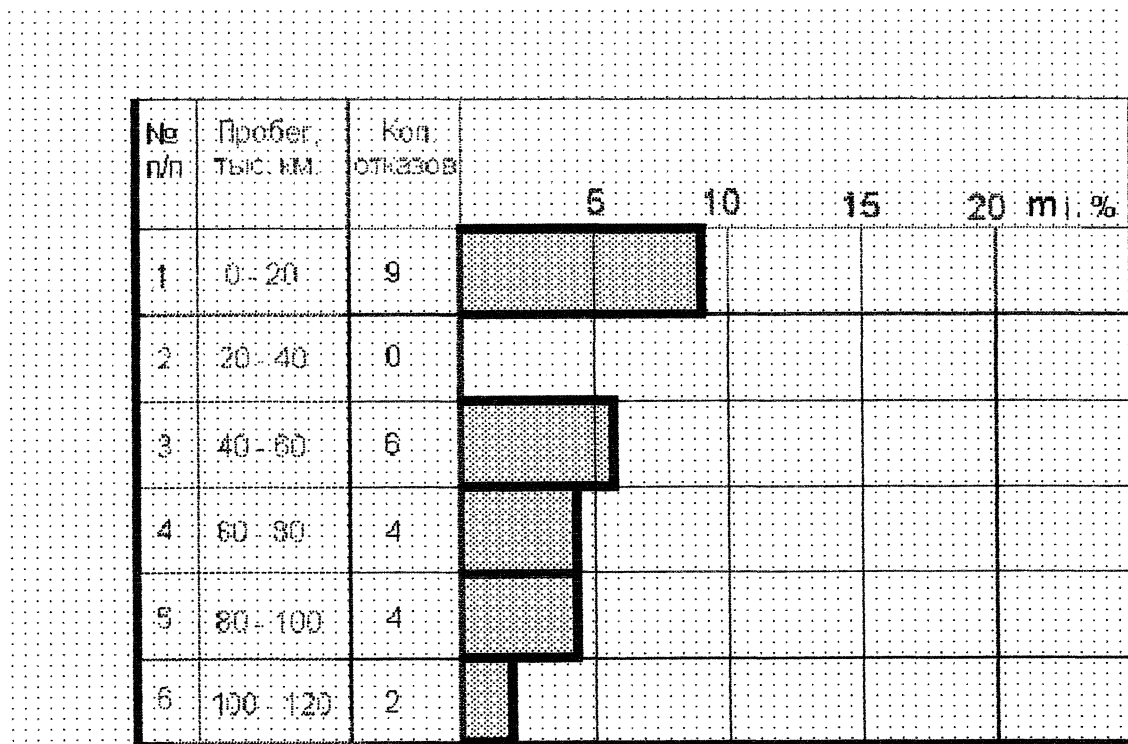


Рисунок В. 2 - Распределение отказов тяговых двигателей ДК-117 по

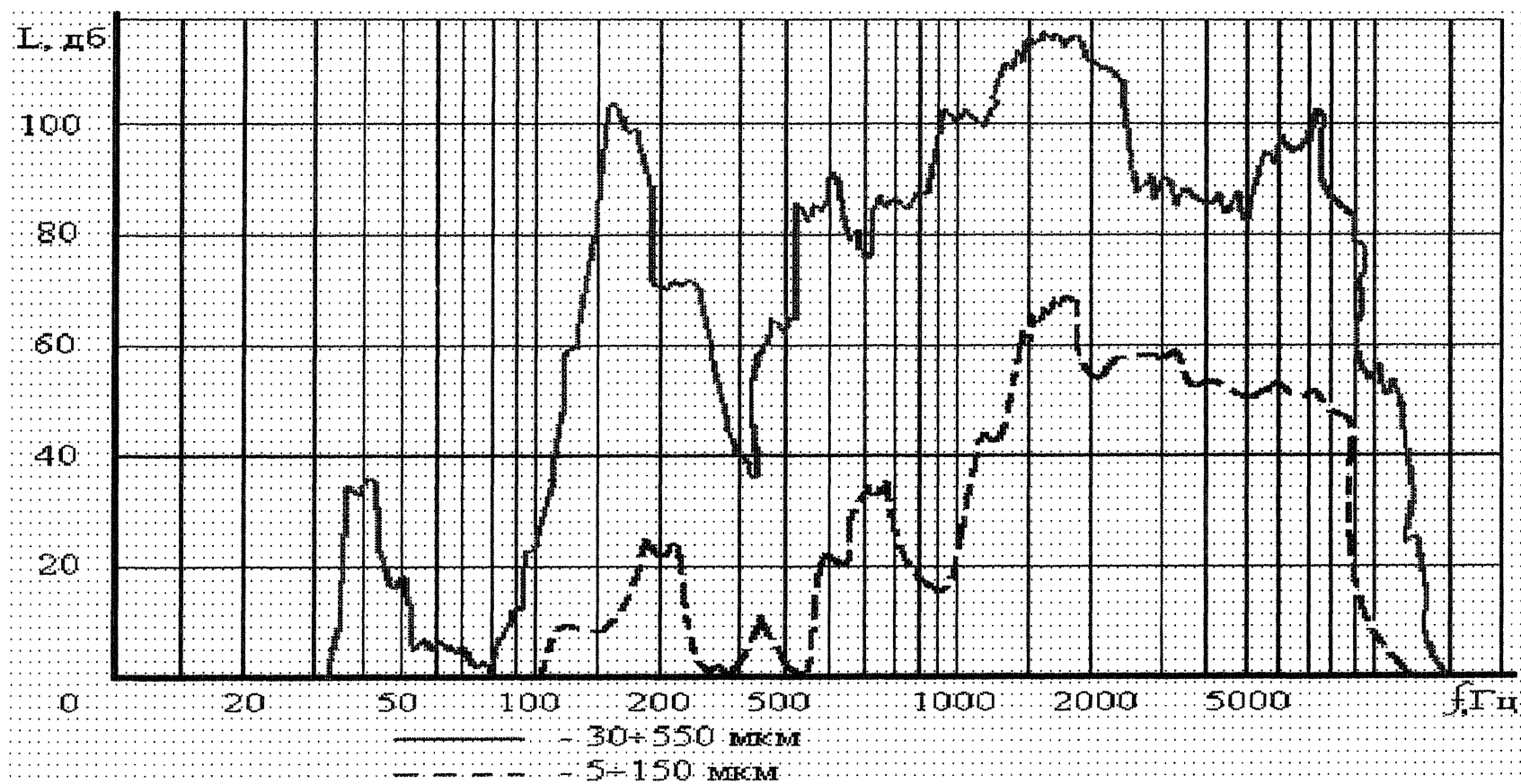
## Приложение Г

Вид ремонта	Пробег, тыс. км	Кол-во отказов	4	8	12	16	мл. %
ТР-3	0 - 20	3	3				
	20 - 40	0					
	40 - 60	3	3				
	60 - 80	1	1				
	80 - 100	0					
ТР-2	0 - 20	0					
	20 - 40	3	3				
	40 - 60	1	1				
	60 - 80	1	1				
	80 - 100	8	8				
100 - 120	3	3					
ТР-1	0 - 20	5	5				
	20 - 40	5	5				
	40 - 60	3	3				
	60 - 80	11	11				
	80 - 100	20	20				
100 - 120	10	10					

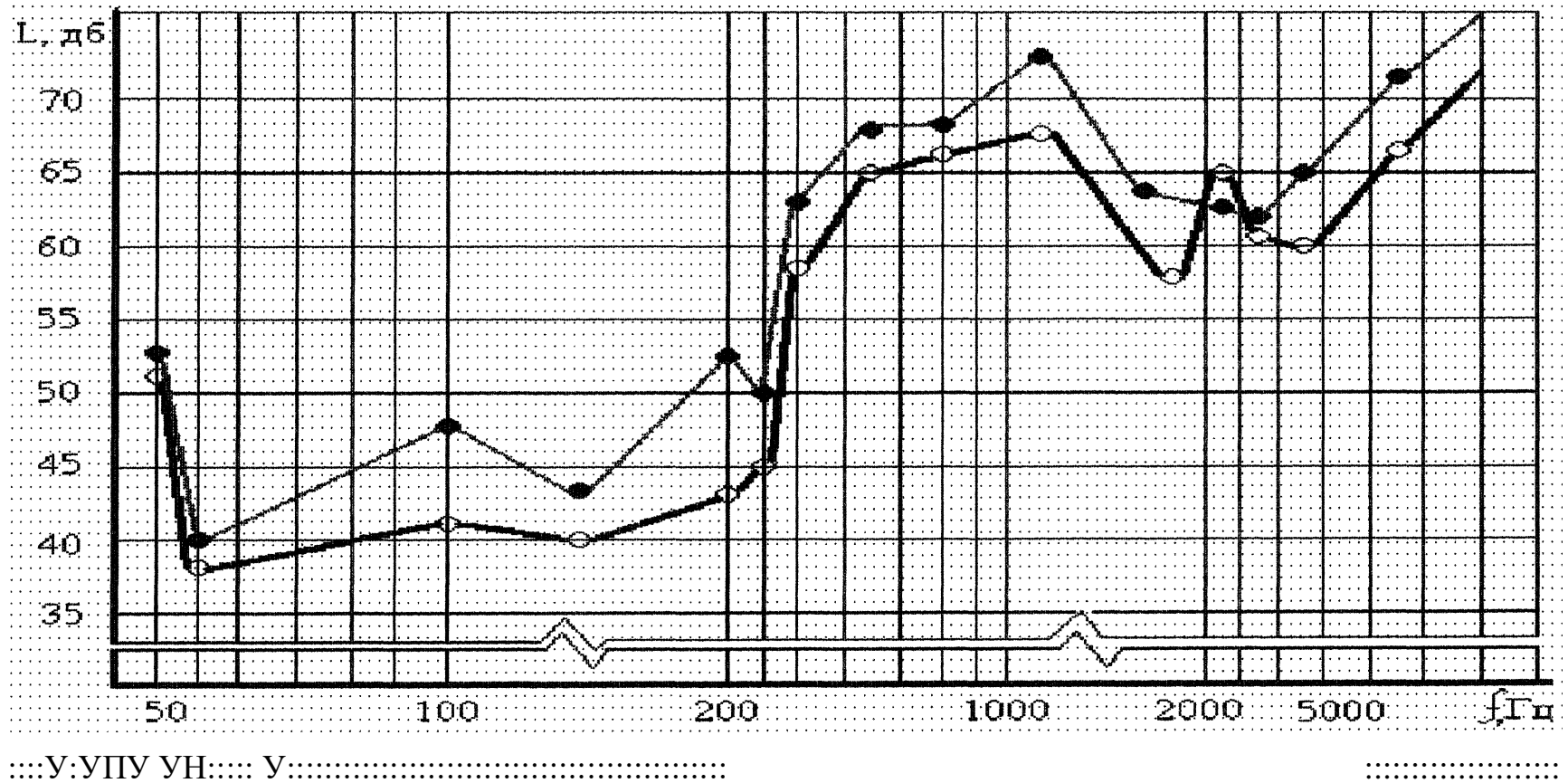
Рисунок К1 1 - Электрические отказы тяговых двигателей ДК-116

Вид ремонта	Пробег, тыс. км	Кол-во отказов	20	40	60	мл. %
ТР-3	0 - 20	3	3			
	20 - 40	8	8			
	40 - 60	8	8			
	60 - 80	12	12			
	80 - 100	22	22			
100 - 120	7	7				
ТР-2	0 - 20	7	7			
	20 - 40	15	15			
	40 - 60	12	12			
	60 - 80	30	30			
	80 - 100	18	18			
100 - 120	12	12				
ТР-1	0 - 20	21	21			
	20 - 40	22	22			
	40 - 60	22	22			
	60 - 80	24	24			
	80 - 100	66	66			
100 - 120	30	30				

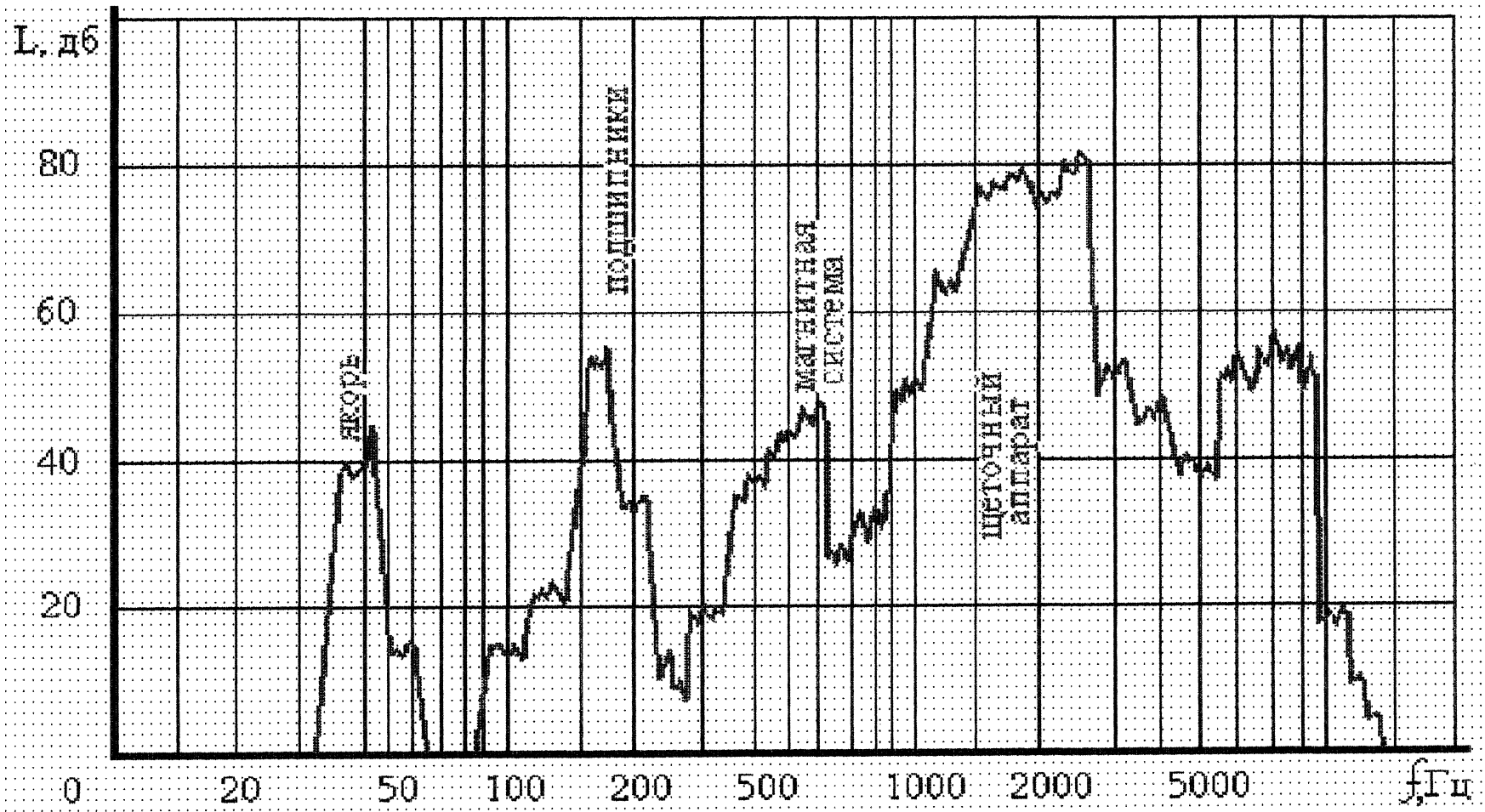
Рисунок К 2 - Механические отказы тяговых двигателей ДК-116



Спектры вибраций подшипника 310 тягового двигателя ДК-116 в зависимости от величины зазора



Уровни вибраций в подшипнике 310 тягового двигателя ДК-116 в зависимости от применяемой смазки



Уровень вибраций в узлах тягового двигателя ДК-116