

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**Л.В. ЕФРЕМОВ**

**ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
НАДЕЖНОСТНО – ОРИЕНТИРОВАННОЙ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ  
МАШИН**

Санкт-Петербург  
"ART-XPRESS"

2015

УДК 629.02:06–192

ББК 39.45

Е92

*Ефремов Л.В.* Проблемы управления надежностно–ориентированной технической эксплуатацией машин — СПб. Art-Xpress, 2015. – 206 с.

**ISBN 978-5-4391-0166-5**

Рассмотрены компоненты методологии RCM и предложена концепция управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией изделий машиностроения с учетом вероятностной природы отказов и процессов деградации состояния их элементов. Показаны примеры управления надежностью в зависимости от стратегии технического обслуживания и ремонта машин. Приведен ряд оригинальных программ расчета надежности в математическом редакторе MATHCAD.

Для сотрудников академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, испытательных лабораторий и специалистов промышленных предприятий, преподавателей и студентов технических университетов.

Yefremov L.V. Problems of reliability-oriented technical operation of machines - SPb .: Art-Xpress, 2015. - 206 p.

**ISBN 978-5-4391-0166-5**

The elements of RCM methodology and proposed a new concept of management focused on the reliability of technical operation of engineering products based on the probabilistic nature of the failures and degradation status of their members. Showing examples of reliability management, depending on the strategy of maintenance and repair of machines. An number of original programs in the mathematical calculation of reliability editor MATHCAD.

For the employees of academic and industrial research institutes, design offices, testing laboratories and specialists of industrial enterprises, teachers and students of technical universities.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. М. Мусалимов  
д-р техн. наук, проф. Ю.А. Фадин

Монография рекомендована к опубликованию решением Ученого Совета института проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН) от 15 сентября 2015 года (Протокол 1/4).

**ISBN 978-5-4391-0166-5**

© Л. В. Ефремов, 2015

© ИПМаш РАН, 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот труд посвящен проблеме машиностроения, актуальность которой становится особенно очевидной, если вспомнить о катастрофических последствиях таких событий, как авария Саяно-Шушенской ГЭС [5].

Для поддержания машин и механизмов в исправном и работоспособном состоянии, предприятиям промышленности и транспорта приходится нести существенные материальные затраты и потери рабочего времени на техническое обслуживание и ремонт (ТОР), которые являются основными составляющими их технической эксплуатации. Сокращение этих затрат при одновременном обеспечении высокой надежности техники представляет собой важную и сложную проблему, которая актуальна для всех этапов жизненного цикла изделий. Например, на флоте рыбной промышленности Союза ССР проводилась огромная работа по созданию для серийных типов судов комплексной системы непрерывного технического обслуживания и ремонта (СНТОР). Цель этой работы состояла в повышении коэффициента технического использования судов за счет переноса части заводских ремонтных операций в сферу эксплуатации при условии сохранения требуемого уровня надежности. В комплекс документации входили инструкции по ТОР, ремонтные ведомости, ведомости запасных частей и др. для машин, механизмов и конструкций судов [6,47]. Аналогичная работа проводилась во всех отраслях промышленности и транспорта, что способствовало совершенствованию теории и методического обеспечению исследований в этой области.

Поэтому отечественные специалисты по надежности техники с интересом восприняли рекламу услуг ряда компаний [40...43,46,49 и др.] по автоматизированному управлению физическими активами и ТОР оборудования промышленных предприятий на основе методологии RCM (Reliability Centered Maintenance). Название этой методологии трактуется, как «техническое обслуживание, ориентированное на надежность» [21].

Критический обзор информации в первой главе монографии показал, что методология RCM в большей мере базируется на теории структурной надежности электронных систем, хотя это не отражает специфику оценки показателей долговечности машин и механизмов с учетом процессов деградации их состояния и стратегий ТОР. Из первой главы так же следует, что автоматизированные системы управления (АСУ) активами и ТОР предприятий, созданные рядом компаний под флагом RCM, хотя и позволяют повышать эффективность обслуживания оборудования, но мало связано с оценкой и корректировкой надежности самих машин при эксплуатации.

Выполненный анализ документации о RCM позволил сформулировать целевое назначение последующих разделов данной книги. Была предложена концепция управления надежностью – ориентированной технической эксплуатацией (НОТЭ) машин, для которых, в отличие от электронных систем, актуальное значение имеет не только расчет интенсивности отказов по эксплуатационным данным, но и оценка ресурсов машин и их элементов по сведениям о дефектах из ремонтной документации или по результатам стендовых испытаний.

Введенное понятие НОТЭ вызвано тем, что термин «техническая эксплуатация» более полно отражает содержание ТОР по сравнению с входящим в его же состав процесса «техническое обслуживание».

Предлагаемая концепция базируется на терминах и определениях о надежности не по ГОСТ Р 27.002-2009, а по-старому, проверенному многолетним опытом, стандарту ГОСТ 27.002-89. Актуальной проблемой является классификация объектов и субъектов изучения надежности. С понятиями об объектах связана проблема классификации видов ТОР, которые выполняются либо по потребности, либо по состоянию или по плану. От классификации объектов и видов ТОР зависит выбор метода расчета и прогнозирования показателей долговечности и ремонтпригодности машин, связанные с постепенными потенциальными отказами (повреждениями) по причине деградации состояний их узлов и деталей. Рассмотрена классификация субъектов изучения надежности, поскольку из методологии RCM трудно понять, кто должен выполнять эту работу (изготовитель, поставщик или владелец продукции), кем, как и когда получается исходная информация о надежности и так далее. Отмечена роль сервисного обслуживания в процессе изучения и коррекции надежности службами изготовителя машин.

В последней главе книги даны примеры управления надежностью продукции машиностроения при технической эксплуатации. В этих примерах обозначаются цели и задачи исследуемых вариантов управления НОТЭ и показаны отдельные технические приемы измерений повреждений, которые можно использовать при оценке надёжности других объектов. Особую роль играет обоснование возможности корректировки назначенного ресурса машины в пределах до 25% по результатам диагностирования.

Предлагаемая концепция НОТЭ направлена на решение проблем надежности машин и объектов конечного назначения на этапе их эксплуатации с использованием нормативно – технической документации от поставщиков этого оборудования.

В частности, монографию планируется использовать как учебное пособие в учебном процессе по дисциплине «Техническая эксплуатация и надежность промышленного оборудования» на кафедре «Машиноведение и основы конструирования» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. М.А. Скотникова).

Нельзя не отметить благожелательные отзывы рецензентов этой монографии д-ра техн. наук, проф. В. М. Мусалимова и д-ра техн. наук, проф. Ю. А. Фадына, критические замечания которых были с благодарностью приняты и учтены автором перед сдачей рукописи в печать.

## Основные обозначения и сокращения

LA, LB и LR	предельно-допустимый, условно-допустимый и критический уровень состояния объекта
RCM	reliability centered maintenance – техническое обслуживание, ориентированно на надежность
АСУ	автоматизированная система управления
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ВБР	вероятность безотказной работы
ВРШ	винт регулируемого шага
ВФШ	винт фиксированного шага
ГПР	гамма – процентный ресурс
ДВС	двигатель внутреннего сгорания
ДП	диагностический параметр
ДУ	дизельная установка
ЗМН	запас метрологической надежности
ИИ	источник информации
КБ	конструкторское бюро
ЦПКБ	центральное КБ
МРТО	межрейсовое техническое обслуживание
РМРТО	расширенное МРТО
МРХ	министерство рыбного хозяйства
НИИ	научно-исследовательский институт
ЦНИИ	центральный НИИ
НОТЭ	надежностно-ориентированная техническая эксплуатация
ОКН	объект конечного назначения
ПИН	процесс изучения надежности
ПП	производственный процесс
ППР	система планово-предупредительных ремонтов
ППО	планово-профилактическое обслуживание
РС	регистр судоходства
СКО	среднее квадратическое отклонение
СНТОР	система непрерывного технического обслуживания и ремонта
СТД	средства технической диагностики
ТО	техническое обслуживание
ТОР	техническое обслуживание и ремонт
ХДП	характеристика диагностического параметра
ХМ	холодильная машина
ЦМ	цензурированная модель

Примечание: Обозначения компонентов RCM даны в таблицах 1 и 2.

# 1. Общие сведения о методологии RCM

## 1.1. Источники информации о RCM

Методология RCM была первоначально разработана в 1960-х годах в США для гражданской авиации и отражена в международных стандартах ATA-MGS-3, SAE JA1011 и SAE JA1012 [2...4]. Эта методология связана с рядом таких программ, как FMEA/FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), CBM (Condition Based Maintenance), RBI (Risk Based Inspection), RCA (Root Cause Analysis), FTA (fault tree analysis), FRACAS (Failure Reporting Analysis and Corrective Actions System) [49] и др.

На основе зарубежных документов о RCM был создан комплекс аналогичных национальных стандартов. К ним можно отнести стандарты серии «Менеджмент риска» [23...29] и некоторые стандарты серии «Надежность в технике» [14...19]. В частности, непосредственное отношение к методологии RCM имеет ГОСТ Р 27.606-2013 «Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность» [21].

В этой главе представлена рекламная информация, которая может быть полезна предприятиям промышленности и транспорта при решении вопроса о заключении договоров с корпорациями о внедрении методологии RCM с учетом стоимости и эффективности получаемых услуг и документов. Однако в нашей книге эта информация анализируется с другой целью – для совершенствования методологии управления надежностью машин с учетом стратегии TOP в отличие от методов структурной надежности электронных систем. В основу первой главы книги положены следующие источники информации (ИИ).

1. группа ИИ Государственные стандарты о RCM и ее компонентах
2. группа ИИ Сайты ряда корпораций с описанием методологии RCM и ее компонентов.
3. группа ИИ Сайты ряда корпораций с рекламой их услуг по управлению активами предприятий и TOP.

В первую группу ИИ включены отечественные стандарты, которые имеют отношение к методологии RCM. Например, к ним относятся такие стандарты.

ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

ГОСТ Р 27.606-2013 Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность

ГОСТ Р 51901.1-2002 Менеджмент риска технологических систем

ГОСТ Р 51901.5-2005 Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.

ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов (FMEA).

ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей.

ГОСТ Р 51891.14 – 2007 (ИСО 1161:1984) Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы.

ГОСТ Р 51901.15-2005(МЭК 165:1995) Менеджмент риска. Применение марковских методов.

ГОСТ Р 51901.16-2005 «Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки» и другие.

Ко второй группе ИИ относятся сайты таких корпораций как «Maintex», «Максима», «TOPS Consulting», «Технология надежности» и особенно - «KConsult C.I.S.» и ReliaSoft .

Компания «KConsult C.I.S. LLC» [42] представляет в России и странах СНГ интересы европейской консультационной группы «KConsult GmbH» со штаб-квартирой в Германии (земля Баден-Вюртемберг). Сфера деятельности компании включает в себя предоставление консультационных и учебных услуг в области управления надёжностью и безопасностью в различных отраслях промышленности. Она рекламирует анализ и расчёты надёжности и безопасности функционирования высокотехнологических систем и оборудования; подбор, внедрение и поддержка специализированного прикладного программного обеспечения; разработку руководящей документации в этой области в соответствии с российскими и международными стандартами.

Наиболее обстоятельные сведения о программном обеспечении анализа и расчета надежности даны на портале корпорации ReliaSoft [43]. Основанная в 1992 году в городе Тусон, штата Аризона, она стала мировым лидером по разработке программного обеспечения по вопросам анализа и расчета надежности, обучению и консалтингу. Компания организует обучение анализу и расчету вероятностных характеристик надежности. Занятия проводятся в США высококвалифицированными преподавателями по всем разделам этой дисциплины [<http://www.reliasoft.com/seminars/courses/g300.htm>].

Сайты третьей группы ИИ содержат примеры программных модулей планирования, регистрации и отчетности работ по ТОР на основе концепции стандарта серии (Publicly Available Specification) PAS 55 об оптимальном управлении физическими активами, которые еще называются основными фондами. Спецификация PAS 55 построена на принципах международного стандарта ISO 9001 о качестве продукции. Наиболее обстоятельная информация такого рода дана на сайтах компаний «Ремонт-Эксперт», «PCM-системы» [46] и, особенно, «СпецТек» [41].

В 1994 году компания НПП «СпецТек» начала разработку собственного продукта - программного комплекса под названием TRIM (Targets Related Infrastructure Management) и за истекшие годы он был усовершенствован и внедрен многими промышленными и транспортными предприятиями России.

Перечень основных компонентов РСМ приведен в таблице 1.

Таблица 1 Основные компоненты методологии РСМ

Методика	Язык названия методики	
	Русский	Английский
RCM	Техобслуживание, ориентированное на надежность	<b>Reliability Centered Maintenance</b>
CBM	Обслуживание по состоянию	<b>Condition Based Maintenance</b>
RBI	Инспекция с учетом факторов риска.	<b>Risk Based Inspection</b>
FMEA	Анализ видов и последствий отказов	Failure Mode, Effects Analysis
FMECA	Анализ видов, последствий и критичности отказов	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FRACAS	Оповещения об отказах, анализ и корректирующие действия	Failure Reporting Analysis and Corrective Actions
RCA	Анализ коренных причин отказов	Root Cause Analysis
EAM/MRO	Система управления активами и ТОР	Enterprise Asset Management/Maintenance, Repair and Overhaul
MTBF	Среднее время безотказной работы	Mean time between failures
MTTR	Среднее время восстановления	mean time to restoration
FTA	Анализ дерева отказов	fault tree analysis
RBD	Анализ диаграмм надёжности	block diagrams Reliability
ALT	Ускоренное тестирование долговечности	Accelerated Life Testing
RGA	Анализ повышения Надежности и Ремонтопригодности Систем	Reliability Growth Analysis and Repairable System Analysis

## 1.2. Порталы о методологии РСМ

### 1.2.1. Программные продукты корпорации KConsult C.I.S. LLC

На сайте [42] корпорации KConsult C.I.S., кроме анализа видов, последствий и критичности отказов FMEA/FMECA, рассматриваются модули анализа дерева отказов FTA (fault tree analysis), диаграмм надёжности RBD (block diagrams Reliability), коренных причин отказов RCA (Root Cause Analysis), инспекции с учетом факторов риска RBI (Risk Based Inspection) и других. Это



значит, что основная концепция методологии RCM базируется на методах расчета структурной надежности (точнее – безотказности) электронных систем. За рубежом созданы справочные библиотеки с базой данных об интенсивности отказов различных элементов систем (MIL-HDBK-217, Telcordia Issue 2, Siemens SN 29500, 217 Plus, IEC TR 62380, FIDES 2009, и др.) Это и позволяет выполнять анализ FMEA/FMECA на стадии проектирования.

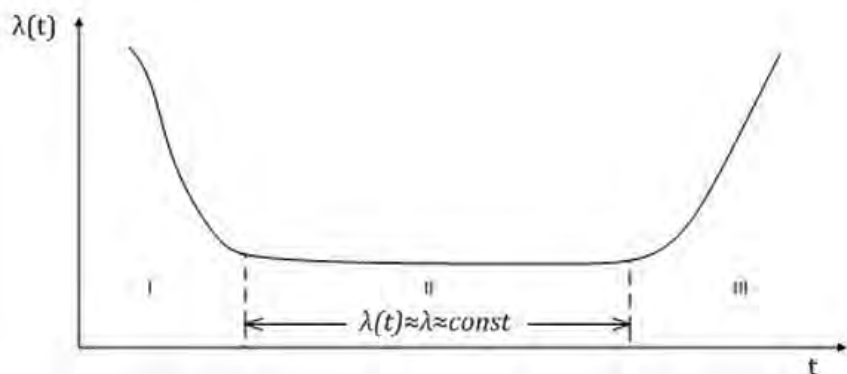


Рисунок 1 Типовая зависимость интенсивности отказа от времени, где I - участок приработки, II - участок нормальной эксплуатации, III- зона интенсивного износа

При этом основными показателями надежности служат наработки на отказ МТBF и (или) интенсивность отказов  $\lambda = const$  на участке нормальной эксплуатации на схеме рис. 1.

Имеются осторожные попытки распространить этот принцип на машины и механизмы. Так к сайту приложено американское руководство NSWC-11[1], где излагается методика расчета интенсивности отказов для отдельных элементов механизмов с учетом их конструктивно технологических особенностей. Например, для пружины сжатия рекомендуется такая методика корректировки интенсивность отказов пружины по эмпирическому коэффициенту уровня напряжения к пределу прочности материала (дается ссылка на источник):

$$\lambda_{SP} = \lambda_{SP.B} \left( \frac{S_G}{T_s} \right)^3 = \lambda_{SP.B} \left( \frac{8P_L D_C K_W}{\pi T_s D_W^3} \right)^3 \quad (1)$$

где  $\lambda_{SP.B}$  - основная интенсивность отказов для пружины, равная 23.8 неисправностей/миллион часов,

$T_s$  - предел прочности материала,

$S_G$  - рабочие напряжения в пружине,

$P_L, D_C, K_W$  и  $D_W$  - конструктивные характеристики пружины.

Обобщенное уравнение, которое корректирует основную интенсивность отказов любых исследуемых деталей и узлов механизмов приведено к следующему виду:

$$\lambda_{SP} = \lambda_{SP.B} \prod_{i=1}^N C_i \quad (2)$$

где:  $C_i$  - умножающие коэффициенты, которые учитывают влияние различных факторов на интенсивность отказов,  $N$  - общее число факторов. В руководстве приводятся соответствующие таблицы и графики для определения каждого коэффициента.

Для пружины сжатия в формуле учтено 10 факторов, таких как модуль жесткости материала, диаметр и число витков, сила растяжения, эффект прогиба, концентрация напряжений, коррозия, качество изготовления и прочее.

Такой подход к анализу структурной надежности механизмов представляется спорным, поскольку постоянная интенсивность отказов в большей мере зависит от внешних факторов (особенно человеческих). Опыт расследования крупных аварий и катастроф показывает, что они зачастую происходит по причинам, которые даже не могли прийти в голову проектантам объектов. Это будет показано на примере крупной аварии двигателя морского судна (раздел 4.4).

Важнейшим аспектом управления надежностью при эксплуатации уже созданного сложного объекта или системы является непрерывный мониторинг и тщательное расследование любых инцидентов, возникающих в процессе его использования с целью повышения качества оборудования. Программные решения, предлагаемые компанией KConsult C.I.S., реализуют базовую методологию мониторинга надёжности и функциональности FRACAS (Failure Reporting Analysis and Corrective Actions,) путем оповещения об отказах, анализа и корректирующих действий.

Программа FRACAS позволяет автоматизировать основополагающие процессы управления качеством и безопасностью путем управления: корректирующими и предупредительными мероприятиями (Corrective Action and Preventive Action, CAPA), исполнения гарантийных обязательств и связанными с этим возвратами продукции (FRACAS Returns Management), а также общими корректирующими мероприятиями по инцидентам в эксплуатации (Standard FRACAS).

Все перечисленные разделы анализа компания KConsult C.I.S. рекомендует решать с помощью Семейства программных решений Windchill Quality Solutions (WQS), которое показано в следующем параграфе.

### 1.2.2. Семейство программных решений Windchill Quality Solutions

В интернете можно приобрести семейство программных решений Windchill Quality Solutions (WQS) [49] у известной корпорации PTC (Parametric Technology Corporation®). Методология WQS создана для управления качеством и надежностью сложных технологических продуктов, изделий, оборудования, объектов и систем. Этот продукт наследует опыт применения и функциональные возможности продуктов по оценке надежности компании Relex Software Corporation после ее вхождения в 2010 году в состав корпорации PTC.

Скорее всего, методология этого продукта предназначена для использования службами предприятий, которые создают (проектируют и изготавливают) исследуемые продукты, поскольку именно она заинтересована в применении анализа FRACAS.



Рисунок 2 Титульный лист программного продукта WQS

Тестовая версия семейства решений PTC Windchill Quality Solutions 10.2 демонстрируется на примере планшетного персонального компьютера (ППК) и представлено следующими программными модулями.

Первый модуль «Прогнозирование надежности» - это техника численного анализа, используемая для прогнозирования интенсивности отказов системы на основании данных о компонентах системы и ее рабочих условиях. В инструкции по использованию программы модуля сказано, что прогнозирование надежности выполняется в соответствии с принятым и опубликованным руководством, в котором приведены интенсивностей отказов  $\lambda$  для различных компонентов, используемых при проектировании системы. Отметим, что такие нормы опубликованы далеко не для всех систем. В принципе они должны разрабатываться путем статистических методов анализа, данных об отказах, собранных на реальном действующем оборудовании. Ясно лишь, что в основу положен принцип постоянства интенсивности каждого  $i$  – го элемента ( $\lambda_i = \text{const}$ ) при экспоненциальном законе распределения, когда интенсивность отказов всей системы из элементов определяется по их сумме.

Второй модуль FMEA заключается в анализе видов и эффектов отказа, что уже было показано при рассмотрении подсистем RCM. Анализ FMEA выполняется на основе опубликованных стандартов или инструкций. Вместе с тем, как бы, между прочим, поощряется разработка собственных инструкций для FMEA самими службами. Не трудно понять насколько это сложная, продолжительная и дорогостоящая научно-исследовательская работа.

Третий модуль FTA содержит дерево неисправностей и методику анализа причин отказов элементов системы: недостатки программного обеспечения, ошибки человека, ошибки при работе и обслуживании, а также влияние среды.

The screenshot shows the WQS software interface. The top window, titled 'Элементы дерева системы', displays a hierarchical tree of system components. The bottom window, titled 'DVP FMEA', shows a table of test reports.

Идентификатор D...	Элементы дере...	Причины	Описание испыт...	Критерии прием...	Этап испытаний	Ответственность	Количество	Тип	Дата начала	Дата окончан...	Результат	
1	Отчет 1	0 Элементы дере...	1 Вид	Проверка уплотнения корпуса батарей	100 % уплотнений корпуса проверено	Проверка конструкции и оценка качества продукта	Группа испытателей батарей	2000,000000	Рабочие образцы	06.05.2013	06.05.2013	99,9 % пр...
2	Отчет 2	0 Элементы дере...	1 Вид	Испытание возд...	Батарея поддер...	Проверка констр...	Группа испытате...	5000,000000	Рабочие...	10.05.2013	12.05.2013	Проход
3	Отчет 3	0 Элементы дере...	1 Вид	Испытание возд...	Батарея поддер...	Проверка констр...	Группа испытате...	5000,000000	Рабочие...	12.05.2013	14.05.2013	Проход
4	Отчет 4	0 Элементы дере...	1 Вид	Проверка запуска	Удостоверьтесь, ...	Проверка констр...	Группа испытате...	7500,000000	Рабочие...	13.05.2013	15.05.2013	Проход
5	Отчет 5	0 Элементы дере...	1 Вид	Испытание уху...	Проверьте время...	Проверка констр...	Группа испытате...	10000,000...	Рабочие...	17.05.2013	19.05.2013	Проход
6	Отчет 6	0 Элементы дере...	1 Вид	Выполните уско...	Средняя долгово...	Проверка констр...	Группа ускоренн...	50,000000	Рабочие...	02.03.2013	21.05.2013	Целевая

Рисунок 3 Дерево системы исследуемого объекта из программы WQS

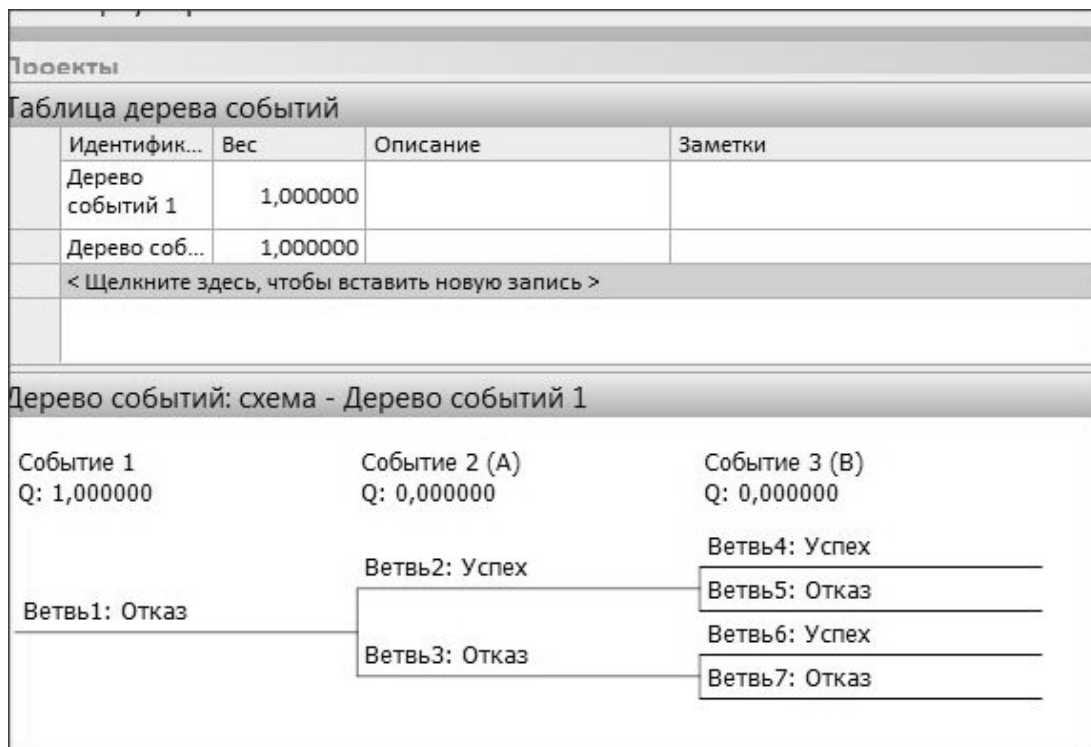


Рисунок 4 Дерево неисправности

В основе FTA лежит дедуктивный, нисходящий подход, который начинается с анализа одного события, обычно являющегося нежелательным или ката-

строфическим отказом, и затем выполняется процесс определения конкретных причин, способных привести к возникновению этого события.

Методика ФТА основана на простом наборе правил и логических символов (таких как переходы «И», «ИЛИ» и др.) из теории вероятности и булевой алгебры. Она состоит в создании логической модели, которая позволяет произвести как качественную, так и количественную оценку надежности или готовности системы. Дерево неисправностей является графическим представлением событий, которые могли бы привести к возникновению нежелательных последствий.

Четвертый модуль RBD представляет собой блок-схему надежности, которая соответствует методике анализа структурной надежности системы с целью создания оптимальной конфигурации с точки зрения ее резервирования. Блок схемы можно использовать для моделирования последовательных или параллельных соединений элементов систем, а также комбинаций последовательно-параллельных систем. Методы структурной надежности хорошо известны и имеют широкое применение при анализе электрических и электронных систем. Однако в рассматриваемом модуле алгоритмы (формулы) расчетов вероятности безотказной работы сложных систем не приводятся. Вместо этого предлагается нажимать на кнопки по указаниям инструкции.

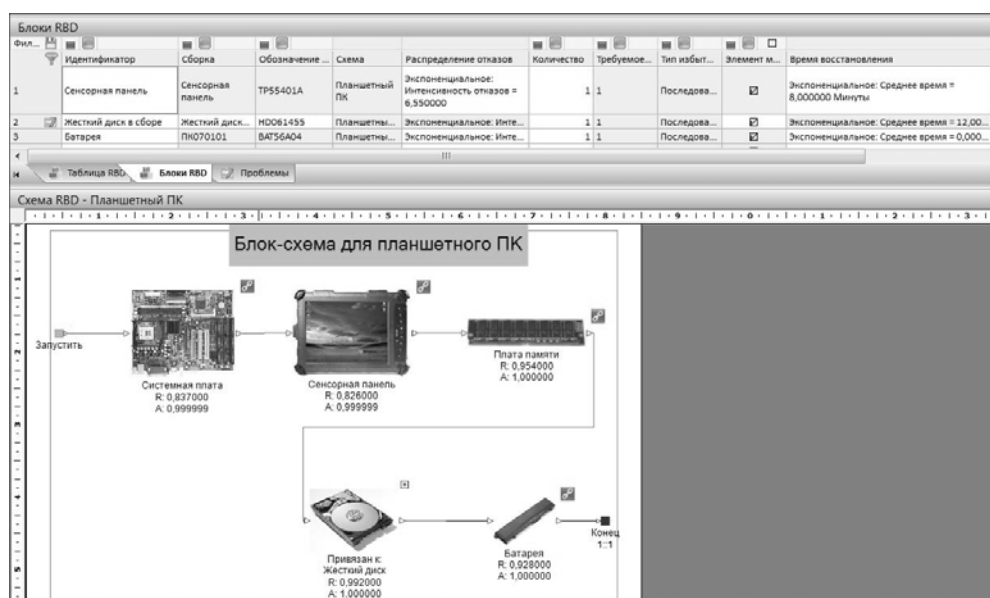


Рисунок 5 Блок RBD

Пятый модуль «Анализ Маркова» также относится к области структурной надежности систем. Из всех методик анализа структурной надежности анализ Маркова является методом, который можно применять для более точного моделирования сложных систем, включая отказы по общим причинам, неполную компенсацию, избыточную нагрузку, сложные правила ремонта, ухудшение, эффекты ударов, индуцированные отказы, зависимые отказы и другие события, зависящие от последовательности. В нашей книге этот анализ далее не рассматривается.

Шестой модуль FRACAS (Failure Reporting Analysis and Corrective Actions System), представляет собой систему оповещения об отказах, анализа и коррек-

тирующих действий. Это методология управления процессами контроля качества и обеспечения высокого уровня надежности серийной продукции предприятий тяжелой промышленности, машиностроения, авиации, транспорта, военно-промышленного комплекса.

В частности, имеется возможность отслеживание трендов, разделение проблем по приоритетам с помощью встроенного анализа Парето.

Шестой модуль содержит анализ Вейбулла, предназначенный для оценки эксплуатационной долговечности и анализа данных об отказах. В этом документе он демонстрируется изолировано без привязки к конкретному элементу объекта. Далее об этом модуле будет подробнее рассказано при описании портала ReliaSoft, а оригинальным рабочим алгоритмам и программам для этого и других распределений посвящается вторая и третья глава книги.

Основным алгоритмом деятельности FRACAS является организация и использование замкнутых циклов контроля производства/эксплуатации (практического применения) продукции, состоящих из следующих сегментов: сбор данных; анализ данных; идентификация моделей; исследование отклонений; выработка корректирующих действий по ликвидации выявленных отклонений от заданной модели производства, качества или надежности компонентов. Модуль содержит универсальные бланки для информации на всех этапах принятия решения о повышении надежности каждого элемента системы.

Форма для происшествия FRACAS

**TUF-TABLET<sup>®</sup>**  
*International*

**ID** 005

**Данные о детали:**  
Наименова: Батарея  
Обозначение: BAT56A04 Серийный: 800182

**Запись происшествия:**  
Дата возникновения: 15.04.2013 Техник: Анджелина Джо  
Описание происшествия: Заказчик возвратил полностью сгоревший планшетный ПК (SN 22-CN058999-849-T65). Владельца не было рядом с компьютером в момент возгорания, но система работала.  
Attachments: Приложения 0

**Информация о восстановительном действии:**  
Дата: 23.04.2013 Восст. выполнено: Франк  
Описание восстановит действия: процессе производства. 100-процентная выборка показала, что новый процесс ограничивает фрагменты до приемлемого уровня (см. отчет M1066).  
Присоединен: Приложения 0

**Анализ происшествия:**  
Дата: 16.04.2013 Анализ выполнен: Майк  
Описание анализа: Полностью разобраны все остальные компоненты планшетного ПК. Методом исключения определено, что основной причиной возгорания была батарея. Проверка батарей  
Вид отказа: Закороченный  
Присоединен: Приложения 0  
Статус: Закрыто

**Информация о закрытии:**  
Дата: 27.04.2013 Закрытие выполнено: Комиссия по :  
Описание, закрытие: Похоже, примененное восстановительное действие позволило решить проблему. Оценить базу данных FRACAS в целом, чтобы выявить тенденцию для отказа данного типа и  
Серьезность: 10  
Присоединен: Приложения 0  
 Релевантное  Влияющее?  Закрыто

Рисунок 6 Заявочный лист для системы FRACAS

Седьмой модуль ALT означает ускоренное тестирование жизненного цикла. Это способ имеет цель ускорить испытания изделия, позволяющий вести более быстрый поиск характеристик надежности изделия. Чтобы применить методики ALT, изделия испытываются в ситуациях высокого напряжения, которые обычно сокращают долговечность изделия или форсируют ухудшение характеристик изделий. Понятие "напряжение", используемое в этих испытани-

ях, относится к любой переменной ускорения. В нашей методике используется альтернативный термин «нагрузка». Статистически подогнав модель ускорения к данным испытаний, можно оценить долговечность или степень ухудшение качества изделия при уровнях напряжения, имеющих место при обычном использовании. Таким образом, ускоренное тестирование играет ключевую роль в сокращении циклов испытаний продуктов. Однако примеров этой методики в программе не приводится.

Восьмой модуль Maintainability предназначен для прогнозирования ремонтнопригодности. Целью прогнозирования ремонтнопригодности является определение времени, необходимого для выполнения заданий по ремонту и техническому обслуживанию, чтобы выяснить, какие задания могут потребоваться для возврата системы в рабочее состояние после отказа и сколько времени это займет. Главным показателем в прогнозировании ремонтнопригодности является среднее время ремонта (СВР), которое рассчитывается с учетом ремонтных операций после отказа. Возможны также другие параметры, связанные с ремонтом, такие как средняя продолжительность восстановительного ремонта (МСМТ) и средняя продолжительность профилактического обслуживания (МРМТ).

СВР влияет на коэффициент готовности системы, представляющий собой показатель правдоподобия пребывания системы в рабочем состоянии. Чтобы выполнить прогнозирование ремонтнопригодности, потребуются данные об интенсивности отказов и данные о времени восстановления отдельных элементов (формула 5). Прогнозирование ремонтнопригодности могут выполняться на основе действующих стандартов и нормативов ремонта.

Девятый модуль LCC означает анализ стоимости жизненного цикла. Он используется для вычисления стоимости продукта или системы в течение срока его службы. Анализ LCC учитывает такие затраты, как конструирование, производство, гарантия, ремонт и ликвидация, предоставляя точную оценку общих системных расходов.

В рассмотренных стандартах применяются следующие показатели безотказности продукции.

Интенсивность отказов  $\lambda$ , которая в комплексе WQS измеряется количеством отказов за миллион ( $10^6$ ) часов.

$t_o = \text{СВМО (аналог – МТБФ)}$  среднее время между отказами, соответствует понятию наработка на отказ, часы:

$$t_o = 10^6 / \lambda \quad (3)$$

Надежность  $P(t)$  – соответствует понятию о вероятности безотказной работы ВБР:

$$P(t) = \exp(-t/t_o) = \exp(-\lambda t/10^6) \quad (4)$$

$\tau_o = \text{СВР (аналог МТТР)}$  – среднее время ремонта соответствует среднему времени восстановления после отказа, часы.

Коэффициент готовности  $K_z$  – комплексный безразмерный показатель, учитывающий потери времени на восстановление после отказа

$$K_z = t_o / (t_o + \tau_o) = 1 / (1 + \lambda \tau_o / 10^6) \quad (5)$$

В различных отраслях промышленности указанные показатели рассчитываются по-своему. Например, для малых холодильных машин [39] применяется интенсивность отказов с размерностью %/год или %/мес., т.е. количество отказов на 100 машин в год (или месяц).

К недостаткам документа WQS относится то, что ни одной формулы в документе не приводится и расчеты выполняются по внутренним скрытым программам путем нажатия (клика) на виртуальные кнопки по инструкции.

В заключение следует обратить внимание на то, что в тестовой версии WQS показана работа служб изготовителя с целью повышения надежности электронного изделия, которое ремонтируется по потребности.

### 1.2.3. О программных продуктах корпорации ReliaSoft

Программные продукты ReliaSoft представляют собой наиболее развитый инструментарий для инженерного моделирования надежности и методов ее анализа благодаря корректности, простоте в использовании и высококомпетентной технической поддержке. Отмечается хорошо организованная и удобная для использования структура рекламного портала фирмы [43].

Для подробного ознакомления с сущностью каждого компонента достаточно произвести клик на его логотипе (Рис.7). Рассмотрим основное содержание этих компонентов, хотя многие из них уже упоминались в программном продукте WQS.

Начнем с компонента MPC, который первоначально был разработан в помощь рабочим группам для проведения анализа авиационных систем и двигателей в соответствии со стандартом MSG-3. Он содержит основные положения по разработке требований к плановому техническому обслуживанию при эксплуатации и проектировании авиации.

Утверждается, что MPC облегчает процесс анализа и создает гибкие возможности управления данными, предлагая автоматизированные генерации отчетов в шаблонах, которые были приняты для представления в авиационной промышленности службой «maintenance review board». Программное обеспечение MPC доступно в двух версиях. Стандартный MPC поддерживает весь процесс систем и силовой Анализ. Расширенный MPC включает в себя дополнительную поддержку структурного анализа.

Далее укажем на основной компонент, а именно RCM, который осуществляет анализ данных о техническом обслуживании, конечной целью которого является разработка эффективной стратегии технического обслуживания, направленного на обеспечение надежности. Программа поддерживает основные промышленные стандарты и может быть адаптирована под стандарты компа-



нии-заказчика. Программа включает в себя полнофункциональный анализ характера и последствий отказов FMEA/FMECA. Эти компоненты включены в блок Xfmea®, который совместим с основными промышленными стандартами FMEA/FMECA всех типов. Xfmea позволяет организовать процесс управления данными об отказах и отчетности, а также эффективный обмен данными между родственными анализами, такими как «Проверка правильности проектирования», «Анализ проекта на характер отказа», «Схема технологического процесса», «План проведения испытаний» и прочее.



Рисунок 7 Перечень основных компонентов портала фирмы

Следующие программные продукты соответствуют рассмотренным ранее модулям FTA и RBD. Программный продукт BlockSim предназначен для Анализа Систем Надежности и Ремонтопригодности. Используя блок – схемы расчета надежности и/или построение деревьев отказов. BlockSim поддерживает широкий спектр анализов для ремонтируемых (восстанавливаемых) и неремонтируемых (невосстанавливаемых) систем с целью расчета надежности, ремонтопригодности, коэффициента готовности, стоимость жизненного цикла и другие вероятностные показатели.

Второй продукт RENO предназначен для моделирования Анализа и Оценки Риска. Он представляет собой мощную платформу для построения сложных вероятностных и детерминистических сценариев с использованием интуитивно графического интерфейса и дискретно-событийного моделирования. Программа позволяет создавать модели (блок-схемы) сложных систем для решения за-

дач надежности, анализа рисков и безопасности, планирования работ по техническому обслуживанию, финансового анализа и др. На сайте показаны примеры решения различных вероятностных задач, которые напоминают абстрактные математические игры, а не рабочие инструменты RCM.

Следующий продукт RBI ранее упоминался как операция «Инспектирование с учетом Факторов Риска». Но тогда было не совсем понятно о каких инспекциях идет речь. На портале ReliaSoft этот термин поясняется более компетентно. Сказано, что RBI облегчает проведение анализа с учетом факторов риска для нефтегазовых, химических предприятий и электростанций при строгом соблюдении основных положений и принципов, представленных Американским Институтом Нефти в публикациях API RP 580 и RP 581, а также Американским Обществом Инженеров Механики в публикациях ASME PCC-3-2007. В продукте учтены полнофункциональные версии RCM и FMEA/ FMECA. Видимо RBI был создан в интересах указанных отраслей промышленности.

Продукт RGA относится к Анализу Роста Надежности и Ремонтопригодности. Система RGA сочетает в себе комплексный программный продукт анализа роста надежности со способностью анализировать системы для определения оптимальной наработки между капитальными ремонтами и установления других результатов без привлечения детальных данных, которые обычно бывают необходимы. Из приведенных в этом разделе учебных примеров по теории вероятностей было трудно понять, какое они имеют отношение к оценке межремонтных периодов.

Программы DOE++ нужны для планирования и анализа экспериментов. Система DOE позволяет выявлять факторы, которые в наибольшей мере влияют на продукт или процесс. Эта программа также расширяет стандартные методы обработки данных планируемого эксперимента, включая данные испытаний на отказ с учетом «центрального» и «правого» цензурирования, что является большим прорывом в области анализов надежности! Проще говоря, в эту программу включены различные варианты факторного анализа систем, включая диаграммы Парето для оценки значимых последствий.

Еще одна программа  $\lambda$ Predict относится к прогнозированию надежности на основе технических стандартов. Ее удобно применять в случае отсутствия испытательных и полевых данных. Тогда можно произвести прогнозирование надежности на основе действующих расчетных стандартов, что позволяет оценить соотношение выгод и потерь, сравнить с альтернативными проектами, проследить процесс улучшения надежности.  $\lambda$ Predict поддерживает основные стандарты прогнозирования надежности, а также предлагает методы распределения надежности (по элементам системы) и анализ надежности в условиях снижения номинальных параметров эксплуатации.

Продукт XFRACAS означает уже знакомую нам web-систему FRACAS, которая позволяет организовать сбор, хранение и анализ данных об отказах и координировать меры по устранению причин их возникновения. Система XFRACAS разработана для сбора и анализа данных по качеству, безопасности и надежности продукта. Поддерживает метод командной работы и решения проблем. В параграфе о продукте WQS эта система рассмотрена применительно

к электронным планшетам, которые ремонтируются по потребности службами изготовителя изделия.

Следующие два программных продукта в наибольшей мере согласуются с проблемами обеспечения надежности машин с учетом стратегии TOP, которым посвящена эта книга. К таким продуктам относятся методика анализа долговечности Вейбулла и программный комплекс для анализа данных ускоренных испытаний на надежность ALTA (в продукте WQS он назван ALT).

Анализ ALTA предоставляет интуитивно понятный и удобный способ использования чрезвычайно сложных и мощных математических моделей на базе корреляционного анализа с применением закона Вейбулла и других законов распределений.

Результаты ускоренные испытания на долговечность в сочетании с методологией многофакторного анализа данных о надежности позволяет значительно сокращать время испытаний, ускорять выход на рынок, снижать затраты на разработку и на гарантийное обслуживание продукта и иметь другие преимущества! Программное обеспечение инструмента доступно в двух версиях, и обе предоставляют полный набор программ для разработки ускоренных ресурсных испытаний. АЛТА СТАНДАРТ предоставляет модели зависимости ресурса от нагрузки, необходимые для анализа результатов ускоренное испытание на долговечность объектов с одной или двумя постоянными уровнями нагрузок. ALTA PRO предлагает расширенные возможности для анализа ускоренное испытание на долговечность при одновременном действии до 8 типов нагрузок, которые являются постоянным или меняется со временем.

Весьма профессионально на портале ReliaSoft представлена методология закона распределения Вейбулла (Weibull), как Стандарта для анализа надежности. Этот индустриальный стандарт получил широкое распространение во многих ведущих компаниях мира. Программа поддерживает основные виды распределений наработок, используемых в расчетах надежности (включая все виды распределения Вейбулла), и предлагает интуитивно понятный интерфейс, сфокусированный на потребностях инженеров по надежности. Во второй и третьей главе книги будут показаны практические расчеты гамма – процентных ресурсов деталей машин с применением параметрических моделей на основе этого и других закона по методике [32,33 и др.]. Мы давно пропагандируем аналогичную методологию и поэтому выражаем удовлетворение тому факту, что методика ReliaSoft подтверждает корректность наших трудов в этой области. В частности, это относится к методам оценки параметров теоретических распределений для так называемых «цензурированных выборок». На портале ReliaSoft рассмотрено несколько вариантов проверки согласия эмпирических и теоретических распределений, что подтверждает высокую квалификацию разработчиков ReliaSoft. Следует приветствовать включение в материалы портала информации о фрагментах учебника про вероятностные методы расчета, с указанием программ по каждому компоненту продукта. Для этого достаточно кликнуть на соответствующую ссылку. Например, для перехода к программе Weibull имеется ссылка «G400A – Учебное Пособие».

Обзор портала завершаем обобщающим продуктом Орион eAPI, ориентированный на управление активами предприятий. Представляет собой программный продукт, который необходим для эффективного управления активами с целью быстрого, простого и надежного ответа на следующие вопросы: какова надежность оборудования в течение срока эксплуатации, каков эффект планового ремонта с учетом простоя системы, сколько запасных частей, необходимо для поддержания работоспособности оборудования и прочее.

Таблица 2 Примерная стоимость лицензий программных продуктов ReliaSoft (без учета обучения в офисе фирмы)

№	Компонент	Название	Цена, евро
1	MPC Plus	Разработка Программы ТО на базе стандарта MSG-3	€7.195,50
2	RGA	Анализ Роста Надежности и Ремонтпригодности	€3.145,50
3	RCM	Техническое Обслуживание, направленное на обеспечение Надежности	€4.495,50
4	XFRACAS	Высоко конфигурируемая web-система FRACAS	По договору
5	Xfmea	Эксперт-Поддержка для FMEA и FMECA всех типов	€2.245,50
6	RBI	Полнофункциональная версия RCM с учетом факторов риска	€8.995,50
7	RENO	Моделирование для Анализа и Оценки Риска	€1.795,50
8	DOE	Планирование и анализ экспериментов	€895,50
9	BlocKSim	Программный Продукт для Анализа Систем Надежности и Ремонтпригодности	€3.595,50
10	Weibull	Стандарт для анализа надежности	€1.165,50
11	ALTA	Анализ Данных Ускоренных Испытаний на Надежность	€1.345,50
12	Lambda Predict	Прогнозирование Надежности на Основе Технических Стандартов	€4.045,50
13	Orion eAPI	Web-система по Управлению производственными Активами	По договору
		Итого (не менее)	€38.970,50
		Рублей не менее	₽ 3.2·10 <sup>6</sup>
14	Люкс мастер	Комплект из 9 компонентов	€11.695,50

Орион предусматривает комплексный анализ модулей оборудования с использованием наиболее эффективных методов расчета показателей надежности и ремонтпригодности (RAM). Они включают в себя: анализ долговечности продукции (анализ Вейбулла), анализ коренных причин отказов RCA, метод расчета оптимальных интервалов ТОР, прогнозирование расхода запасных ча-

стей и пр. В заключение обзора методологии ReliaSoft напомним, что, как правило, ее применение требует получение из сферы эксплуатации информации о случайных событиях большого объема, а это является самой сложной проблемой при изучении надежности машин и систем.

Отметим, что в третьей главе книги рекомендуется применять отечественные методы расчета надежности и долговечности [32]. Это связано с тем, что легальное использование американской методологии портала ReliaSoft требует приобретения дорогостоящих лицензий (таблица 2) и не менее дорогостоящее обучение на платных курсах этой корпорации. Необходимый и достаточный набор наших методов более доступен для обучения и применения в отечественной практике с помощью трудов [32...37 и других].

В следующем параграфе рассматривается информация ряда отечественных фирм об услугах внедрения автоматизированных систем управления (АСУ) активами предприятий и ТОР.

### **1.3. Порталы управления активами и ТОР предприятий**

#### **1.3.1. Описание документации на сайтах ООО «PCM-системы»**

Компания ООО «PCM-системы» создана в 2007 году с целью разработки и внедрения информационных систем управления активами и ТОР в различных отраслях промышленности (энергетической, нефтегазодобывающей, транспортной и других). В основу документации этой компании положены стандарты PAS 55 и EAM с целью оценки и оптимизаций затрат на ТОР. Много места на сайте занимает рекламирование RCM, хотя конкретных примеров применения этой методологии там не приводится.

Компания [46] предлагает ряд услуг по созданию системы управления активами, включая: разработку стандартов, положений и методик в области управления активами; разработку и внедрение пакетов программ (модулей) управления ремонтами производственных фондов, включая паспортизацию оборудования, планово-предупредительные ремонты, ремонты по техническому состоянию, управление надежностью и прочее.

Сообщается об автоматизации учета, мониторинга и анализа причин аварийных ситуаций на производстве.

Для примера можно показать следующие программные модули по разделу «Управление надежностью».

Модуль 1. Нормативно-справочная информация по оборудованию и видам работ. К ней можно отнести: классы, виды и типы оборудования; виды, группы и номенклатура ресурсов с указанием цен; виды типовых работ с указанием нормативов типовых операций, потребности в ресурсах; поправочные коэффициенты; справочник структуры предприятия; справочник единиц измерения; справочник динамических параметров (результатов испытаний, эксплуатационные параметры); справочник критериев оценки технического состояния.

Модуль 2. Реестр оборудования с целью анализа: паспортных данных; истории осмотров, испытаний и диагностик; истории оценок объекта по различным критериям; дефектной ведомости; истории ремонтов; истории отказов, аварий и отключений; библиотек нормативной документации, схем, чертежей; отображение объектов на карте.

Модуль 3. Топология производственной сети:

ведение структурной схемы (топологии) производственного процесса; структурный анализ схемы; моделирование отказов на каждом элементе схемы; расчет «узких мест» и потенциальных потерь при отказе; расчет системных взаимосвязей между объектами и резервирование.

Модуль 4. Мониторинг и оценка технического состояния:

сбор данных об осмотрах, испытаниях, диагностика с учетом наработки; оценка показателей безотказности по заданным алгоритмам на основе собранных данных с учетом эксплуатационных условий; оповещение о недопустимом развитии событий.

Модуль 5. Дефектная ведомость: анализ повреждений и дефектов на объекте и его элементах; автоматический расчет необходимого состава и объема ремонтных работ, МТР и персонала по правилам реагирования на дефекты и повреждения; ручная корректировка дефектной ведомости с возможностью до обучения системы регулярно возникающим правкам.

Модуль 6. Матрица рисков – оценка и анализ совокупного риска по каждой единице оборудования, определение групп рисков.

Модуль 7. Планирование ремонтных работ и ресурсов. Объемно-календарное планирование работ на заданный период по описанным выше принципам с учетом различных условий.

Модуль 8. Оперативное управление работами и ресурсами. Формирование сменно-суточных заданий и нарядов на работы с указанием: объекта ремонта; вида работ; списка операций к выполнению; списка потребных ресурсов (МТР, персонал и пр.); состава бригады по профессиям; типовых формулировок допуска к работе (с возможностью их редактирования под конкретный ремонт); отображение местонахождения и перемещения бригад и ресурсов на карте; формирование сопроводительных документов (заявок на отключение, на получение МТР по заявкам со складов, укомплектование бригады).

Модуль 9. Учет исполнения работ и расхода ресурсов: ведение данных о исполнении работ с указанием фактических сроков операций; расхода ресурсов (МТР, персонал) с комментариями (при необходимости).

Модуль 10. Учет отключений: ведение журнала отключений – аварийных и плановых с расчетом потерь; планирование отключений под график ремонтных работ; анализ отключений и потерь, расчет общих показателей надежности; отображение текущих событий (аварий и отключений) на карте.

Модуль 11. Разбор и анализ отказов и технических нарушений: учет технических нарушений в разрезе различного вида причин (технических, организационно-системных, внешних и пр.), с указанием вида и места повреждений, дефектов, приведших к отказу, мероприятий по локализации и пр.; анализ причин технических нарушений

На сайте приведена стоимость документов и услуг по разделу «Управление надежностью», которая составила 10 млн. 750 тыс. руб. (без НДС) и в том числе 3 млн.750 тыс. руб. за 25 лицензий (пакетов модулей) и 7 млн. руб. за указанные услуги.

По другим разделам стоимость без НДС распределена следующим образом: пакет «Паспортизация оборудования» – 900 тыс. руб.; пакет «Планово-предупредительные ремонты» - 3 млн. 575 тыс. руб.; пакет «Ремонты по техническому состоянию» - 5 млн. 600 тыс. руб.; пакет «Управление надежностью» – 10 млн. 750 тыс. руб.

Эти данные приведены лишь для того, чтобы подчеркнуть сложность решения рассматриваемой проблемы, требующая высокой квалификации исполнителей, как со стороны компании, так и заказчика.

Можно согласиться с тем, что система учета, мониторинга и анализа аварийных ситуаций на производстве от компании «РСМ-Системы» направлена на достижения приемлемого уровня надежности производственной деятельности, но отнюдь не уровня надежности самого оборудования с учетом стратегии технического обслуживания на основе методов, рассмотренных в главе 1.3.

### 1.3.2. Описание системы «1С: ТОиР» на сайте команды «Ремонт-Эксперт»

Команда «Ремонт-Эксперт», которая входит в состав фирмы «Деснол Софт», является разработчиком автоматизированной системы управления «1С: ТОиР. Управление ремонтами и обслуживанием оборудования» [51].

Создание такой системы в 2005 году было направлено на снижение промышленных рисков в России, увеличение производительности труда, увеличение отдачи производственных фондов с целью повышения конкурентоспособности, безопасности труда и эффективности производствам. Для достижения поставленных целей следовало найти решение, не уступающее лидерам западного рынка по функциям, масштабируемости и надежности. Оптимальным решением стал выбор самой распространенной и доступной для большинства предприятий в России платформы *1С*. Важным преимуществом этой платформы явилось то, что при необходимости изменения в системе могли быть внесены самостоятельно в кратчайшие сроки с сохранением возможности обновления на новые версии.

Программный продукт «1С:ТОиР» является самостоятельной конфигурацией, которая полностью включает в себя возможности системы более высокого уровня «1С:Предприятие 8. Управление производственным предприятием», такие как: управление производством; управление основными средствами; управление финансами; управление складом (запасами); управление продажами; управление закупками; управление отношениями с покупателями и поставщиками; управление персоналом, включая расчет заработной платы; мониторинг и анализ показателей деятельности предприятия.

«1С: ТОиР» предназначен для специалистов по организации ремонтов и обслуживания промышленного оборудования, а также для всех подразделений, имеющих какое-либо отношение к управлению активами предприятия, ремон-

там и обслуживанию: финансы и бухгалтер, логистика и снабжение, управление кадрами. «Прозрачная» структура производственных активов необходима руководству предприятия. Для ремонтных служб система является основной поддержкой управления: ведется огромный архив всей нормативной и технической документации, рассчитываются графики ППР, выписываются наряды на работы, ведется учет работ и т.д.

Основные пользователи системы:

- Служба главного механика,
- Служба главного энергетика,
- Служба КИПиА, АСУ ТП,
- Служба главного метролога.

«1С: ТОиР» ведет учет всего оборудования и иерархических связей (предприятие, площадка, цех, участок, установка, станок, узел, оборудование), вместе с необходимой эксплуатационной документацией. В системе «1С: ТОиР» автоматически формируется график планово-предупредительных ремонтов и обслуживания (а также план производства работ). График оптимизируется и допускает ручную корректировку. Формируются наряды и необходимые допуски на все работы. Создается полный комплект документации для проведения ремонта, формирования договоров, заявок на МТО, расчет бюджета и данные для бухгалтерского учета.

«1С: ТОиР» относится к классу систем ЕАМ (Enterprise Assets Management) по Управлению активами (основными фондами), включая учет всех затрат на актив, расчет бюджета, интеграция с кадровой системой, МТО и бухгалтерией.



Рисунок 8 Схема бизнес-процессов в системе



Авторы «1С: ТОиР» утверждают, что их продукт позволяет существенно сократить расходы на техническое обслуживание и ремонты, снизить продолжительность простоев оборудования, увеличить его загрузку. По данным агентства A.T. Kearney, использование ЕАМ-систем позволяет сократить затраты на обслуживание оборудования в среднем на 25-30%, повысить готовность оборудования к работе на 15-17% и на 30% сократить количество аварийных и сверхурочных работ. Окупаемость внедрения систем обычно менее двух лет, а иногда составляет всего 3-4 месяца.

Такие результаты достигаются за счет следующих факторов:

- Огромный объем технической документации (сотни тысяч, не редко миллионы страниц описаний) обрабатываются в автоматическом режиме. Значительно увеличивается точность и достоверность планирования и учета ТОР, обеспечивается выполнение требований надзорных органов.
- Плановая стратегия снижает стоимость обслуживания (по сравнению с аварийным ремонтом), сокращается число авральных ремонтов и закупок.
- Оптимизируется процесс МТО на основе точных данных: обосновывается выбор менее «дорого» (с точки зрения ремонтпригодности) в эксплуатации оборудования, снижаются складские запасы.
- Перевод части оборудования на ремонт по состоянию
- Персонификация ответственности, контроль квалификации персонала.
- Расчет затрат по нормам, а не «как в прошлом году + инфляция», (бывали случаи сокращения затрат на 50%!)

Функционал Управления Активами «Ремонт Эксперт» формирует гибкую отчетность для поддержки Управления активами за счет следующих возможностей. Определение полной стоимости активов, оценка состояния оборудования, оценка потребности в ресурсах на обслуживание;

Формирование и ведение технологических карт ремонтов;

Формирование бюджета на ремонты в подразделениях (цеха, участки, установки, линии и другие центры финансового учета);

интеграция с кадровыми системами, отчетность по кадровым ресурсам в необходимых разрезах;

интеграция с бухгалтерскими системами;

интеграция с системами МТО и логистики.

На рисунке 3 представлена общая схема бизнес-процессов, предусмотренных в системе. Элементы символизируют группы бизнес-процессов, стрелки указывают на взаимообмен информацией между ними.

В частности, система позволяет планировать потребность в запчастях и материалах, и инструментах на требуемый период.

Для этого в системе должен быть сформирован график ППР (Планово-предупредительный ремонт оборудования). На основании информации о планируемых нормативных ТО и ремонтах система автоматически рассчитывает потребность в запасных частях, материалах и инструментах. Результаты работы включаются в отчет «План МТО». Он содержит информацию о номенклатур-

ном перечне запчастей, материалов и инструментов, необходимых подразделению на определенный период для выполнения плана ППР.

В основу планирования системы «1С: ТОиР» положена классификация ремонтов и ТО по ГОСТ 18322-78.

Возможны различные способы планирования ТОР: календарный, по наработке, сезонный и т.д. Нормативные способы планирования используются только для ремонтов вида ППР.

Для анализа и обеспечения надежности особое значение имеет учетная документация типа «Дефектная ведомость», куда заносят все обнаруженные дефекты при ТО или эксплуатации.

К дефектам относят неисправности и отклонения от нормального состояния оборудования. Неисправности и отклонения, которые при дальнейшей эксплуатации оборудования могут нарушить его работоспособность или безопасность условий труда, должны немедленно устраняться. При обнаружении нового дефекта оперативный работник указывает вид дефекта, причину дефекта, описание дефекта. Если работник знает, кому назначить данный дефект, то он это указывает.

Ведение документа "Дефектная ведомость" позволяет накопить статистику по дефектам, которая потом может быть использована для прогнозирования работы оборудования, корректировки нормативно-технической документации предприятия и соответственно корректировки графиков ППР.

Программная продукция этой системы имеет высокую стоимость. Не считая стоимости услуг по обучению, на сайте указаны цены некоторых программных продуктов.

Коробочная версия программы «1С:ТОиР - Управление ремонтами и обслуживанием оборудования» имеет стоимость 60000 руб. В нее входят: наклейка, сетевой ключ аппаратной защиты платформы на одно рабочее место, сетевой ключ аппаратной защиты конфигурации на одно рабочее место, комплект книг (платформа), лицензионное соглашение, конверт для отправки анкеты, CD (slimbox) дистрибутив управление ремонтами, руководство пользователя управление ремонтами.

Клиентская лицензия на 50 рабочих мест стоит 324000 руб.

В заключение отметим, что на сайтах команды «Ремонт-Эксперт» проблема RCM даже не упоминается и методы расчета показателей надежности там вообще не рассматриваются.

В то же время указанные выше АСУ ремонтами оборудования, безусловно, способствует снижению технологических рисков и сокращению простоев ремонтных служб за счет составления и постоянного контроля графиков ТОР.

### 1.3.3. О системе управления активами на сайте НПП «СпецТек»

Наиболее развитая авторизованная система управления физическими активами и процессами их технического обслуживания и ремонта (ТОР) была создана в научно-производственном предприятии (НПП) «СпецТек» на основе мощной технологии EAM/MRO (Enterprise Asset Management/Maintenance, Repair and Overhaul) [41].

Авторитет этой организации в области управления активами подтверждается ее участием в проектом (техническом) комитете ISO по разработке международных стандартов ISO серии 55000 «Asset Management» от имени Российской Федерации.

Основным продуктом НПП «СпецТек» является программный комплекс под названием TRIM (Targets Related Infrastructure Management), который был внедрен в практику многих промышленных и транспортных предприятий России. В части планирования и организации ТОР он аналогичен рассмотренной выше системе «1С:ТОиР», но в нем очерчен более широкий круг задач, включая контроль надежности производственного процесса. Согласно рекламной презентации, НПП предлагает заказчикам разработку, лицензирование и поставку программного комплекса TRIM.

Он предназначен для организации управления основными фондами и соответствующими процессами – технического обслуживания и ремонта (ТОР), материально-технического снабжения, ведения складского хозяйства. Наибольшее распространение получил вариант системы TRIM-PMS (Planned Maintenance System) для предприятий с небольшими ремонтными (сервисными) службами или их отдельных подразделений (цехов).

В комплект поставки TRIM-PMS входят следующие разделы сетевого программного обеспечения с сопутствующей документацией:

Модули: TRIM-M «Техобслуживание»; TRIM-W «Склад»; TRIM-C Каталог»; TRIM-DOC «Документооборот»; TRIM-A «Администратор»;

- "TRIM-Интерфейс с генератором отчетов", База данных, подготовленная к вводу информации.
- Руководство пользователя: Часть 1. Описание TRIM-PMS; Часть 2. Установка TRIM-PMS; Часть 3. Наполнение базы данных в TRIM-PMS;
- Часть 4. Организация и проведение ТОР в TRIM-PMS; Часть 5. Оценка и анализ системы ТОР в TRIM-PMS.
- Альбомы форм отчетов: Часть 1. Организация и проведения ТОР в TRIM-PMS и Часть 2. Оценка и анализ системы ТОР в TRIM-PMS.

Основные этапы управлением ТОР в TRIM-PMS показаны на схеме рис. 9. В частности, модуль TRIM-M «Техобслуживание» содержит следующие разделы: Планирование работ по техническому обслуживанию и ремонтам; Заказ запасных частей для запланированных работ; Ведение журнала выполненных работ; Учет наработки оборудования по счетчикам; Регистрация текущих значений технических параметров; Классификация и регистрация дефектов (отказов); Ведение технической документации и инструкций; Анализ работоспособности оборудования, эффективности планирования и затрат на ТОР.

Отметим, что содержание модулей и комплекта электронных документов в системе TRIM-PMS соответствуют рассмотренной выше документации компаний «1С: ТОиР», «PCM-системы» и ряда других.

Рассмотрим особенности подхода программного комплекса TRIM к регистрации и анализу информации о дефектах оборудования, что должно быть связано с системой RCM. Уже на подготовительной стадии формирования базы данных в руководстве приводится квалификация дефектов. Как показано в

таблице 3, в число дефектов включены понятия о повреждениях и отказах. Кроме того, в руководстве приведена таблица 4 с допустимыми параметрами изделий, которые нужны для выявления дефектов.

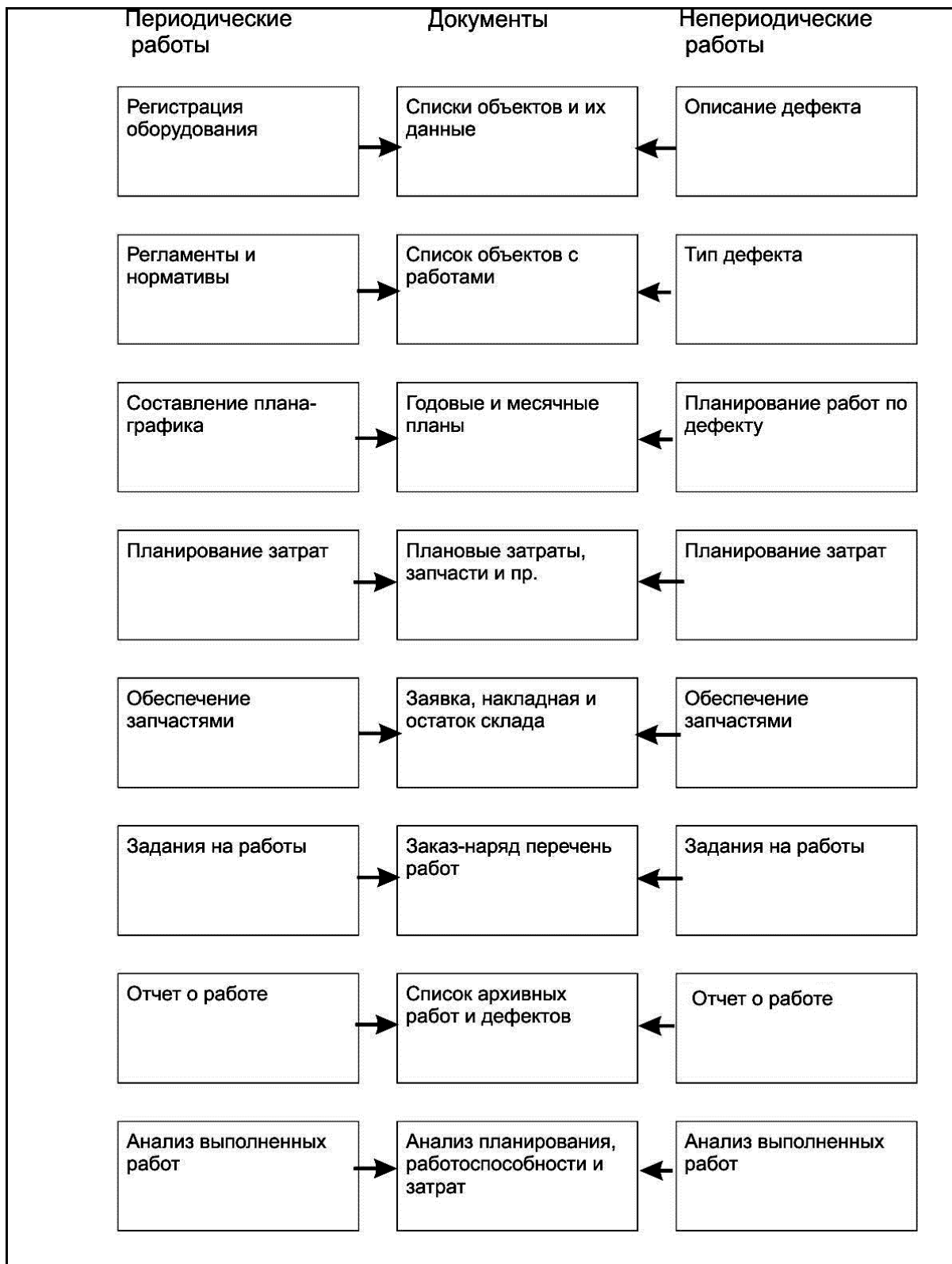


Рисунок 9 Основные этапы управлением ТОР в TRIM-PMS

Таблица 3 Классификация дефектов

№ п/п	Наименование	Обозначение
1	Подтип дефекта	
1.1	Устранение отказа	Отказ
1.2	Устранение повреждения	Повреждение
1.3	Устранение риска отказа	Риск
2	Этап обнаружения дефекта	
2.1	Во время инспекторской проверки руководства	И
2.2	Во время наблюдения за функционированием оборудования производственным персоналом	Р
2.3	Во время проведения планового обслуживания	О
3	Класс дефекта	
3.1	Влечет за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей	3
3.2	Влечет за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей	4
3.3	Не приводит к снижению качества функционирования объекта и не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей	1
3.4	Приводит к снижению качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей	2
4	Последствия дефекта	
4.1	Заметное снижение эксплуатационных характеристик	3
4.2	Не приводит к заметным последствиям	1

Таблица 4 Примеры допустимых границ контролируемых параметров

Код	Наименование объекта	Номинал	Ед.	Интервалы					
				Допустимый		Критические		Аварийные	
Наименование параметра				Границы интервалов					
				нижн	верх	нижн	верхн	нижн	верхн
200.10.10		Насос подачи жидкости № 1							
Давление на входе		3.00	атм	>2.00	4.00<	2.00	4.00	1.00	5.00
Давление на выходе		4,00	атм	>3.00	7,00<	3.00	7.00	2.00	8,00
200.10.20		Насос подачи жидкости №2							
Давление на входе		3.00	атм	>2.00	4.00<	2.00	4.00	1.00	5.00
Давление на выходе		4.00	атм	>3.00	7.00<	3.00	7.00	2.00	8.00

Анализ надежности и ремонпригодности – сводная информация по каждой работе

Показатели ремонпригодности в коэффициентах за период от 18.01.2012 по 01.01.13

месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Всего на 01.01.13
План	2	1	1	3	2	2	2	3	6	3		2	27
Факт	2	1	1	3	2	2	2	3	8	3			27
Итого													
MTTR	20,0	32,0	112,0	40,0	44,0	28,0	32,0	3,0	3,3	7,0		0	20,7
MTBF	370,5	693,5	736,4	236,3	368,6	367,8	369,8	247,8	89,3	247,8	999,9	999,9	-

Анализ надежности и ремонпригодности – графическое представление

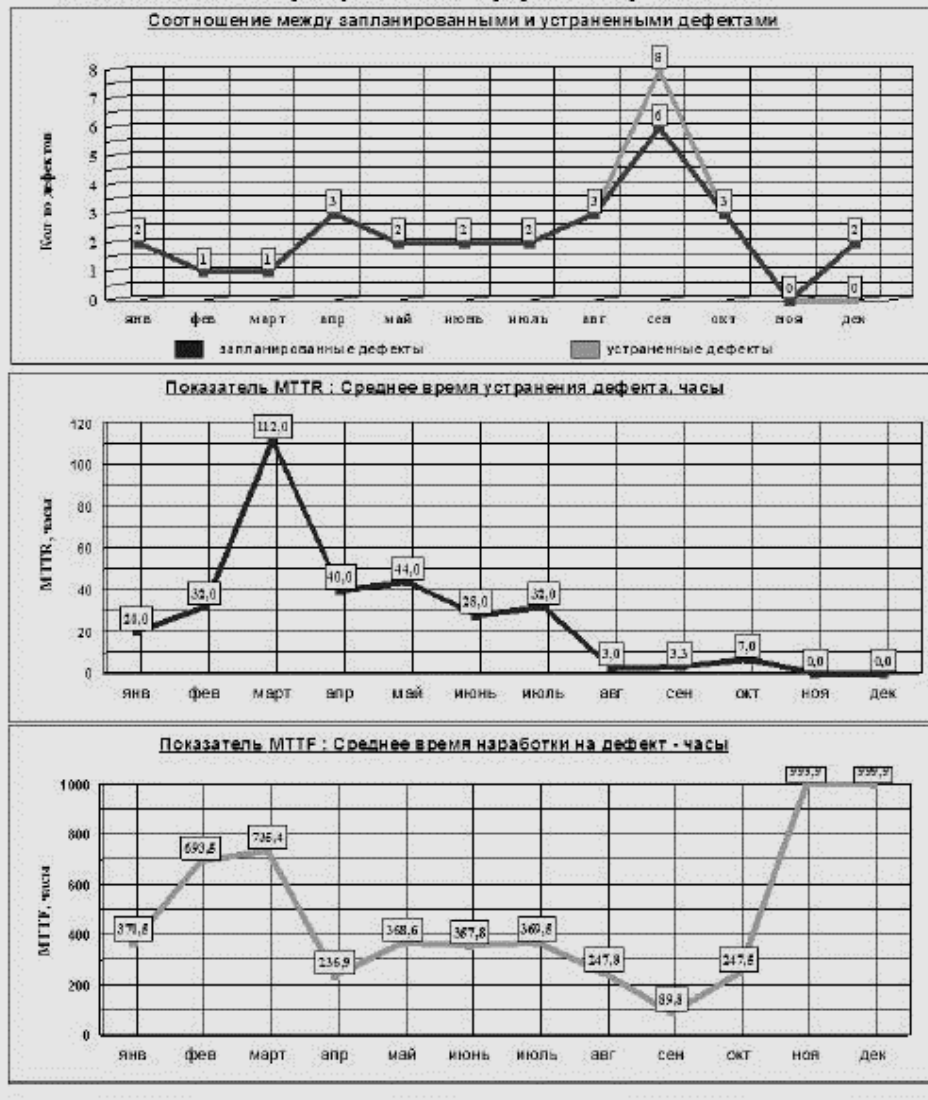


Рисунок 10 Сравнение плановых и фактических реквизитов дефектов

Разработчики TRIM большое значение придают введению в АСУ производственными активами электронных журналов дефектов [38], реквизиты которых предлагается переносить в общий план-график ремонта из общих справочников, рассматривая их как дополнительные плановые работы.

В документации TRIM единственными показателями, которые условно характеризуют надежность можно отнести следующие реквизиты.

Среднее время наработки на дефект MTBF:

$$MTBF = \frac{\text{суммарное время работы}}{\text{количество отказов за период}} \quad (6)$$

Среднее время устранение дефекта MTTR:

$$MTTR = \frac{\text{суммарное время простоя}}{\text{количество отказов за период}} \quad (7)$$

Методика расчета риска отказов в руководстве не приводится.

Из руководства TRIM следует, что регистрация дефектов по мере эксплуатации и ремонтов выполняется с целью сравнения их с плановыми реквизитами в отчетах (см. рис. 10), как критерий для оценки работоспособности оборудования, хотя такой подход не соответствует правилам оценки надежности техники.

В заключении можно признать, что система TRIM позволяет эффективно планировать, контролировать, анализировать и оптимизировать затраты на ремонты механического и энергетического оборудования. Но она не содержит методов и программ по управлению техническим обслуживанием путем изучения показателей долговечности, безотказности и ремонтпригодности оборудования, что относится к задачам RCM.

#### 1.4. Заключительный анализ информации о методологии RCM

Целевым назначением этого труда является обоснование возможности управления НОТЭ машин и механизмов с учетом не только внезапных отказов при  $\lambda = const$ , но и постепенных процессов образования повреждений с возрастающей функцией интенсивности  $\lambda(t)$  от времени  $t$ . Практическое значение такой методологии вроде бы вытекает из требований ГОСТ Р 27.606-2013, где сказано, что «Конечным результатом применения RCM является определение необходимости тех или иных действий по предупредительному ТО, изменению конструкции изделия или иных действий по повышению его эффективности». Однако, в рассмотренной выше информации о RCM этой проблеме не уделяется должного внимания.

Начнем с того, что в стандартах RCM не всегда учитываются требования основополагающего ГОСТ 27.002 - 89, в котором надежность характеризуется показателями безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости, комплексными и др. В ГОСТ Р 27.606-2013 речь идет только о безотказности, а термин «долговечность» даже не упоминается. Более того в документах об управлении активами термин «ресурс» отнюдь не означает «наработку до наступления предельного состояния», а относится к характеристике трудовых, материальных и других запасов. При этом само понятие об отказе зачастую не имеет четкого разъяснения и в некоторых документах он заменяется расплывчатым термином «дефект». Конкретные примеры анализа надежности в большинстве случаев сводятся только к оценке показателя «наработка на отказ» или «интенсивность отказов», который считается постоянной величиной ( $\lambda = const$ ).

На сайтах корпорации KConsult C.I.S., WQS и ReliaSoft, кроме анализа видов, последствий и критичности отказов FMEA/FMECA, рассматриваются модули анализа дерева отказов FTA, диаграмм надёжности RBD, коренных причин отказов RCA, инспекции с учетом факторов риска RBI и других.

В основу анализа FMEA/FMECA по ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) также положено изучение надежности систем с использованием стандартов серии «Менеджмент риска» об анализе дерева неисправностей, структурной схеме надежности булевых и Марковских методах и т.п. [21].

Следовательно, основная концепция методологии RCM базируется на методах расчета структурной надежности (точнее – безотказности) электронных систем. За рубежом созданы справочные библиотеки с базой данных об интенсивности отказов различных элементов систем (MIL-HDBK-217, Telcordia Issue 2, Siemens SN 29500, 217 Plus, IEC TR 62380, FIDES 2009, и др.), что позволяет осуществлять процедуры FMEA/FMECA на стадии проектирования. Кроме того, очевидно, что универсальные справочные данные об интенсивности отказов стандартных элементов систем имеют низкий уровень достоверности.

Между тем, известны осторожные попытки распространить принцип расчета структурной надежности систем на машины и механизмы. Как уже было сказано, к сайту KConsult C.I.S. приложено американское руководство NSWC-11[1], где излагается методика расчета интенсивности отказов для отдельных элементов механизмов с учетом их конструктивно технологических особенностей. Такой подход выбору оценки надежности механизмов представляется спорным, поскольку, во-первых, постоянная интенсивность отказов в большей мере зависит от внешних факторов (особенно человеческих). Во-вторых, следует понимать, что вероятность безотказной работы при  $\lambda = const$  не может влиять на коррекцию нормативов межремонтных периодов в отличие от деградиационных процессов с возрастающей функцией  $f(\lambda)$ .

Конечно, нельзя отрицать целесообразность широкого применения показателей безотказности для изделий, ремонтируемых по потребности с целью повышения надежности их элементов, как это показано на примере ремонта электронного планшетного компьютера в программном комплексе WQS. В этом случае используются все компоненты RCM, начиная с FMEA и кончая FRACAS. В документации WQS видна вся цепочка событий, которая происходит на одном и том же предприятии изготовителя изделия, куда поступает отказавшие образцы на ремонт. Это позволяет по мере накопления информации оценивать интенсивность отказов и разрабатывать конструктивно-технологические мероприятия в собственных интересах изготовителя. Проблема корректировки системы TOP в данном примере вообще не рассматривается, ввиду ремонта изделия по потребности.

А как быть и что делать предприятиям промышленности и транспорта, которые эксплуатируют машины и механизмы ответственного назначения?

Известно, что для предупреждения отказов таких объектов приходится применять планово-предупредительные ремонты или ремонты по состоянию, периодичность выполнения которых должна назначаться с учетом процессов деградации («изнашивания») их элементов. Тут уже недостаточно оперировать



только понятием об отказах и, тем более, планировать и допускать их возникновение.

Возвращаясь к рассмотрению содержания первой главы книги, следует вновь обратить внимание на два вида источников информации о системе RCM. К первому источнику отнесем сайты корпораций WQS и ReliaSoft, где сообщается о мощном математическом аппарате для закона Вейбулла, который в принципе предназначен для решения проблемы, названной «life data analysis», что в переводе на русский язык означает «анализ данных жизни» и видимо относящийся к расчетам долговечности. Однако применять этот инструментарий без общей концепции формирования плановой системы ТОР бессмысленно, а она в RCM даже не сформулирована. Кроме того, отечественным пользователям необходимы значительные валютные затраты на приобретение лицензий этих программных продуктов и обучение за рубежом. Опыт показывает, что идти по этому пути не всегда разумно, поскольку зачастую такие знания и затраты бывают избыточными для решения практических задач.

Это видно из рассмотрения второго источника информации об автоматизированных системах управления (АСУ) активами и ТОР предприятий на сайтах ряда компаний, например, НПП «СпецТек». В этих ИИ не имеется даже упоминаний о столь высоких материях, как сложный математический аппарат портала ReliaSoft. В качестве показателей, имеющих некоторое отношение к оценке работоспособности оборудования, там применены величины среднего время наработки на дефект MTBF и среднего времени устранения дефекта MTTR по формулам (6) и (7). Согласно инструкции об использовании такой методике, эти показатели подлежат планированию на стадии разработки программных модулей АСУ. Тогда оценка работоспособности оборудования осуществляется на основании сравнения фактических и плановых показателей MTBF и MTTR (рис. 10), что не имеет прямого отношения к оценке не только долговечности, но и безотказности объектов. Такой подход можно считать более или менее корректным для объекта (например, машины), ремонт которой осуществляется по потребности, когда понятия о дефекте и отказе совпадают. Однако для машин и механизмов, проходящих ТОР по плану или по состоянию, такой подход не приемлем, поскольку события обнаружения повреждений (например, достижения допустимых износов) при ремонте нельзя смешивать с отказами в межремонтный период. Он соответствует плановым стратегиям ТОР, включая ремонты по состоянию. Однако, четкого различия в управлении активами при разных стратегиях ТОР в руководствах TRIM не приводится.

Сделанные замечания не означают отрицательного отношения к программным модулям управления основными фондами и ТОР предприятий. Безусловно система TRIM позволяет повысить культуру планирования, контроля, и анализа деятельности предприятия и тем самым оптимизировать затраты на ремонты механического и энергетического оборудования, что положительно влияет на их качество. Не исключена возможность выявления конструктивных недостатков изделий. Но системы, подобные TRIM, не содержит прямых методов и программ по управлению техническим обслуживанием путем прогнози-

рования показателей долговечности, безотказности и ремонтпригодности оборудования, что является целью RCM.

Завершая анализ рекламных ИИ можно отметить на две основные проблемы системы RCM.

Первая проблема связана с тем, что все компоненты RCM, начиная с FMEA и кончая FRACAS, выполнялись с целью оценки и повышения показателей безотказности изделий, без четкой ориентации на управление показателями технического обслуживания. С другой стороны, на сайтах об АСУ дается подробное описание организации ТОР, но управление показателями надежности при этом практически не рассматривается.

Вторая проблема относится к самому названию методологии RCM – «надежностно – ориентированное техническое обслуживание», хотя этот производственный процесс входит, наряду с ремонтом, в состав более общего производственного процесса – «техническая эксплуатация». На этом основании далее в монографии будет предложена аналогичная концепция, названная надежностно–ориентированной технической эксплуатацией (НОТЭ), применительно к изделиям машиностроения (машинам), входящих в состав объектов конечного назначения промышленности и транспорта.

## **2. Процессы технической эксплуатации машин**

### **2.1. Общие положения**

Обоснование концепции этого труда начнем с сопоставления вариантов исследования структурной надежности систем при RCM и надежности машин и механизмов при НОТЭ.

Любая сложная система автоматики или радиоэлектроники состоит из стандартных элементов (сопротивлений, конденсаторов, транзисторов и т. п.) с более или менее стабильными показателями безотказности. Поэтому проектировщик системы не занимается исследованиями процессов деградации таких элементов. Его основная задача заключается в минимизации вероятности отказов системы путем выбора оптимальных схемных решений с помощью анализа структурной надежности.

Иного подхода требует проектирование машин и механизмов. Задача конструктора состоит не во взаимной компоновке элементов машины, а в разработке таких конструктивно-технологических мер, которые обеспечивали бы необходимую долговечность и безотказность узлов и деталей. Для этого приходится выполнять расчеты на прочность, износостойкость, коррозионную стойкость и др. свойств, которые обычно постепенно ухудшаются (деградируют) со временем. Вероятностное моделирование трендов деградации состояний до предельно-допустимого уровня позволяет перейти к прогнозированию безопасного срока службы машины. Поэтому появляется возможность управлять сроками ТОР путём оценки таких показателей долговечности, как гамма – процентный ресурс при плановых стратегиях ТОР. Этот принцип лежит в основе концепции управления НОТЭ на всех этапах жизненного цикла машины в от-

личие от системы RCM, где постоянная интенсивность отказов практически не связана с плановыми сроками технического обслуживания.

Отсюда следует цель обоснования концепции НОТЭ: разработать методику управления надёжностью машин в зависимости от выбранной стратегии ТОР с учетом вероятностных моделей долговечности деталей и узлов.

Рассуждая о дальнейшем содержании этого труда, автор пришел к мысли, что при изучении методологий RCM и НОТЭ в принципе приходится рассматривать два вида производственных процессов (ПП). Первый вид ПП относится к сфере управления и организации ТОР промышленного оборудования. В методологии RCM ему были посвящены сайты с информацией об АСУ активами и ТОР (см. параграф 1.3). Второй вид ПП заключается в непосредственном изучении и анализе надежности объектов (систем или машин). Этот процесс относится к методам RCM в параграфе 1.2.

Известно, что в соответствии с законами о товарно-денежных отношениях для возникновения любого ПП необходимо иметь три элемента (рис. 11):

- труд как целесообразная деятельность человека (субъекта);
- предмет труда, на который направлена эта деятельность (объект);
- средства труда, с помощью которых субъект воздействует на объект.

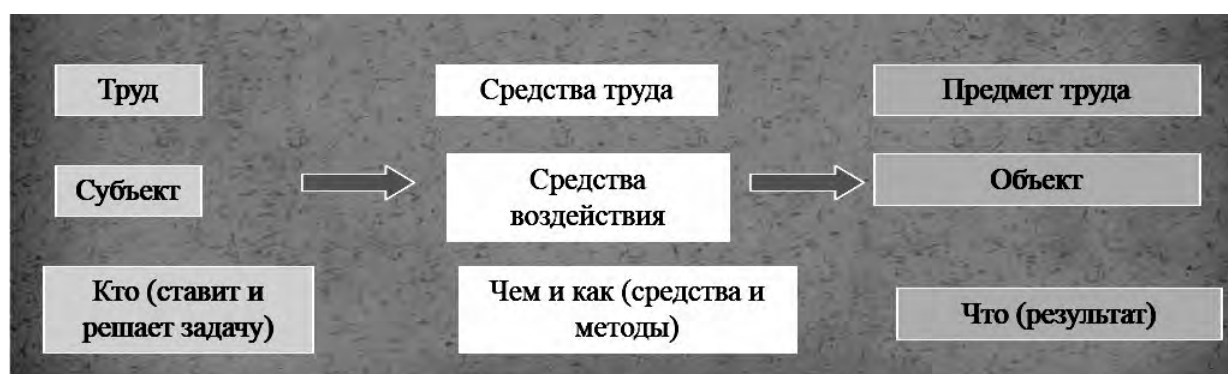


Рисунок 11 Элементы производственного процесса

При дальнейшем рассмотрении методологии НОТЭ в первую очередь будут определены элементы каждого из указанных видов ПП. При этом конечная цель методологии НОТЭ состоит в обоснования элементов ПП второго вида, который будет подробно изучен в главе 3 под названием «процесс изучения надежности» (ПИН). Уточним, что в этом случае будут рассматриваться субъекты и объекты исследования надежности, в то время как в ПП первого вида используются субъекты и объекты технической эксплуатации.

Однако в этой главе изучение методологии НОТЭ целесообразно начать с элементов ПП первого вида и уточнения понятий об объектах и субъектах процесса управления ТОР.

В предыдущих разделах монографии для обозначения объекта ТОР применялся термин «машина», как сложное изделие, состоящее из подвижных деталей и узлов. Однако машина сама является элементом более сложного объекта, например, автомобиля, самолёта, тепловоза, судна, цеха и прочих сооружений промышленности и транспорта. Такой объект далее будем называть объектом

конечного назначения (ОКН), а детали и узлы машины – ее элементами, которые могут иметь различные дефекты. Таким образом, образуется четырехзвенная система «ОКН – машина – элемент – дефект», хотя в общем случае объекты нашего исследования могут иметь более громоздкую структуру. Так машина может входить в состав того и иного функционального оборудования ОКН, а детали и узлы – в состав сборочных единиц машины. И все же для упрощения рассуждений далее в качестве объекта исследования будем подразумевать указанную четырехзвенную структуру, но для методов оценки надежности основным объектом остается термин «машина».

В четвертой главе книги при изучении надежности объектов они условно подразделены на конкретные машины и типовые машины. Надежность конкретных машин изучается в интересах обслуживающего персонала, а надежность типовых машин изучается с целью совершенствования документации для машин данного типа.

При технической эксплуатации ОКН и машину следует рассматривать как предмет труда (объект), на который направлена деятельность субъектов. Очевидно, что к таким субъектам следует отнести специалистов служб ОКН или ремонтных предприятий, которые осуществляют ТОР. Средствами труда в данном случае служит документация, оборудование и оснастка предприятий, с помощью которых осуществляется техническая эксплуатация ОКН.

Техническая эксплуатация – это производственный процесс, направленный на обеспечение экономичной и надежной работы ОКН при его коммерческой эксплуатации.

Основными задачами технической эксплуатации являются;

- обеспечение высокой степени готовности машин к использованию по назначению;
- обеспечение требуемого уровня надежности и безопасности использования ОКН и его элементов;
- содержание ОКН и машин в исправном состоянии;
- рациональное использование машин, топлива и смазочных масел;
- увеличение эксплуатационного периода ОКН;
- сокращение затрат на техническую эксплуатацию и повышение коэффициента технического использования (формула 8).

$$K_{mi} = \frac{T_э}{T_э + T_p + T_{mo}} \quad (8)$$

где  $T_э$  - время эксплуатации,  $T_p$  - ремонтное время,  $T_{mo}$  - затраты времени на техническое обслуживание.

Эти задачи должны решаться в период всего “жизненного цикла объекта”, который состоит из таких этапов, как создание и эксплуатация.

Этап создания включает в себя: научно-технические исследования по перспективе развития ОКН данного типа, разработка технического задания или контракта на проектирование и (или) покупку ОКН с требованиями по надежности; технический проект; рабочий проект; постройка объекта; приемо-

сдаточные испытания. Этап создания завершается подписанием приемо-сдаточного акта. С этого момента начинается техническая эксплуатация.

Этап технической эксплуатации в свою очередь состоит из трех элементов: техническое использование, техническое обслуживание и ремонт.

Техническое использование – это процесс управления техникой, который содержит такие операции, как пуск и остановка, изменение режимов работы, регулировка, контроль работы по штатным приборам, операции по использованию топлива, смазки и других материалов. Этой работа выполняется соответствующими субъектами, к которым относятся, например, водитель такси или трамвая, штурман судна, токарь при выполнении основной работы и прочие субъекты. Обычно они сами не занимаются ремонтными работами, хотя имеют некоторое отношение к ТОР в части качества эксплуатации объекта. При определенных условиях их могут привлекать к ремонтным работам за дополнительную плату, что, например, предусмотрено системой СНТОР на флоте рыбной промышленности [5].

В рамках концепции НОТЭ в основном будут рассматриваться два родственных производственных процесса ТОР – техническое обслуживание и ремонт. Здесь следует пояснить признаки сходства и различия этих производственных процессов. С теоретической точки зрения их различие состоит в следующем [32].

Техническое обслуживание – это комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Ремонт – это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов (сроков службы) изделий или их составных частей.

С другой стороны, это есть схожие и родственные понятия, поскольку речь идет о выполнении тех или иных технологические операций. Поэтому при планировании их часто объединяют в общую систему «техническое обслуживание и ремонт» - ТОР. При этом входящие в нее виды технического обслуживания и ремонта отличаются друг от друга содержанием и трудоемкостью, периодичностью и исполнителями работ.

Принято также считать, что техническое обслуживание выполняется без вывода машин из эксплуатации в помещениях ОКН, а ремонт - с выводом их из эксплуатации для обслуживания на ремонтном предприятии. Однако, на практике в различных отраслях промышленности применяются самые разнообразные организационные варианты в зависимости от типа объекта и субъекта выполнения ТОР.

Понятно, что к субъектам выполнения ТОР относятся предприятия или службы ОКН, которые должны организовывать, контролировать и выполнять эти работы. Например, на промышленных предприятиях ТОР оборудования занимается служба главного механика или главного энергетика [58]. Судовладельцы флота рыбной промышленности имеют службу или специалиста по эксплуатации и другие службы по организации ТОР [47]. При более подробном

рассмотрении, можно увидеть, что службы субъектов НОТЭ зачастую имеют весьма сложную иерархическую структуру.

Как было показано, любой производственный процесс должен содержать, кроме субъектов и объектов, такой элемент, как средства труда. К ним в первую очередь относится документация, которую можно подразделить на нормативно-техническую, учетную и отчетную документацию. В методологии НОТЭ эти средства информации играют первостепенную роль, ибо зачастую они являются основными источниками первичных сведений для оценки и анализа надёжности машин. С другой стороны, как будет показано далее, нормативно-техническая документация может выступать в роли объекта исследований при разработке ПП второго вида. К таким случаям относятся исследования, направленные на совершенствования или корректировку правил ТОР техники.

## 2.2. Процессы ТОР машин

В основу управления процессами технической эксплуатации положена классификация ТОР по ГОСТ 18322-78 [10]. Ремонты подразделяются на плановый и внеплановый ремонты.

Внеплановые технические обслуживания и ремонты обычно выполняются в случае возникновения отказов или аварий, которые имеют случайный характер и не подлежат планированию. Их можно так же назвать ремонтами по потребности. При возникновении или обнаружении отказов необходимо учитывать их последствия и субъектов выполнения ремонтных работ. Возможны следующие варианты последствий отказа.

1. Отказ машины не повлиял на работоспособность ОКН и его последствия могут быть устранены службами ОКН.
2. Отказ (авария) машины повлиял на работоспособность ОКН и его последствия устраняются на ремонтном предприятии.
3. Отказ (авария) машины повлиял на работоспособность ОКН и его последствия устраняются сервисной службой изготовителя машины.

Указанные случаи должны оформляться актами оценки причин, последствий и виновников событий и регистрироваться в учетной документации (например, журналах технического состояния). Эта информация связана с решением задач НОТЭ.

Необходимо отличать ремонты по потребности от ремонтов по плану. Обычно основной характеристикой надёжности ремонта по потребности выбирается интенсивность отказов и коэффициент готовности за назначенный срок службы до списания.

Плановые ремонты можно разделить на регламентированный ремонт и ремонт по техническому состоянию.

Регламентированный ремонт выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в эксплуатационной документации независимо от технического состояния изделия в момент начала ремонта. Такой ремонт обычно и называется планово-предупредительным ремонтом (ППР).

Ремонт по техническому состоянию, это ремонт, при котором контроль технического состояния выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в нормативно-технической документации, а объем и момент начала ремонта определяется техническим состоянием изделия. Такой ремонт еще называется планово-предупредительным освидетельствованием (ППО), который выполняется с применением средств и методов технической диагностики.

Надо признать, большую популярность идеи перехода от системы ППР к ремонту по состоянию, хотя большой разницы в этих системах не имеется. Известно, что процесс ТОР в общем случае подразделяются на следующие операции: подготовительные, контрольные, основные и заключительные (таблица 7). Это значит, что срок ремонта по состоянию должен соответствовать сроку контроля соответствующих диагностических параметров перед началом регламентированного ремонта. Поэтому, все зависит от состояния и совершенства применимых средств и методов технической диагностики. Нельзя забывать о многих процессах деградации машин, которые пока еще нельзя контролировать без разборки машины. Эта проблема требует особого рассмотрения

При составлении графиков ППР в него включаются виды ремонтов: текущий, средний и капитальный, а также технические обслуживания (например, ТО-1, ТО-2 и т. д).

ГОСТ 18322-78 позволяет образовывать собственные термины видов ремонтов и ТО в зависимости от режима эксплуатации организации и требований нормативно-технической документации для определенного вида оборудования.

В известном справочнике [58] график ППР для службы главного механика содержит только текущий и капитальный ремонты, а также ТО разных видов.

Каждый нормативный ремонт и ТО в системе характеризуется технологическими картами (графиками) с перечнем операций технического обслуживания и ремонта.

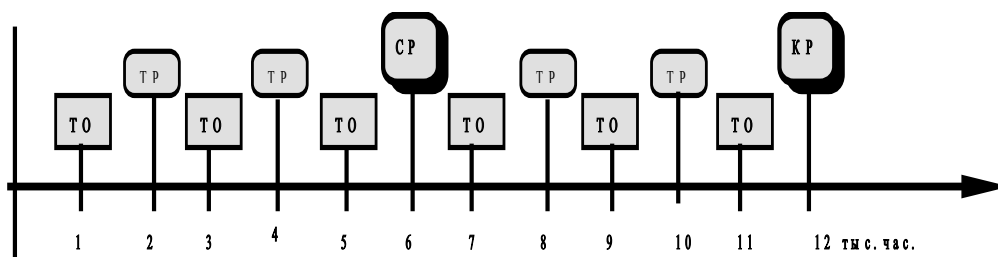


Рисунок 12 Ремонтный цикл

Основными характеристиками каждого  $y$ -го вида планового ремонта являются:

назначенный ресурс до ремонта  $R_y$ , тыс.ч.

номенклатура работ по маршрутному технологическому процессу,

трудоемкость ремонта  $W_y$ , тыс. нормо-час.

продолжительность ремонта  $\tau_y$ , тыс. час.

Если вместо индекса “у” в обозначение указанных показателей поставить индексы каждого вида ремонта ( $m$  - текущий,  $c$  - средний и  $k$  - капитальный), то соотношения между видами ремонта можно выразить следующим образом

$$\begin{aligned} R_m &< R_c < R_k, \\ W_m &< W_c < W_k, \\ \tau_m &< \tau_c < \tau_k. \end{aligned}$$

При этом, величины ресурсов должны быть кратны друг другу, что позволяет составить схему (график) ремонтов (рис. 12). Продолжительность эксплуатации от ее начала до капитального ремонта называется ремонтным циклом, который повторяется после каждого капитального ремонта. Ремонтный цикл характеризуется следующими параметрами:

- продолжительность ремонтного цикла, равная назначенному ресурсу до капитального ремонта  $R_k$ ,
- количество ремонтов каждого вида в цикле  $n_y$ ,
- суммарное число ремонтов в цикле  $\sum n_y$ .

Комплексным показателем ремонтного цикла является коэффициент технического использования, формула которого может быть представлена в следующем виде

$$K_{ТИ} = \frac{R_k}{R_k + \sum_1^m n_y \tau_y} \quad (9)$$

где  $m$  - число видов ремонта и ТО.

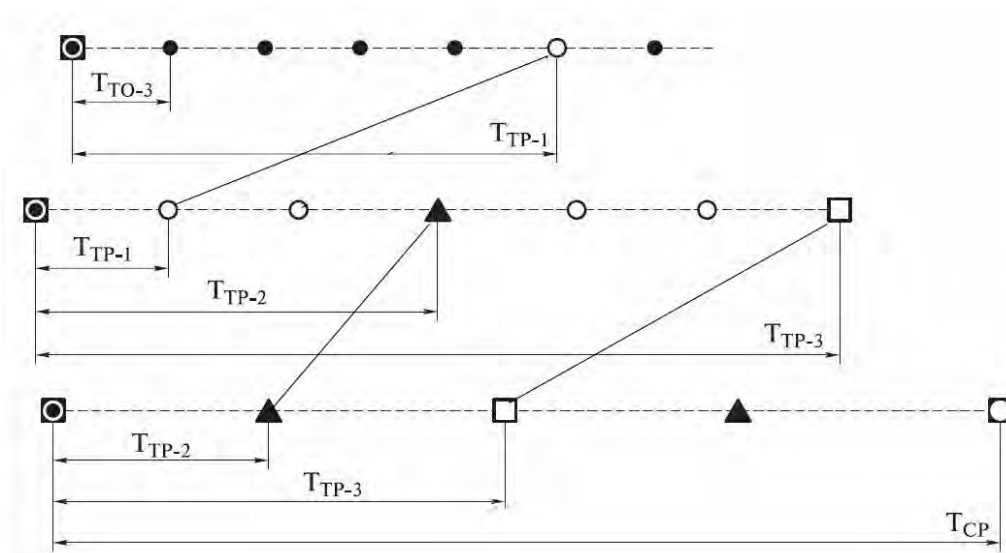


Рисунок 13 Циклограмма технического обслуживания и ремонта магистрального локомотива



Таблица 5 Ремонтные работы для магистральных локомотивов

Вид ТОР	Ресурс		Объекты	Субъект
	R <sub>y</sub>	разм		
ТО-1 и ТО-2	72	час	В состав работ входит контроль состояния экипажной части тепловоза, ревизия тяговых двигателей, тормозного оборудования, скоростемеров, приборов проверки бдительности машиниста и радиосвязи, устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН), обеспечивающих безопасность движения поездов и предупреждающих повреждения тепловозов при эксплуатации.	ТО_2 проводят на специальных смотровых канавах и в пунктах технического обслуживания локомотивов, оборудованных средствами диагностики, располагающих м запасом ЗИП
ТО-3	10	тыс. км	<i>Техническое обслуживание</i> ТО_3 выполняется в депо приписки для предупреждения появления неисправностей, поддержания тепловозов в работоспособном состоянии. Кроме работ, выполняемых при ТО_2, дополнительно при ТО_3 подвергают проверке и ревизии основные сборочные единицы: подшипники коленчатого вала дизеля, состояние турбокомпрессоров, форсунок. Кроме этого, очищают фильтры, контролируют состояние тягового генератора и вспомогательных электрических машин, электрических аппаратов, аккумуляторной батареи и т. п.	Техническое обслуживание ТО-3 выполняется в депо приписки. Работы выполняют слесари совместно с локомотивными бригадами.
ТР-1	50	тыс. км	рессорное подвешивание, тормозное оборудование. тяговые электродвигатели, вспомогательные машины и электроаппаратуру. Осуществляют <u>проверку зазоров подшипников коленчатого вала дизеля</u> , моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей. Подвергают ревизии и очистке турбокомпрессоры со снятием с тепловоза, проводят реостатные испытания и т. д.	Работы выполняют комплексные и специализированные бригады ремонтников. <b>В основном депо</b>

Продолжение таблицы 5 Ремонтные работы для магистральных локомотивов

Вид ТОР	Ресурс		Объекты	Субъект
	$R_v$	разм		
ТР-2	150	тыс. км	Сборочные единицы дизеля ( <u>цилиндров, поршней</u> , подшипников коленчатого вала, топливной аппаратуры и др.), вспомогательного оборудования (вентиляторов тяговых электродвигателей, гидропривода вентилятора и др.), электрических аппаратов, отдельных вспомогательных электрических машин. Также проводят ревизию тяговых редукторов, подбивку моторно-осевых подшипников, производят лечебную перезарядку аккумуляторных батарей, ревизию букс с проверкой разбегов КП, ревизию тормозного компрессора, автотормозных приборов, освидетельствование автосцепных устройств и др.	Работы выполняют комплексные и специализированные бригады ремонтников. <b>В ОСНОВНОМ ДЕПО</b> После выполнения ТР-2 проводятся полные реостатные испытания.
ТР-3	300	тыс. км	наряду с работами, проводимыми при ТР_2, восстанавливают работоспособность сборочных единиц и деталей тележек с их выкаткой из-под тепловоза, тяговых электродвигателей, редукторов и вентиляторов холодильника, секций радиатора, теплообменника, электрических машин и аппаратов.	Работы выполняются ремонтным персоналом в специализированных стойлах основного локомотивного депо.
СР	600	тыс. км	тепловоза путем модернизации, замены или ремонта изношенных, неисправных агрегатов, сборочных единиц, деталей. Основными факторами, определяющими необходимость проведения среднего ремонта тепловоза, являются <u>износ шеек коленчатого вала дизеля</u> и старение изоляции электрических машин, кабелей и электропроводки	. Средний ремонт выполняется в базовых локомотивных депо, на локомотиворемонтных заводах ОАО «РЖД» или в сторонних организациях, осуществляющих ремонт локомотивов.
КР	1200	тыс. км	Капитальный ремонт выполняется для восстановления исправности и полного ресурса локомотива, его эксплуатационных характеристик, модернизации агрегатов, сборочных единиц и деталей, полной замены проводов, кабелей и оборудования с выработанным ресурсом. Объем работ при капитальном ремонте устанавливается правилами, инструкциями и другой нормативно технической документацией.	Капитальный ремонт тепловозов выполняется на локомотиворемонтных заводах ОАО «РЖД» или в организациях, осуществляющих ремонт локомотивов.

Для плановых стратегий ТОР важнейшее значение имеет понимание того факта, что ресурс до ремонта каждого вида зависит от нормативной долговечности (ресурса, срока службы) и трудоёмкости ремонта соответствующих узлов и деталей машины, которые в свою очередь зависят от процесса их деградации. Этот принцип и лежит в основе концепции управления НОТЭ.

В этом легко убедиться, если рассмотреть многочисленные инструкции по эксплуатации и ТОР различных машин. Для примера рассмотрим циклограмму (рис. 13) технического обслуживания и ремонта магистрального локомотива, где предусмотрены технические обслуживания ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4 и ТО-5; текущие ремонты ТР-1, ТР-2, ТР-3; средние и капитальные ремонты [53].

Для демонстрации принципиального подхода к анализу зависимости ремонтов от надежности элементов машины в таблице 5 приведены объекты и субъекты системы ППР магистрального тепловоза ТЭ10 с дизель генератором марки 10Д10, который представляет собой весьма сложную конструкцию, состоящую многих сборочных единиц, детали которых подвержены различным процессам деградации. Из этой таблицы можно сделать вывод, что капитальный ремонт дизеля (через 17000 часов) определяется износостойкостью коленчатого вала и соответствует среднему ремонту тепловоза (600 тыс. км.), средний ремонт дизеля (через 4200 часов) определяется надёжностью цилиндровых втулок и поршней при ТР-2 через 150 тыс. км. пробега тепловоза, а текущий ремонт дизеля (через 1400 часов) зависит от изнашивания вкладышей подшипников при текущем ремонте тепловоза ТР-1 через каждые 50 тыс. км. Эти данные рассчитаны при условно – средней скорости движения тепловоза 35-36 км/час, при назначенном ресурсе 17000 часов до капитального ремонта дизеля.

### **2.3. Процессы ТОР объектов конечного назначения**

Несмотря на то, что основным объектом НОТЭ в нашей книге является машина, но управление ее ТОР все же зависит от режимов эксплуатации ОКН, куда она входит как составная часть. Отсюда вытекает необходимость показать особенности управления ТОР промышленного оборудования ОКН. В принципе именно этой проблеме были посвящены сайты ряда фирм в параграфе 1.4 монографии, например, при описании программного продукта TRIM. Однако, там хотя и названы, но слабо показаны особенности различных стратегий ТОР.

Эта проблема особенно актуальна для ОКН транспортных отраслей промышленности: морского, речного и рыболовного флота, авиационного, железнодорожного, автомобильного и других видов транспорта. Как правило, в этих отраслях используется планово-предупредительная система ремонтов ОКН, ремонтный цикл которых включает в себя текущий, средний и капитальный ремонты, а также технические обслуживания с меньшей трудоёмкостью, чем у ремонтов. Применительно к ОКН в разных отраслях эти виды работ могут иметь специфические названия. Это видно из положения о технической эксплуатации флота рыбной промышленности [47].

Кстати сказать, промысловое судно, в отличие от транспортного судна, имеет более сложный состав оборудования. Кроме традиционной энергетиче-

ской установки, в него могут входить такие группы оборудования (по заведованиям), как промышленное, холодильное, технологическое, поисковое и др.

У каждого заведования имеются свои субъекты, ответственные за эксплуатацию и ТОР соответствующих машин.

На рис. 14 показана общая структура эксплуатации ОКН, в которой имеется два основных ПП - коммерческая и техническая эксплуатация. Коммерческая эксплуатация отражает основную деятельность ОКН с целью получения практического результата (например, дохода от продажи рыбной продукции). В этом ПП судно является средством труда, а доход – предмет труда (объект). При переходе к технической эксплуатации судно становится предметом труда (объектом), поскольку на него направлена деятельность по ТОР.



Рисунок 14 Структура эксплуатации ОКН

Рассмотрим особенности технической эксплуатации ОКН на примере судов промышленного флота с учетом многолетнего опыта работы автора в этой отрасли. К субъектам технической эксплуатации и ТОР относятся службы, которые можно разделить на судовые и береговые службы.

При организации технической эксплуатации судна все оборудование распределено по указанным выше заведованиям. Береговые службы технической эксплуатации находятся в составе аппарата судовладельцев. К ним относятся отдел технического обслуживания и ремонта, технический отдел, механико-судовая служба и др.

Особое значение имеет документация по технической эксплуатации, которая может быть классифицирована в соответствии с иерархической структурой управления. На самом высоком уровне находятся законодательные акты общенационального значения, начиная от Основного закона - Конституции Российской Федерации. К ним относятся законы Российской Федерации, Гражданский и Уголовный кодексы и другие. Очевидно, что эти документы должны неукоснительно выполняться при эксплуатации флота, а отраслевая документация не должна противоречить их основным положениям.

К межотраслевой руководящей документации, предназначенной для обеспечения безопасности мореплавания, относятся руководящая документация органы надзора за строительством и эксплуатацией судов. Первостепенное значение среди них имеют Правила классификации и постройки Морских судов и другая документация Морского Регистра судоходства (Руководство по техническому надзору за судами в эксплуатации, Руководство по техническому надзору за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий и др.).

Затем следует руководящая (организационная и техническая) отраслевая документация, среди которой на первое место следует поставить Устав судов флота рыбного хозяйства. В Уставе регламентируются права и обязанности судовых специалистов. Непосредственное отношение к качеству и надежности имеют такие руководящие отраслевые документы как «Положение о технической эксплуатации флота рыбной промышленности», «Положение о ремонте судов флота рыбной промышленности» с нормативами ремонта и др.

Для обеспечения нормальной эксплуатации суда должны быть обеспечены комплектами соответствующей конструкторской, технологической и эксплуатационной документации. В частности, на каждом судне обязательно должны быть чертежи и спецификации на основные элементы, механизмы, устройства и системы, а также руководства по их эксплуатации. Для ТО и ремонта проектными организациями для серийных судов разрабатываются графики ТОР по заведованиям, технологические инструкции по ремонтам, типовые ремонтные ведомости, ТУ на ремонт, а также нормативы расхода запасных частей, горюче-смазочных материалов и других материалов. В частности, подобная документация создана в рамках документации для СНТОР.

Вместе с тем существует документация, которую должны вести судовые специалисты в процессе технической эксплуатации. К такой документации можно отнести следующие учетные и отчетные документы:

- вахтенные машинные журналы,
- журналы технического состояния судовых технических средств,
- журналы водоподготовки,
- карты обмеров деталей и узлов механизмов,
- сводные ремонтные ведомости,
- рейсовые задания и рейсовые отчеты,
- журналы учета и движения горюче-смазочных материалов и др.

Систематическое ведение учетной и отчетной документации является необходимым условием обеспечения надежной и экономичной работы судовых технических средств и судна в целом. В частности, только при этом условии возможна объективная оценка причин отказов и аварийных происшествий с последующей разработкой мер по их предотвращению в будущем.

Аккуратное ведение судовой учетной и отчетной документации позволяет более точно составлять ремонтные ведомости, планировать потребность в запасных частях и материалах, корректировать графики работ по ТОР и решать другие задачи технической эксплуатации.

Для оценки эффективности технической эксплуатации флота в целом или флотов отдельных судовладельцев в литературе приводится ряд показателей,

таких, например, как коэффициент технического использования, коэффициент технического состояния, доля судов, имеющих класс Морского Регистра судоходства, удельная трудоемкость технического обслуживания и удельная трудоемкость ремонтов судов. Эти показатели могут быть как плановыми (нормативными), так и фактическими.

Для флота рыбной промышленности наиболее важным является показатель, характеризующий потери календарного времени из-за выполнения технического обслуживания и ремонта. Как уже было сказано таким показателем является коэффициент технического использования  $K_{ми}$

Как всякий производственный процесс рассматриваемые процессы могут быть разбиты на отдельные операции, которые в общем случае подразделяются на следующие группы: подготовительные, контрольные, основные и заключительные.

В таблице 6 приводится содержание основных операций для рассматриваемых процессов технической эксплуатации. Во всех случаях к подготовительным операциям относятся работы по оформлению документов и подготовке средств и материалов, необходимых для основной работы как судна в целом, так и отдельным машин и механизмов.

Таблица 6 Процессы технической эксплуатации

Операции	Процессы технической эксплуатации		
	Техническое использование	Техническое обслуживание	Ремонт
Подготовительные	Подготовка техники к действию.	Подготовка средств обслуживания.	Подготовка судна и производства к ремонту.
Контрольные	Функциональный контроль рабочих параметров	Техническая диагностика	Предремонтная диагностика и поузловая дефектация деталей и узлов
Основные	Управление техникой.	Техническое обслуживание по графику и после отказов	Демонтаж с судна и разборка. Восстановление деталей и узлов. Сборка и регулировка. Монтаж на судне
Заключительные	Вывод техники из действия. Отчеты.	Проверка качества работ и испытания	Приемо-сдаточные испытания

Контрольные операции имеют своей целью уточнение объема работ при выполнении основных операций и принятия решений и мер по устранению выявленных отклонений рабочих параметров от нормы.

К основным операциям относятся работы, выполняемые на каждом этапе технической эксплуатации как судна в целом, так и судовых технических средств с использованием соответствующей руководящей документации при условии ведения необходимой учетной документации.

Заключительные операции включают в себя работы по выводу техники и оборудования из действия, выходному контролю качества выполнения основных работ (испытаний) и оформление отчетной и (или) приемо-сдаточной документации.

В соответствии с положением о ремонте флота рыбной промышленности [47] ремонт судов осуществляется по системе ППР. Вместе с тем имеются ремонты, выполняемые вне этой системы: гарантийный ремонт, выполняемый на верфи в конце гарантийного срока эксплуатации; восстановительный, выполняемый после аварий и других случайных событий; поддерживающий, выполняемый в конце срока службы до списания.

Рассмотрим более подробно систему ППР судна в целом, ремонтный цикл которого содержит следующие виды ремонтов:

капитальный (КР), средний (СР), расширенное межрейсовое техническое обслуживание (РМРТО), межрейсовое техническое обслуживание (МРТО).

Для этих видов ТОР по основным типам судов флота рыбной промышленности были разработаны нормативы следующих показателей: продолжительность ремонта или ТО, сметная трудоемкость, выработка при ремонте.

Кроме того, для каждого типа судна в нормативах приводится так называемый код ремонтного цикла, состоящий из четырех цифр, например

1 1 6 8

Первая цифра означает количество капитальных ремонтов в цикле (т.е. 1),

Вторая цифра означает количество средних ремонтов в цикле (т.е. 1),

Третья цифра означает количество РМРТО в цикле (т.е. 6),

Четвертая цифра означает количество МРТО в цикле (т.е. 8) и одновременно – продолжительность цикла в годах, т.е. в данном случае 8 лет.

Для судов в целом вместо назначенного ресурса до ремонта используется родственный показатель - срок службы до ремонта или ТО соответствующего вида.

Код ремонтного цикла позволяет определить сроки службы до каждого вида ремонта и ТО по графику ремонтного цикла, который приведен на рис. 15.

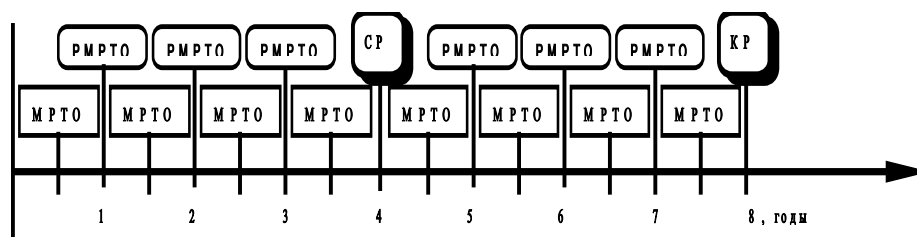


Рисунок 15 Ремонтный цикл судна

Из этих графиков видно, что они составлены для судна, у которого назначенные сроки службы до ремонтов составляют

- 8 лет до капитального ремонта,
- 4 года до среднего ремонта,
- 1 год до РМРТО
- полгода до межрейсового ремонта (или МРТО).

Сроки службы  $T_{y до}$  каждого вида ремонта или ТО судна можно также рассчитать по формуле

$$T_y = \frac{T_u}{\sum_1^y n_i}, \quad (10)$$

где  $T_u$  - продолжительность ремонтного цикла, равная сроку службы до капитального ремонта, лет,

$y$  - номер вида ремонта в коде ремонта, для которого определяется  $T_y$ ,

$n_i$  - количество ремонтов в цикле каждого  $i$ -го вида для  $i \leq y$ .

Расчет по формуле (10) подтвердил периодичность ремонтов судна:

$$T_k = 8/1=8, T_c = 8/(1+1)=4, T_{\text{рмрто}} = 8/(1+1+6)=1, T_{\text{мрто}} = 8/(1+1+6+8)=0.5.$$

Средний и капитальный ремонты являются заводскими, т.е. выполняются на СРП с целью восстановления класса Регистра. Обычно в их состав входят работы по ремонту или ТО более низкого ранга.

Остальные ремонты и ТО выполняются на базах технического обслуживания (в том числе и за рубежом), ремонтными бригадами или членами машинной команды. Объем ремонта каждого вида (т.е. его трудоемкость и стоимость) можно определить на основании совмещения ремонтных циклов судна и отдельных его элементов (машин). При этом названия видов ремонта объектов разного уровня могут и не совпадать друг с другом, но должен быть соблюден принцип кратности ремонтов и ТО.

Рассмотренные процессы управления ремонтом ОКН имеют самостоятельное значение для организации ТОР промышленного оборудования на основе АСУ активами предприятий, как это показано на сайтах раздела 1.4 книги.

Вместе с тем они являются исходными компонентами концепции НОТЭ, на которые должны быть направлены деятельность субъектов по исследованию надежности машин. Этой проблеме будет посвящена следующая глава книги и её содержание вытекает из анализа составляющих элементов ПП при различных стратегиях ТОР. К субъектам, которые должны быть заинтересованы в исследовании надёжности машин, относятся службы ОКН, изготовители, ремонтные и другие организации. Особое значение имеют сервисные подразделения изготовителя, которые осуществляют ТОР продукции. Непосредственными исполнителями исследований надежности могут быть службы ОКН и изготовителя машины, органы надзора, отраслевые НИИ, сотрудники ВУЗов. Необходимо предусмотреть привлечение квалифицированных исполнителей для анализа и оценки показателей надёжности.

Объектом процесса исследования надёжности являются её показатели, необходимые для корректировки эксплуатационной документацию или оценки причин отказов.

К средствам труда в процессе исследования надёжности следует отнести методы, алгоритмы и программы расчётов вероятностных характеристик, а также первичные исходные данные.

Управлению процессами изучения надёжности посвящена следующая глава книги



### 3. Процессы изучения надежности машин

#### 3.1. Общие положения

В этом разделе книги предлагается схема процесса анализа и изучения надежности (ПИН) машин как элемента общей концепции НОТЭ. Отсутствие такой схемы в методологии RCM затрудняло получение четкого ответа на такие вопросы, как: кто и с какой целью должен выполнять эту работу, какие показатели надежности следует рассчитывать в зависимости от стратегии ТОР, какие документы надо совершенствовать в результате исследований и прочее.

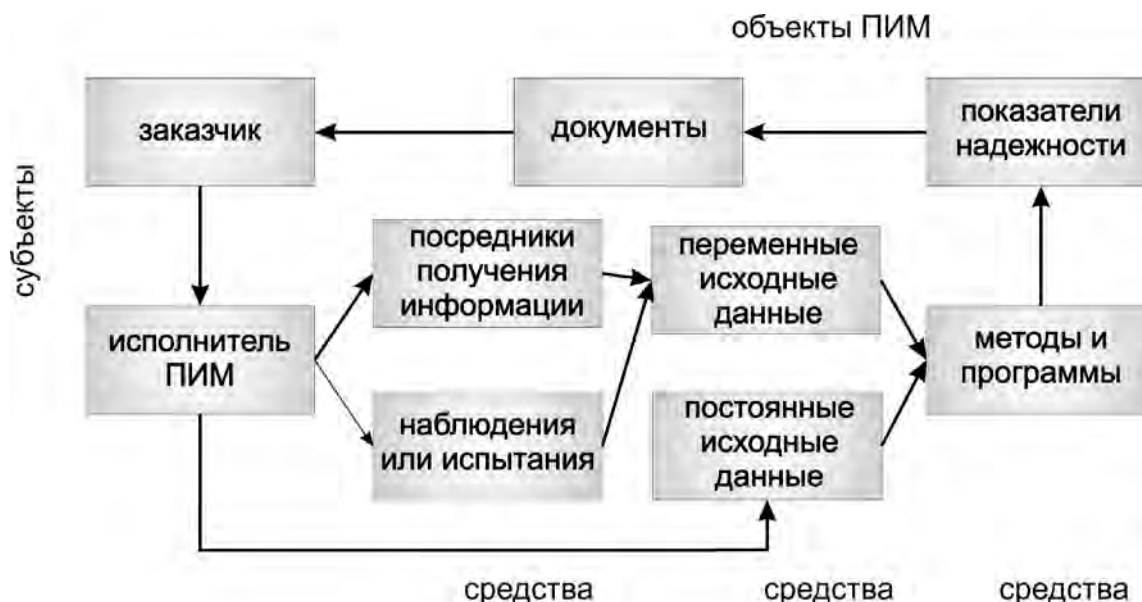


Рисунок 16 Элементы ПИН машин

Предлагаемая структура ПИН построена по общим правилам формирования любого ПП из трех элементов: субъекта, объекта (предмета) и средства труда (см. параграф 2.1.1). Принципиальная схема ПИН показана на рис. 16.

В следующих параграфах будет подробнее разъяснена сущность каждого элемента ПИН. В первую очередь покажем, кто относится к субъектам процесса исследования. Их можно разделить на заказчиков и исполнителей. Заказчик – это организация, заинтересованная в повышении надежности объекта эксплуатации. Исполнитель – организация, выполняющая исследования надежности. Важнейшее значение имеет участие в ПИН еще одного субъекта - исполнителя ТОР, т.е. организации или службы, выполняющее ТОР как по потребности, так и по плану. В некоторых случаях эти субъекты могут быть совмещены.

Затем будут рассмотрены объекты ПИН, т.е. показатели надежности машин, а также документы, которые должны разрабатываться или совершенствоваться в результате ПИН для заказчика.

Подробно рассмотрим источники информации, а также методическое и программное обеспечение, как для расчета показателей надёжности, так и для получения необходимых исходных данных для расчета в результате наблюдений или испытаний. Эти атрибуты относятся к элементу ПП, который назван «средством труда».

В ГОСТ Р 27.606-2013 сказано: «Максимальную пользу приносит проведение RCM-анализа на стадии разработки изделий, когда его результаты могут непосредственно повлиять на их конструкцию. Вместе с тем RCM-анализ также полезен на этапах эксплуатации, ТО изделий, когда могут быть усовершенствовано содержание и методы ТО, проведены конструктивные и иные доработки».

Таблица 7. Задачи и корректирующие документы ПИН

Код	Задача	Документация
Z-1	Поддержание на высоком уровне надёжности элементов конкретных машин с целью управления их качеством	Отчёты, конструкторская и технологическая документация
Z-2	Постоянный мониторинг общего уровня надёжности типа машины с целью к повышения ее качества	Отчёты и планы мероприятий повышения качества продукции
Z-3	Разработка или корректировка нормативов ТОР оборудования	Утверждённая редакция нормативного документа
Z-4	Корректировка руководство по эксплуатации машин	Утверждённая редакция нового документа
Z-5	Разработка или корректировка нормативов ЗИП	Утверждённая редакция нормативного документа
Z-6	Участие в определении причин и виновников отказов и аварий машины	Отчёты, акты, протоколы и прочее

Столь расплывчатые сведения об области применения RCM не позволяли четко обозначить субъекты ПИН, которые могут и (или) должны финансировать, организовывать или выполнять исследования надёжности в зависимости от целевого назначения. Между тем от грамотного выбора субъектов ПИН зависит возможность решать поставленные задачи, устанавливать виды разрабатываемых документов и оценивать эффективность результатов работы.

Прежде, чем перейти к рассмотрению субъектов исследования, сформулируем перечень основных задач и отчётных документов ПИН (таблица 7).

Обращается внимание на тот факт, что в таблицу не включена задача разработка руководство по эксплуатации машин, поскольку она выходит за рамки технической эксплуатации и относится к сфере создания продукции.

Субъекты исследования можно условно подразделить на две группы – Заказчики, Исполнители и Посредники. К Заказчикам отнесем организации или службы, которые заинтересованы в повышении надёжности рассматриваемых объектов эксплуатации (машин) и могут или должны организовывать и финансировать эту работу.

Исполнитель – это организация или служба, которой поручено выполнить все исследования на высоком профессиональном уровне с оформлением необходимой документации. К посредникам можно отнести организации или службы, которые являются источниками информации об исходных данных для ПИН, например, дефектных или ремонтных ведомостей, актов рекламаций, опросных листов экспертов и пр. Забегая вперёд, отметим, что в некоторых

случаях эти субъекты могут быть объединены, когда Заказчик, Исполнитель и посредники являются одним и тем же юридическим лицом.

Таблица 8 Перечень заказчиков исследования надёжности

Код	Заказчики исследований надёжности
SI-1	Изготовители, имеющие сервисные подразделения ТОР,
SI-2	Изготовители и владельцы со службами надёжности машин
SI-3	Изготовители и владельцы без служб ТОР и надёжности машин
Sot	Отраслевые ведомства эксплуатации промышленности и транспорта,
Sop	Органы надзора за состоянием и качеством продукции,

Таблица 9 Исполнители исследования надёжности

Код	Исполнители исследований надёжности
J1	Службы надёжности изготовителей машин или владельцев ОКН
J2	Отраслевые КБ и НИИ
J3	Специализированные испытательные лаборатории
J4	Корпорации по оказанию услуг по использованию RCM
J5	Научные сотрудники, преподаватели, студенты и аспиранты вузов

Таблица 10 Посредники исследования надёжности

Код	Службы
PJ1	Сервисные службы изготовителя
PJ2	Эксплуатационные и ремонтные службы владельца ОКН
PJ3	Предприятия по ТОР рассматриваемых машин
PJ4	Эксперты по оценке качества продукции
PJ5	Сюрвейерские службы

Роль заказчиков исследований надёжности могут исполнять следующие субъекты (таблица 8).

В качестве Исполнителей исследований надёжности Заказчик может привлекать субъекты, перечисленные в таблица 9. Посредники перечислены в таблице 10.

Относительно взаимодействия заказчиков и исполнителей исследований можно сделать следующие комментарии.

К рассматриваемой системе ПИН должны нести её изготовители, которые в зависимости от возможности получения исходных данных для решения задач типа Z-2 разделены на три группы. Наибольшую эффективность в этой области можно ожидать от предприятий группы SI-1, имеющие сервисные службы PJ1 создаваемого оборудования, как было показано на примере изготовителя планшетного компьютера в разделе 1.2.2. Службы этого предприятия оперативно получают полную информацию об отказах продукции, оценивают уровень надёжности и причины отказов, а также разрабатывают и внедряют меры по устранению дефектов. В данном случае рассматривается относительно простой случай ремонта по потребности, когда основными показателями явились интен-

сивность отказов и коэффициент готовности. По-видимому, столь же эффективно могут работать сервисные службы фирм-поставщиков серийных машин (например, автомобилей) с плановой стратегией ТОР. Но тогда образуется более сложная структура информации не только об отказах, но и об износах при плановых ремонтах, которые нужны для оценки и корректировки нормативов ресурсов элементов машин.

Очевидно, что наибольшую ответственность за качество продукции несут производственные предприятия группы S1-3, которые не занимаются ТОР своей продукции, но ответственно относятся к проблеме ее качества, которым решать проблему оценки и повышения надёжности не так просто. Основные проблемы связаны со сложностью получения исходных данных в условиях эксплуатации и ремонта однотипных машин у разных владельцев ОКН и ремонтных служб. В лучших условиях находятся предприятия группы S1-2, службы которых могут накапливать и анализировать базы данных на основе сотрудничества с посредниками PJ2 владельцами ОКН. Предприятиям группы S1-3 работу по задачам Z-2 приходится заказывать сторонним исполнителям J4 или вузов J5 участием посредников.

Наиболее вероятными заказчиками исследований по проблеме Z-2 являются службы владельцев ОКН (Sv) с целью управления ТОР машин данного типа. Исполнителями этой работы могут быть специалисты изготовителя J1, специализированных лабораторий J3 или вузов J3.

Глобальные задачи Z-3 по разработке нормативов ТОР могут быть поставлены и оплачены отраслевыми ведомствами Sot, подобно тому, как это было организовывало при создании системы СНТОР судов промыслового флота [5]. В тоже время эта проблема входит в прямую обязанность изготовителей продукции как элемент руководства по эксплуатации. Исполнителями такой работы могут быть проектные и научные организации J2 и вузы J5 отрасли, возможно с привлечением специалистов корпораций J4.

Таблица 11 Таблица для планирования ПИН

Заказчик	Задачи и документы						Исполнители				
	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4	Z-5	Z-6	J1	J2	J3	J4	J5
SI-1	•	•	•	•		•	•				
SI-2	•	•	•	•		•	•			•	•
SI-3	•	•	•	•		•				•	•
Sot			•					•		•	•
Son						•	•		•		•
Sv		•		•	•	•	•		•	•	•
Sr					•		•	•			

Проблему совершенствования руководства по эксплуатации машины Z-4 целесообразно поручать специалистам служб J изготовителя S1 или владельца машины Sv.

В разработке или корректировке нормативов запасных частей (задача Z5) в первую очередь заинтересованы службы владельцев Sv и ремонтных предприятий Sr. Исполнять эту работу могут службы изготовителя и владельца J1, а также и отраслевые КБ и НИИ J2.

Инициатором исследований по определению причин и виновников отказов и аварий машин Z-6 обычно выступают органы надзора Son за счет средств владельца Sv. К выполнению такой работы могут привлекаться такие исполнители как специализированные лаборатории J3, службы изготовителя J1, кафедры вузов J5 и др.

Эти комментарии нам пригодятся при описании методов и средств оценки надежности машин в зависимости от стратегии ТОР с применением соответствующего программного и методического обеспечения. Для подготовки к этим процедурам в таблице 11 приведена итоговая методика для планирования исследований в части выбора заказчиков и исполнителей для решения различных задач ПИН.

Описание объектов и средств ПИН рассмотрено в следующих разделах. Здесь пока важно обратить внимание на три направления оценки и получения информации для анализа надежности. Первое направление относится к оценке показателей безотказности по данным об отказах из сферы эксплуатации. Второе направление связано оценкой показателей долговечности по данным отчетных документов ТОР. Третье направление заключается в проведении специальных ресурсных испытаний. Для расчетов показателей надёжности по первым двум направлениям требуются получать приемлемые по объему выборки данных об отказах или износах. Третье направление исследований может выполняться путем испытаний единичных образцов элементов машин.

### **3.2. Термины и определения по надежности**

Эта книга и другие взаимосвязанные труды [32...37] базируется на терминах и определениях ГОСТ 27.002 – 89 о надежности техники. Далее будет показан лишь ограниченный перечень определений и показателей, необходимый и достаточный для обоснования методов и средств ПИН.

При изучении надежности рассматриваются следующие категории: свойства, состояния, события, процессы и другие.

Надежность - свойство объекта выполнять и сохранять во времени заданные ему функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Понятие о надежности требует дополнительного разъяснения, поскольку с одной стороны это свойство входит в состав более общего свойства, которое называется качеством продукции. Одновременно надежность представляет собой сложное понятие, включающее в себя такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Показатель надежности - величина, характеризующая одно из свойств (единичный показатель) или несколько свойств (комплексный показатель) надежности. К единичным показателям относятся показатели указанных разделов надежности. К комплексным показателям относятся коэффициенты технического использования и готовности.

Как было показано в методологии RCM основное внимание уделяется оценке следующих показателей безотказности систем.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  - вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t$  отказ объекта не возникнет. Определяется по формуле (4).

Вероятность отказа  $F(t)$  - вероятность того, что в пределах заданной наработки возникнет отказ объекта, что соответствует формуле

$$F(t) = 1 - P(t) \quad (11)$$

Интенсивность отказов - условная плотность вероятности невозстанавливаемого объекта, определяемая по отношению к еще не отказавшим объектам для рассматриваемого момента времени. При экспоненциальном законе распределения справедлива формула (12), а методика расчета при других законах будет показана в следующих разделах книги.

$$\lambda = 10^6/n_o = const. \quad (12)$$

где  $n_o$  - количество отказов за миллион часов.

Наработка на отказ  $t_o$ - отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течении этой наработки, определяемые его конструкцией и техническим состоянием. При экспоненциальном законе распределения справедлива формула (3).

К показателям, характеризующим безотказность продукции, целесообразно отнести также коэффициент готовности  $K_z$ , определяемый по формуле (5).

Показатели безотказности являются основными для продукции, ремонт которой выполняется по потребности по мере возникновения отказов.

Однако для плановых ТОР (включая ремонты по состоянию) ответственных машин первостепенное значение имеют показатели долговечности и ремонтно-пригодности. В зависимости от условий эксплуатации к показателям долговечности относятся либо сроки службы, либо ресурсы. Ресурсом называется наработка с начала работы до наступления предельного состояния. Он применяется для оборудования в случае учета его наработки. Срок службы характеризует только календарное время от начала эксплуатации до предельного состояния.

Показатели долговечности можно разбить на две группы. Показатели первой группы характеризуют надежность машины в целом. Они по своему смыслу совпадают с характеристиками ремонтов в разделе 2.1.2 и имеют такие названия.

Назначенный ресурс - суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация машины должна быть прекращена с целью принятия решения о ее допуске к дальнейшей эксплуатации.

Назначенный ресурс до ремонта (текущего, среднего или капитального) - назначенный ресурс до первого текущего, среднего или капитального ремонта.

Назначенный срок службы - календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена для освидетельствования и принятия решения о допуске к дальнейшей эксплуатации, постановке в ремонт соответствующего вида или списании.

Эти показатели являются нормативными параметрами машины, наряду с такими показателями ремонтпригодности как средняя трудоемкость и продолжительность ремонта каждого вида. Перечень и характеристики плановых ТОР обычно включаются в руководство эксплуатации машины, создаваемой изготовителем продукции. При этом применяются расчетно-экспериментальные методы обоснования ресурсов элементов машины в зависимости от соответствующего вида ремонта. В этой книге демонстрируется уважительное отношение к отраслевым методам исследования и обеспечения надёжности их продукции, которые основаны на многолетнем опыте ее создания.

Для контроля надежности машин, которые уже находятся в эксплуатации, можно применять один из двух методических походов оценки этих показателей. Первый подход является статистическим, который основан на расчете средних величин по данным о выборке фактических ресурсов (или сроков службы), трудоемкостей или продолжительности ремонта ряда однотипных машин. На первый взгляд такой метод обеспечивает более высокую точность расчета средних величин. В действительности его нельзя признать достаточно достоверным, ибо исходная выборка отражает не столько уровень надежности объекта, сколько качество организации контроля плановых нормативных документов.

Более корректным направлением оценки долговечности машин при плановых стратегиях ТОР является изучение процессов деградации их элементов с учетом ресурса до соответствующего вида ремонта. Учитывая вероятностную природу деградационных процессов, задача сводится к оценке так называемых гамма – процентных ресурсов (ГПР).

Согласно ГОСТ [14], гамма-процентный ресурс, это - наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Выбор допустимой величины  $\gamma$  зависит от степени опасности рассматриваемого процесса и обычно назначается поставщиком изделий. Известно, например [32], что долговечность подшипников качения официально оценивается по 90 – процентному ресурсу обоймы для шариков (роликов), а для процесса изнашивания узлов машин многих типов принимают допустимую вероятность  $\gamma = 80\%$ . При изучении усталостных разрушений применяется 95 - процентный ресурс. Кроме того, часто принято рассчитывать медианный ресурс при  $\gamma = 50\%$  взамен среднего ресурса.

Если объект имеет нескольких видов процессов деградации, то общий ресурс машины назначается по тому из них, который имеет минимальные значения ГПР на основании принципа одинаковых последствий [32].

В принципе основной целью изучения надежности является оценка стадий изменения состояний изделия в зависимости от времени. Имеются два уровня изменения состояний – исправное (неисправное) и работоспособное (неработоспособное). Предельное состояние - состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

Эти понятия будут более детально рассмотрены при изучении параметрической модели отказов и повреждений элементов машин. Для количественной оценки времени отказов и повреждений в этой книге применяются такие понятия об уровнях предельных состояний.

Номинальный (начальный) уровень состояния - состояние объекта после изготовления или ремонта, характеризующее его пригодность к длительной эксплуатации.

Назначенный (предельно – допустимый) уровень предельного состояния - установленная нормативно-технической документацией величина, достижение которой соответствует неисправному состоянию и возникновению повреждения элемента объекта.

Критический уровень предельного состояния - величина, достижение которой соответствует неработоспособному состоянию и возникновению отказа элемента объекта.

Ключевыми понятиями теории надежности являются термины об отказах и повреждениях.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Повреждение - событие, заключающееся в нарушении исправности объекта при сохранении его работоспособности.

Отказы, как правило, изучаются с целью оценки безотказности машин, а повреждения – для оценки их долговечности и ремонтпригодности. Далее дадим лаконичную классификацию этих событий.

Допустимое повреждение - повреждение, которое возникает в результате действия естественных деградиционных процессов элемента объекта и учитываемое в первую очередь при установлении назначенного ресурса до ремонта.

Недопустимое повреждение - повреждение, возникновение которого в период отработки назначенного ресурса связано с допущенными нарушениями правил проектирования, эксплуатации, ремонта, технического обслуживания, хранения или транспортирования объекта.

Внезапный отказ - отказ, возникновение которого характеризуется постоянной во времени интенсивностью отказов и скачкообразным изменением технического состояния не зависящее от возраста объекта.

Постепенный отказ (повреждение) - отказ (повреждение), возникновение которого характеризуется постепенным увеличением интенсивности отказов под воздействием одного или нескольких деградиционных процессов

При разборе причин и виновников аварий рассматриваются такие категории отказов.

Конструкционный отказ - отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и (или) норм конструирования.

Производственный отказ - отказ, возникший в результате нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта.

Эксплуатационный отказ - отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта.

Рассмотрим процессы ухудшения состояния элементов машин, которые приводят к повреждениям и отказам.

Деградиционный процесс - процесс изменения (ухудшения) технического состояния объекта под воздействием конкретных внешних и внутренних факторов.

Изнашивание - деградиционный процесс изменения размеров, формы, массы объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от



постоянно действующих нагрузок, либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении.

Коррозия - химический или электрохимический процесс разрушения поверхности тела при его взаимодействии с внешней средой.

Характеристика изменения технического состояния - зависимость параметра, характеризующего техническое состояние элемента при рассматриваемом деградационном процессе, от наработки или продолжительности эксплуатации.

### 3.3. Вероятностные методы оценки показателей надежности

#### 3.3.1. Общие положения

Из предыдущего содержания следует, что в основе методологии ПИН лежат алгоритмы вероятностной оценки характеристик надежности машин и их элементов, которые должны иметь корректное методическое и программное обеспечение. Обычно методика ПИН состоит из трех этапов: получение исходных данных, расчет искомых показателей и анализ результатов расчета с включением их в документацию.

Достоверность результатов ПИН в первую очередь зависит от способа получения исходных данных, которые можно разбить на две группы. К первой группе относятся постоянные исходные данные из нормативно-технической или справочной документации. При рассмотрении машин с плановой стратегией ремонтов к ним в первую очередь относится руководство по эксплуатации с графиком ТОР. Эти данные должны содержать сроки и допустимые критерии проверки состояния элементов машины. К постоянным исходным данным также относятся справочные нормы вероятностных характеристик, например, интенсивность отказов  $\lambda$  и допустимые вероятности не достижения предельного состояния  $\gamma_{дон}$ .

Ко второй группе исходных данных относятся случайные величины, полученные путем испытаний или сбора информации об отказах или повреждениях машин по данным посредников по таблице 10. Эти данные являются переменными и предназначены для образования векторов выборки случайных величин  $X$ , которые и подлежат обработке методами теории вероятности и статистики на втором этапе ПИН.

Выборка (выборочная совокупность), это совокупность величин  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  ограниченного числа наблюдений случайной величины  $X$ .

Объем выборки - число единиц, образующих выборочную совокупность.

Статистические характеристики выборки – совокупность показателей для количественной оценки выборки. Наиболее распространенными характеристиками выборки являются средняя арифметическая величина  $X_{cp}$ , среднее квадратичное отклонение (СКО)  $\sigma$ , коэффициент вариации  $V$ , а также эмпирические распределения: вероятности безотказной работы  $P(t)$  или не достижения предельного состояния  $\gamma(t)$ , интенсивности отказов  $\lambda(t)$  и плотности распределения  $f(t)$ .

Средняя арифметическая (выборочная) величина  $X_{cp}$  - приближенное значение математического ожидания  $\mu$  случайной величины  $X$ .

$$\mu \approx X_{cp} = \sum_1^N X_i / N \quad (13)$$

где  $N$  - объем выборки,  $i$  - номер члена выборки.

Среднее квадратичное отклонение (смещенная оценка) - основной показатель вариации, представляющий собой корень второй степени из дисперсии

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1)} \quad (14)$$

Коэффициент вариации - отношение СКО к средней величине варьирующего признака.

$$V = \sigma / X_{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1)} / X_{cp} \quad (15)$$

Дальнейшее рассмотрение методов оценки показателей надежности зависит от целевого назначения этих методов. В теории вероятности наибольшую популярность получила задача проверки достоверности математического ожидания по формуле (16) путем оценки доверительных границ, в которые попадает исследуемая величина с доверительной двухсторонней вероятностью  $\alpha_2$ .

$$X_{\max, \min} = \mu \pm \delta. \quad (16)$$

где  $\delta$  - отклонение от средней величины, зависящее от СКО  $\sigma$ , объема выборки  $N$  и квантиля распределения Стьюдента  $st(\alpha_2, N)$

$$\delta = st(\alpha_2, N) \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (17)$$

При больших выборках  $N \geq 30$  функция быстро стремится к квантилю нормального распределения  $Z$  для односторонней вероятности  $\alpha_1 = 1 - 0.5(1 - \alpha_2)$ . В стандартных расчетах неопределенности принимается  $Z = 2$  для  $\alpha_2 = 0.95$ , что соответствует  $\alpha_1 = 0.975$  (точнее 0.977).

Такой алгоритм можно использовать, например, при оценке среднего ресурса до ремонтов соответствующего вида по информации о фактических наработках между этими ремонтами. Как правило, при таком подходе можно получить достаточно точную оценку  $\mu$ , которая, однако, отражает не столько надежность машины, сколько качество соблюдения требований нормативной документации по ТОР.

Более сложные алгоритмы применяются при расчете гамма – процентных ресурсов элементов машин по исходным данным, получаемых, как правило, путем

проведения ресурсных испытаний. В этом случае применяются цензурированные или параметрические модели постепенных отказов или повреждений.

### 3.3.2. Цензурированные методы оценки надежности

Цензурированная модель соответствует выборке, состоящей из наработок до отказов и до цензурирований группы однотипных образцов хотя бы в количестве от 10 до 30 экз. Понятие об отказе было рассмотрено в предыдущей главе. Что касается термина «цензурирование», то им называется событие, приводящее к прекращению наблюдения за изделием до или после наступления системного события (например, отказа). Цензурирование слева образуется тогда, когда к моменту окончания наблюдений часть объектов отказала, а другая часть продолжает работать, причем неизвестно, как долго эти объекты проработают без отказа.

Сначала покажем некоторые элементы оригинальной методики расчета гамма – процентных ресурсов цензурированной выборки путем построения эмпирического распределения вероятности по данным о безразмерной интенсивности отказов. Оригинальность этих методов заключается в возможности прогнозирования гамма – процентного ресурса по мере возникновения отказов, что не требует ожидания выхода из строя всех образцов.

Указанные программы базируются на общем алгоритме расчетов, который состоит из двух этапов (не считая этапа ввода первичной информации).

Сначала надо построить эмпирическое распределение вероятности  $P_i$  от номера отказа  $i$ . В работе [35] предлагается универсальный метод оценки вероятности  $P_i$  по формуле (18) с помощью безразмерной интенсивности отказов  $\lambda_i$

$$P_i = \prod_{i=1}^i \frac{1}{1 + \lambda_i}. \quad (18)$$

Формулы (19) ... (21) для расчета  $\lambda_i$  выбираются в зависимости от цензурированной модели.

$$\lambda_i = \frac{n_i}{N - \sum_{i=1}^i n_i} \quad \text{для ЦМ - 1,} \quad (19)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N - i} \quad \text{для ЦМ - 2,} \quad (20)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N + N_c - \left( i + \sum_{i=1}^i n_{ci} \right)} \quad \text{для ЦМ - 3.} \quad (21)$$

Предлагается использовать три варианта цензурированных моделей ЦМ-1, ЦМ-2 и ЦМ-3. Модели ЦМ-1 и ЦМ-2 относятся к выборкам, цензурированным слева, которые содержат полные и неполные (цензурированные) наработки, при-

чем все неполные наработки равны между собой и больше любой наработки до отказа.

Модель ЦМ-1 соответствует схеме на рис. 17 и заключается в одновременной постановке на испытания группы образцов, отказы которых обнаруживаются путем периодического контроля всей группы через заданный интервал времени (например, через 28 суток).

Таким образом, образуется ряд частот  $n_i$  при выполнении каждой  $i$  – й проверки после наработки  $t_i$ . В этом случае  $\lambda_i$  определяется по формуле (19).

Модель ЦМ-2 соответствует схеме на рис. 18 и отличается от предыдущей модели тем, что каждый  $i$  – й отказ фиксируется отдельно в момент его возникновения (по сигналу системы) и таким образом образуется ряд наработок  $t_i$  до каждого отказа. В этом случае  $\lambda_i$  определяется по формуле (20).

Модель ЦМ-3 относится к схеме на рис. 19. Она содержит цензурированные интервалы, когда неполные наработки  $tc_i$  не равны между собой и могут располагаться между наработками до отказов. В этом случае при накоплении цензурирований  $nc_i$  в период до наступления каждого  $i$  - го отказа интенсивность  $\lambda_i$  определяется по формуле (21).

Затем с помощью эмпирического распределения выбирается закон распределения  $P(t)$ , и определяются его параметры: масштаба  $a$  и формы  $b$ . (рис.20).

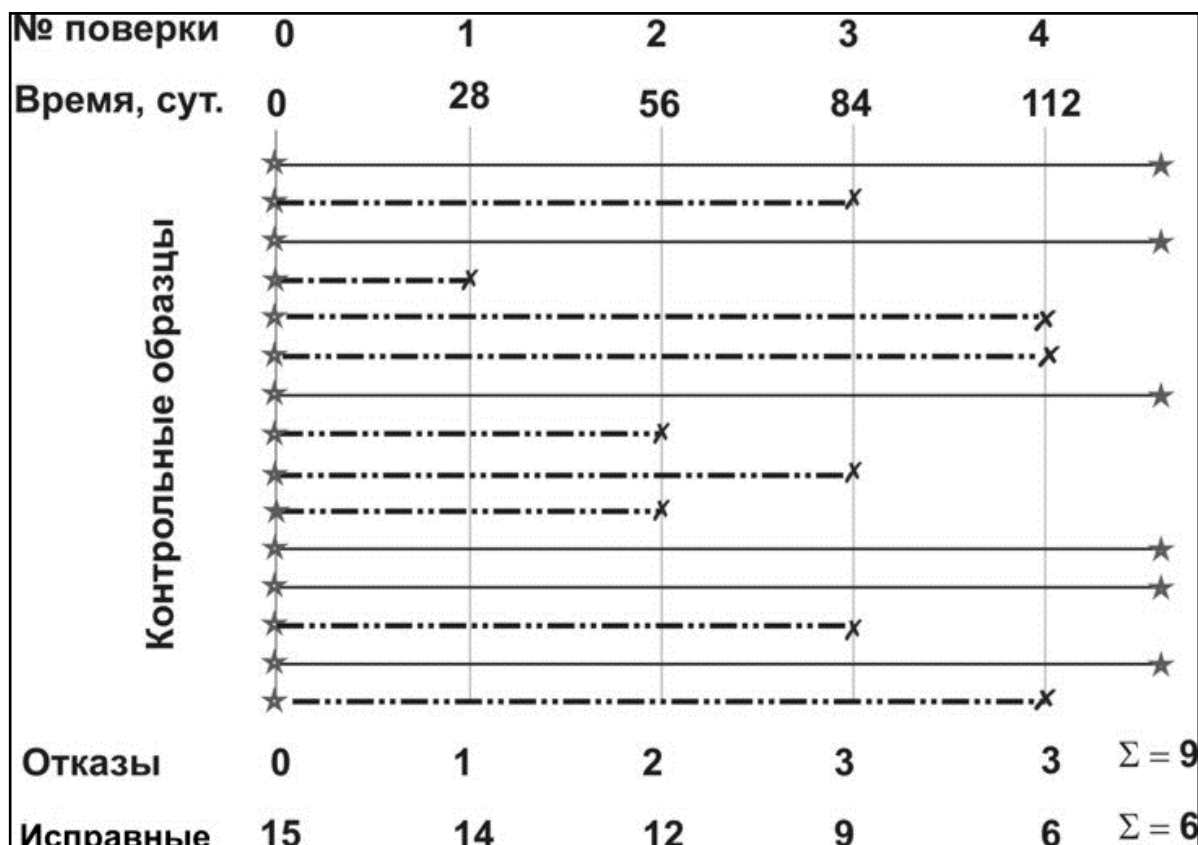


Рисунок 17 Схема для модели ЦМ-1. × - отказ, ★ - цензурирование

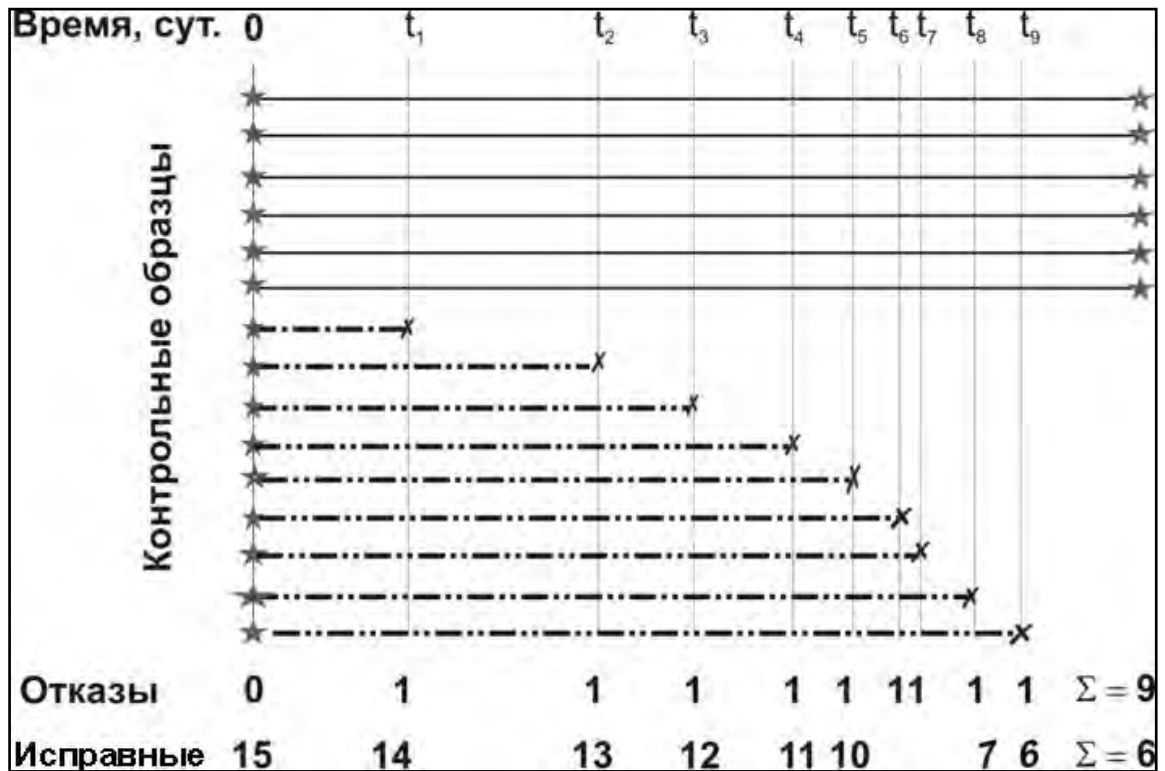


Рисунок 18 Схема для модели ЦМ-2. ✕ - отказ, ★ - цензурирование

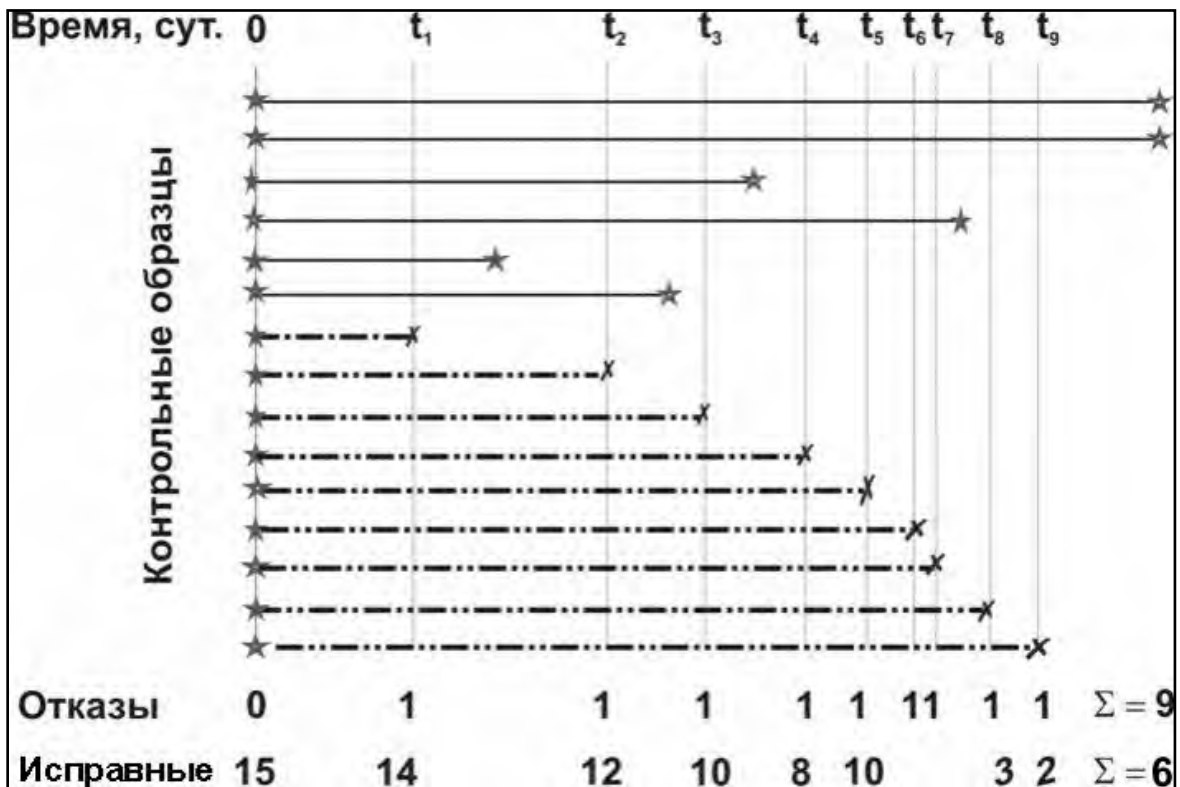


Рисунок 19 Схема для модели ЦМ-3. ✕ - отказ, ★ - цензурирование.

Наибольшее распространение получили следующие законы двухпараметрических распределений: нормальный, логнормальный, равномерный и Вейбулла.

При изучении теории вероятностей основное внимание уделяется нормальному закону распределения (законе Гаусса), хотя по ряду причин он не всегда пригоден для решения инженерных задач.

$$f(t) = e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} / \sigma \sqrt{2\pi}, \quad a) \tag{22}$$

$$P(t) = 1 - \left[ \int_{-\infty}^t e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} dt / \sigma \sqrt{2\pi} \right] \quad b)$$

Его изучение принято начинать с рассмотрения функции плотности вероятности, которую можно рассчитать непосредственно по формуле (22а). Одновременно ниже приводится и интеграл вероятности для функции распределения, который вручную рассчитывать не удастся. У нормального закона параметр масштаба  $a$  равен математическому ожиданию  $\mu$ , а параметр формы  $b = \sigma$  – СКО. Для определения плотности вероятности в MATHCAD имеется специальный оператор  $dnorm(x, a, \sigma)$ , что не требует применения громоздкой формулы (22а). При расчете на калькуляторе приходится пользоваться специальными таблицами из математических справочников [56].

Ясно, что и функцию ВБР никто не определяет по интегралу (22б). Для этого имеется несколько других способов. Основной способ заключается в предварительном определении квантиля по формуле (23а) с последующим определением вероятности с помощью оператора  $snorm(Z)$  по формуле (23б) (в редакторе MATHCAD).

$$Z = \frac{\mu - X}{\sigma} \quad a) \tag{23}$$

$$P(X) = snorm(Z) = snorm\left(\frac{\mu - X}{\sigma}\right) \quad b)$$

Однако на практике (как было уже сказано) чаще рекомендуют применять закон распределения Вейбулла, для которого справедливы следующие функции (24) для ВБР  $P(t)$ , интенсивности отказов  $\lambda(t)$  и плотности распределения  $f(t)$ .

$$P(t) = e^{-[t/a]^b}, \quad a) \tag{24}$$

$$\lambda(t) = (b/a)(t/a)^{b-1}, \quad b)$$

$$f(t) = (b/a)(t/a)^{b-1} e^{-[t/a]^b}. \quad c)$$

Тогда гамма – процентный ресурс можно рассчитать по формуле (25)

$$R(\gamma) = a \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b}}. \quad (25)$$

где  $a$  – параметр масштаба,  $b$  – параметр формы,  $\gamma$  - допустимая вероятность не достижения предельного состояния.

Если  $\mu$ ,  $\sigma$  и  $V$  выборки известны, то с их помощью можно оценить параметры теоретического распределения методом моментов. В первом приближении параметр формы  $b$  соответствует обратной величине коэффициента вариации выборки  $V$ , а точное значение можно получить по специальному алгоритму через гамма-функции или по специальным таблицам [56]. При использовании математических редакторов применяются соответствующие операторы. В случае редактора Mathcad параметр масштаба этого распределения, который несколько отличается от  $\mu$  выборки за счет коэффициента  $K(b)$  и зависит от гамма-функции, определяется по формуле (26).

$$a = \mu / K(b), \quad K(b) = \Gamma(1 + (1/b)) \quad (26)$$

Имеется несколько способов оценки параметров  $a$  и  $b$  по эмпирическому распределению  $P_i$ , которые будут показаны на примерах в следующей главе книги. Критерием согласия этих распределений служит коэффициент корреляции, который должен быть не менее 0.95.

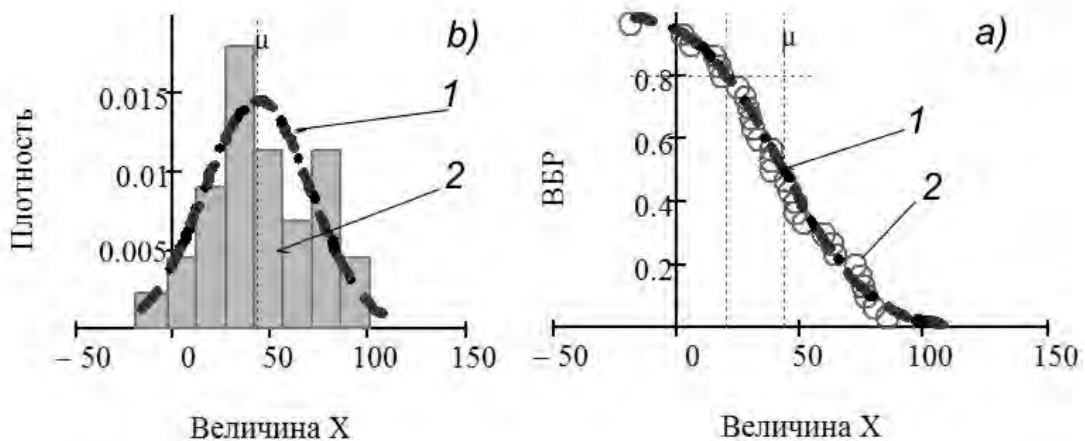


Рисунок 20 Графики ВБР (а) и плотности распределения (b), где 1 – теоретические функции и 2 – эмпирические функции

### 3.3.3. Параметрические методы оценки надёжности

Приведем некоторые сведения о параметрических моделях, которые описывают корреляционные зависимости диагностического параметра  $h$  от времени  $T$  веерного, трендового, усталостного или другого типа [32].

Для этого напомним, что диагностический параметр (ДП) — это физическая величина, непосредственно определяемая средством измерения и функционально зависящая от уровня состояния исследуемого внутреннего элемента машины. Обычно изменение ДП во времени вызвано постепенным ухудшением, т.е. процессом деградации изделия.

На рис. 21 приведена символическая схема, содержащая основные этапы формирования отказа и ресурса исследуемого объекта, например, зазора подшипника машины. Траектория изменения его состояния по мере увеличения модуля ДП от времени работы (наработки) представлена медианной характеристикой ДП  $D_1$  (ХДП) и левой границей  $D_2$  области неопределённости этой характеристики. Указанная неопределённость обусловлена вероятностной природой ХДП из-за неизбежного влияния случайных факторов при изготовлении, ремонте и эксплуатации объекта. Для дальнейшего изложения материала важно отметить, что в зарубежных правилах диагностики техники принято несколько уровней предельного состояния объекта, например, LA (предельно-допустимый уровень) и LR (критический или предельно-недопустимый уровень).

Из рисунка видно, как кривые ХДП, постепенно возрастая от номинальной величины  $L_0$  до уровня LA, находится в зоне исправного состояния  $Z_1$ . При достижении предельно-допустимого уровня LA наступает событие  $C_2$ , которое называется повреждением. Оно должно быть устранено путем ремонта узла. Если этого не сделать, то объект попадает в зону неуверенного состояния  $Z_2 = LR - LA$  и может достигнуть, критического уровня LR с очень большой вероятностью возникновения события  $C_3$ , которое называется отказом. Отказ — это событие, связанное с переходом из неисправного состояния  $Z_2$  в зону неработоспособного состояния  $Z_3 > LR$ , что может привести к большим убыткам в период эксплуатации.

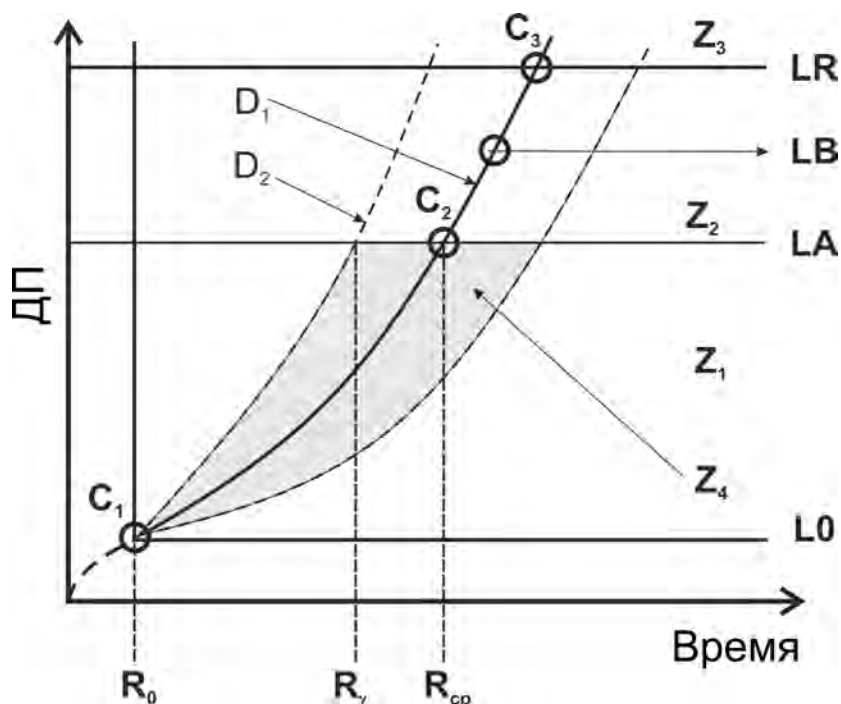


Рисунок 21 Символическая схема деградации состояния объекта



Уровень  $LA$  устанавливается разработчиком изделия на основании специальных исследований или по опыту эксплуатации изделий – аналогов. Его определение является сложной проблемой, которая часто основано на применении вероятностной логики субъективных решений.

Вероятностная логика рассуждений подсказывает, что для обеспечения высокой безотказности работы ресурс должен определяться по точке пересечения ХДП  $D_1$  с линией  $LA$  в точке  $C_2$ . Проекция этой точки на временную ось является медианным или средним ресурсом  $R_{cp}$ . Однако, из-за наличия области неопределенности (рассеяния)  $Z_4$  эту величину опасно принимать за нормативное значение, ибо лежащие справа от  $C_2$  реализации ХДП приведет к увеличению вероятности отказам объекта. Этим обстоятельством и вызвана необходимость расчета гамма – процентного ресурса  $R_\gamma$  по точке пересечения  $LA$  с граничной линией  $D_2$  при вероятности  $\gamma$ .

Концепция обеспечения гарантированной долговечности машин на основе понятия о гамма-процентного ресурсе много лет пропагандировалась автором во всех его трудах. В этой работе для оценки ресурса узла трения на основании измерении диагностического параметра впервые введен метод, учитывающий возможность некоторого превышения  $LA$  за счет введения промежуточного, условно-допустимого уровня  $LB$ . Такая задача возникает из опыта корректировки назначенного ресурса узла в пределах  $\pm(20... 25)\%$ , как это часто рекомендуется в инструкциях по эксплуатации машин.

Логично предположить, что расчетная точка  $LB$  будет находиться между  $LA$  и  $LR$  и определяться по формуле (27b), но для этого надо еще решить основной вопрос о предварительном назначении критического уровня  $LR$  по формуле (27a). Эту величину трудно обосновать экспериментально путем доведения объектов до аварийного состояния, хотя некоторые сведения удалось найти в тех или иных источниках. Так проводимые нами исследования износов цилиндрических втулок дизелей корпорации «Звезда» [32] показали, что для них  $LR = 0.8$  мм при  $LA = 0.3$  мм, т.е.  $LR/LA = 2.67$ . В инструкции по эксплуатации прибора для измерения вибрации VIP - 20 ((фирма SPM INSTRUMENT, Австрия)) для скорости вибрации указано  $LA = 4.5$  мм/сек и  $LR = 11$  м/сек, откуда отношение  $LR/LA = 2.44$ . В рассматриваемом ниже примере оценки надежности поршневых кольца на рис. 60 при начальном зазоре  $h_0 = 0.2$  мм имеем  $LA = 0.35$  и  $LR = 0.55$ , что позволяет получить отношение  $(LR - h_0) / (LA - h_0) = 2.33$ . Таким образом, при отсутствии более точных данных для обоснования  $LR$  в первом приближении и с явным запасом можно применить формулу (27a).

$$\begin{aligned} LR &= 2(LA - L_0) + L_0 = 2LA - L_0, & a) \\ LB &= (LR + LA)/2 = (3LA - L_0)/2 & b) \end{aligned} \tag{27}$$

Параметрическая модель допускает одновременно испытывать от одного до 6-10 образцов. При этом появляется возможность прогнозировать гамма – про-

центный ресурс изделия еще до наступления ЛА на основе выбранного типа вероятностной модели.

Возвращаясь к параметрической модели испытаний, рекомендуется весь их период разбивать на сеансы, каждый из которых должен завершаться многократным измерением ДП объемом не менее 10 повторений. Полученные выборки данных подвергаются корреляционному анализу в функции от времени.

Вероятностная модель типа «Веер» имеет широкое применение при ресурсных испытаниях узлов трения [36]. В ее основу положена линейная функция со случайным угловым коэффициентом  $C_i$ , который можно назвать износостойкостью, пропорциональной искомой выборке ресурса  $R_i$  (формула (28)). В этой формуле  $T_0$  и  $h_0$  – время и износ после окончания приработки,  $h_{np}$  – предельно допустимый износ.

$$C_i = \frac{T_i - T_0}{h_i - h_0}, \quad R_i = C_i (h_{np} - h_0). \quad (28)$$

Как показано в работе [36], эта вероятностная модель может резко сократить затраты на испытания за счет использования специальных методов, например, метода искусственных баз для измерений износа сразу в 42 точках поверхности узла после каждого сеанса. Такой способ позволяет обеспечить высокую достоверность оценки СКО и ГПР при минимальных затратах времени и средств.

На рис 22 приведен пример трендовой параметрической модели линейного типа «Тренд» (29).

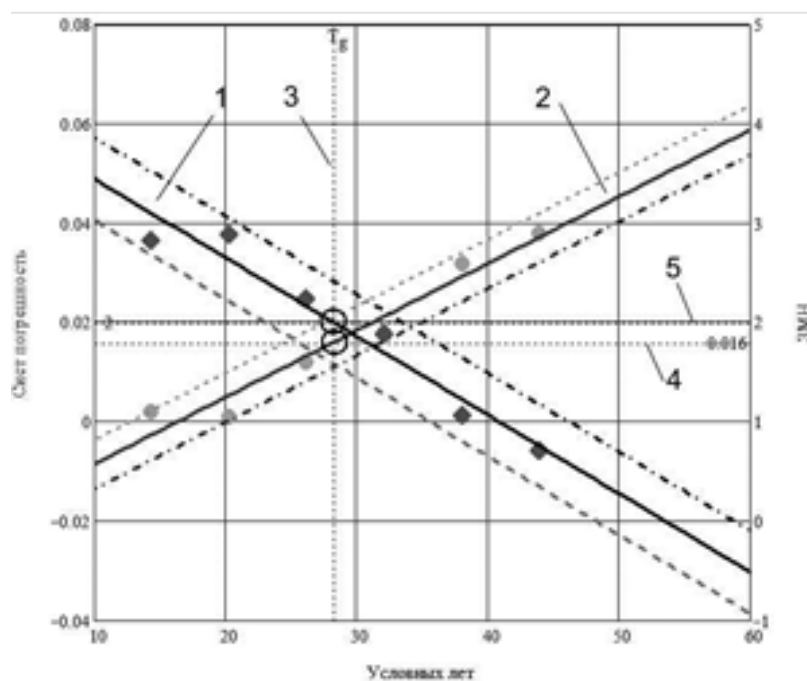


Рисунок 22. Тренды ЗМН (1) и систематической погрешности (2) в зависимости от условного срока службы. Средний срок службы – 3, допустимые уровни систематической погрешности – 4 и ЗМН – 5.

В этом случае применяются известные приемы корреляционного анализа с целью получения уравнения регрессии вида (29).

$$h(t, z) = A_h + B_h t \pm z \sigma_h. \quad (29)$$

где  $t$  – наработка,  $A_h$  и  $B_h$  – постоянные уравнения регрессии,  $Z = 2$  - запас надежности (квантиль) при заданной вероятности  $\alpha_l = 97.5\%$ ,  $\sigma_h$  - СКО уравнения регрессии по оси  $h$ .

$$\sigma_h = \sqrt{Var_h (1 - R_{xy}^2)} \quad (30)$$

где  $Var_h$  – вариация вектора выборки по оси  $h$  (износ),  $R_{xy}$  - коэффициент корреляции.

На рис. 23 показана корреляционная зависимость медианного ресурса от уровня нагрузки, характеристики которой были рассчитаны путем применения логарифмической анаморфозы (рис. 23а) и метода наименьших квадратов. Полученные уравнения позволили построить кривые зависимости нагрузки от наработки в циклах (средняя линия и граничные кривые) и рассчитать предел усталости при заданном ресурсе в декартовых координатах (рис. 23б).

Следующий пример относится к результатам ресурсных испытаний на усталостную прочность для степенной функции с нулевой асимптотой.

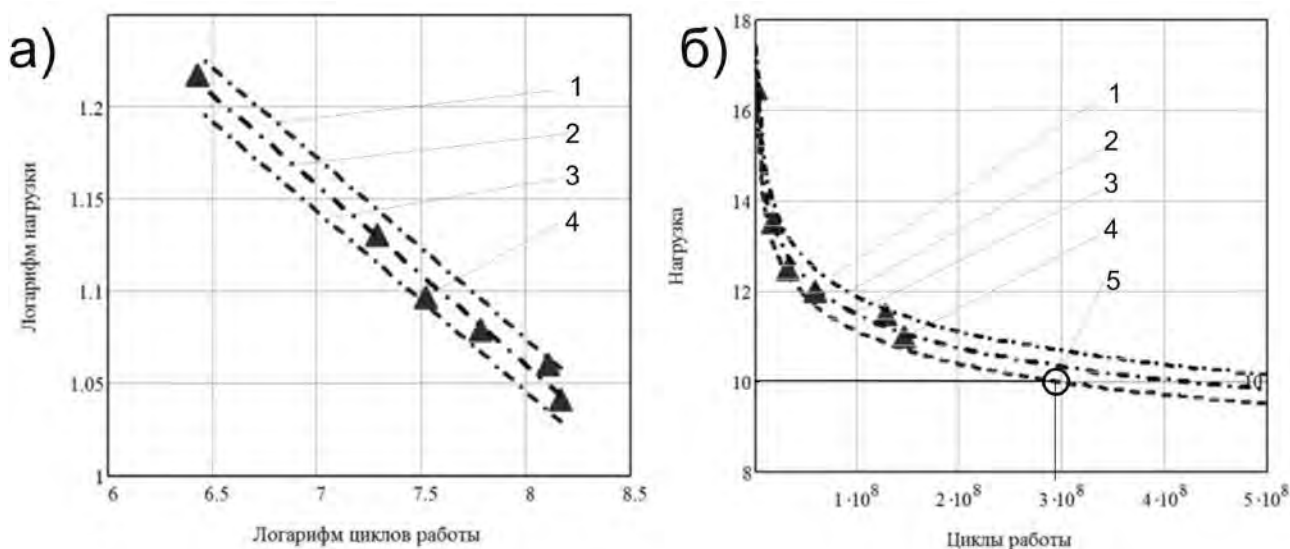


Рисунок 23 Графики усталостного типа в логарифмических (а) и декартовых (б) координатах, где 1, 2 и 3 – расчетные линии (верхняя, средняя и нижняя), 5 – точка предела усталости для  $\alpha_l = 97.5\%$  -

### 3.3.4. Методы факторного анализа

При исследовании характеристик различных объектов имеются и другие методы логического анализа. Так, например, при решении многих проблем технологии, экономики, эксплуатации и качества продукции приходится применять различные методы многофакторного анализа для выявления факторов, в наибольшей мере влияющих на результат исследования. К таким методам относится относительно простой метод Парето, который ведет свою историю с 1897 года, когда итальянский экономист Вильфредо Парето (1848—1923) предложил формулу, показывающую, что блага распределяются неравномерно. Эта же теория была проиллюстрирована американским экономистом М. Лоренцом в 1907 г. на диаграмме. Оба ученых показали, что в большинстве случаев наибольшая доля благ (доходов) принадлежит небольшому числу людей.

Д. Джуран применил диаграмму М. Лоренца в сфере контроля качества для классификации проблем качества. Он назвал этот метод анализом Парето и указал, что в большинстве случаев подавляющее число дефектов и связанных с ними потерь возникают из-за относительно небольшого числа причин, проиллюстрировав это с помощью диаграммы, которая так же получила название диаграммы Парето. (Рис. 24).

Построение диаграммы Парето начинают с классификации возникающих проблем по отдельным факторам (например, проблемы, относящиеся к браку; проблемы, относящиеся к работе оборудования или исполнителей, и т.д.). Затем следуют сбор и анализ статистического материала по каждому фактору, чтобы выяснить, какие из этих факторов являются преобладающими при решении проблем.

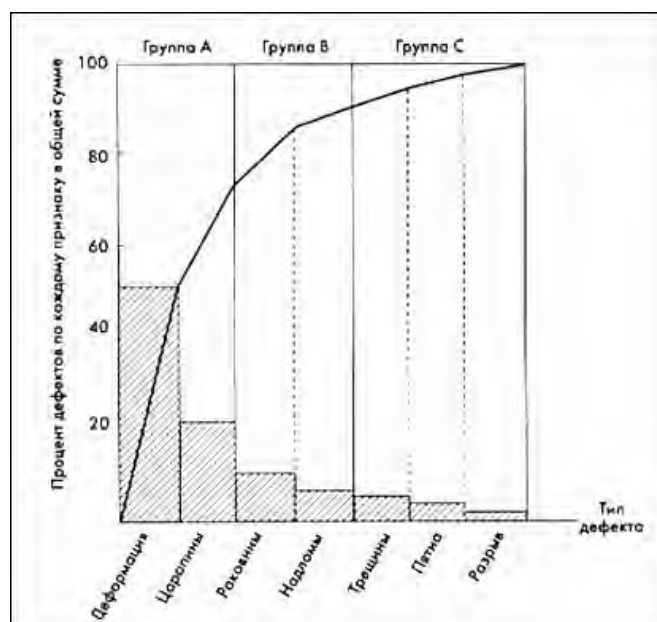


Рисунок 24 Диаграмма Парето

В прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывают равные отрезки, соответствующие рассматриваемым факторам, а по оси ординат — величину их вклада в решаемую проблему. При этом порядок расположения факторов таков, что влияние каждого последующего фактора, расположенного по оси абсцисс, уменьшается по сравнению с предыдущим фактором (или группой факторов). В результате получается диаграмма, столбики которой соответствуют отдельным факторам, являющимся причинами возникновения проблемы, и высота столбиков уменьшается слева направо. Затем на основе этой диаграммы строят кумулятивную кривую.

После выявления проблемы путем построения диаграммы Парето по результатам важно определить причины ее возникновения. Это необходимо для ее решения. При использовании диаграммы Парето для выявления результатов деятельности и причин наиболее распространенным методом является ABC-анализ. Сущность ABC-анализа в данном контексте заключается в определении трех групп, имеющих три уровня важности для управления качеством:

группа А — наиболее важные, существенные проблемы, причины, дефекты. Относительный процент группы А в общем количестве дефектов (причин) обычно составляет от 60 до 80%. Соответственно устранение причин групп А имеет большой приоритет, а связанные с этим мероприятия — самую высокую эффективность;

В разделе 4.3.5. показано практическое применение такой диаграммы при оценке причин отказов судового дизеля с использованием математического редактора MATHCAD.

### 3.4. Средства технической диагностики

#### 3.4.1. Классификация средств и методов диагностирования

Проблему перехода на систему ТОР по состоянию невозможно решать без использования и совершенствования средств и методов технической диагностики, которая является одним из направлений контроля технического состояния. Контроль технического состояния машин и их элементов в процессе их эксплуатации является необходимым условием обеспечения их требуемого качества и надежности.

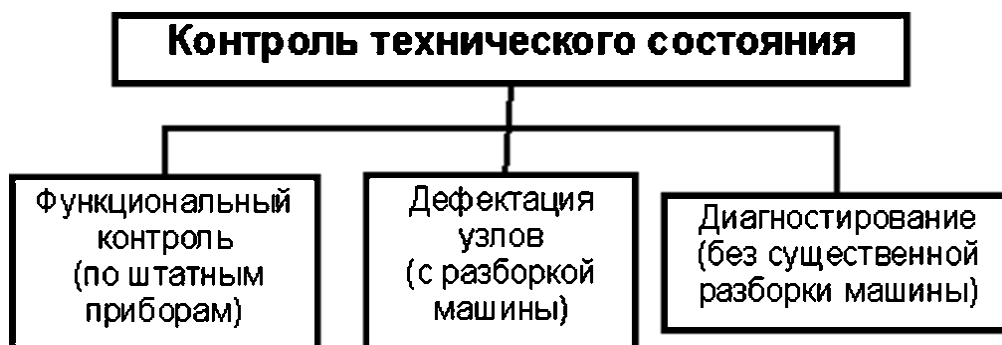


Рисунок 25 Классификация контроля технического состояния

Существует множество методов и средств контроля технического состояния. В зависимости от этапа жизненного цикла эти методы можно условно разделить на следующие группы: функциональный контроль технического состояния при работе машины, дефектация деталей и узлов разобранной машины и техническое диагностирование элементов машин без существенной разборки при их эксплуатации (рис. 25).

Выполнение функционального контроля входит в обязанности персонала, обслуживающего машину. Он обязан следить за изменением всех рабочих параметров машины и поддерживать их значения в допустимых пределах путем регулировки рабочих органов или выполнения внеплановых ремонтов. Для этой цели используются штатные приборы контроля (термометры, манометры, индикаторы и др.), в том числе специальные автоматизированные системы контроля и сигнализации. Однако это направление контроля не предназначено для оценки и корректировки объема плановых ремонтов, хотя способно своевременно обнаружить и устранить некоторые неисправности, которые могли бы привести к отказам.

Во время плановых ремонтов осуществляется дефектация, т.е. наиболее глубокий контроль технического состояния деталей и узлов машин с использованием средств микрометрической, оптической, ультразвуковой, электромагнитной, капиллярной и другой дефектоскопии. Дефектация выполняется по мере полной разборки механизма с целью установления деталей, которые требуют восстановления или замены. Такой способ оценки технического состояния изделий так же не оказывает существенного влияния на сроки плановых ремонтов, поскольку трудоемкость обязательных работ по дефектации, разборке, сборке, монтажу и испытаниям машин обычно составляет более 80—90 % общей трудоемкости ремонта машины.

Нормативные сроки и объемы текущих, средних и капитальных ремонтов должны определяться с учетом вероятностной природы повреждений и отказов при заданных допустимых вероятностях не достижения предельного состояния  $\gamma$ . Цель такого подхода состоит в том, чтобы гарантировать безотказную работу любого, даже самого некачественного экземпляра машины, в межремонтный период эксплуатации.

Понятно, что в этих условиях износы деталей конкретных экземпляров многих машин к моменту наступления срока планового ремонта могут быть меньше предельно-допустимых величин и поэтому срок работы до ремонта мог бы быть увеличен без вреда для безопасности эксплуатации. Однако, при обычной организации ТОР допустимое состояние износов можно обнаружить лишь путем дефектации деталей при разборке машины в процессе самого ремонта.

Этим и определяется актуальность проблемы контроля (мониторинга) внутренних элементов машины без ее разборки. Такую задачу призвана решать техническая диагностика — область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. При этом сам процесс определения технического состояния объекта принято обозначать термином техническое диагностирование (или просто — диагностирование), которое сво-

даться к измерениям диагностических параметров изделий с помощью средств диагностирования (контроля). Напомним, что средства диагностирования, это аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль) технического состояния.

Наибольший эффект можно получить при системном подходе к решению данной проблемы. Системой диагностирования (контроля) называется совокупность средств, объектов и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации [11]. Поэтому для организации такой работы необходимы разумные затраты на приобретение средств диагностирования и документации, а также на обучение и повышение квалификации исполнителей.

**Классификация средств.** В зависимости от задач в области применения методов и средств технической диагностики (СТД) их можно классифицировать по разным признакам. Прежде всего, СТД можно подразделить на штатные и специализированные. К штатным средствам относятся инструменты, приборы и системы контроля, которые предусмотрены инструкцией по эксплуатации машины: термометры, манометры, расходомеры, микрометрический мерительный инструмент, индикаторы, амперметры, вольтметры и др.

Штатные СТД в основном предназначены для функциональной диагностики, т.е. для обычного текущего контроля технического состояния. Однако, при наличии методик, разработанных на основании специальных исследований, они могут использоваться и для технической диагностики. Например, о динамике загрязнения топливных фильтров можно судить по изменению перепада давления топлива до и после фильтра. Вопрос об использовании штатных СТД для прогнозирования технического состояния еще не достаточно изучен и его исследование является актуальной тематикой научных исследований. Согласно ГОСТ [11] штатные средства могут быть встроенными или внешними. В первом случае они являются составной частью объекта, а во втором — поставляются отдельно от него.

Универсальные СТД предназначены для измерения определенных физических величин и параметров на любых объектах без учета их особенностей. К таким приборам относятся все известные средства для измерения электрического тока и магнитного поля, температуры, давления и др. В эту группу входят приборы для измерения и спектрального анализа вибрации и шума, средства дефектации и т.п.

Специализированные средства диагностирования (контроля) предназначены для диагностирования (контроля) одного объекта или группы однотипных объектов. К ним относятся СТД, которые периодически используются специалистами диагностических служб для уточнения работ по ремонту, проверки качества ремонта или определения причин выхода из строя СТС.

К таким средствам можно отнести специальную виброизмерительную аппаратуру, приборы для записи крутильных колебаний, пневматические индикаторы для контроля герметичности цилиндров ДВС, уникальные инструменты, средства не разрушающей дефектации и т.п.

Следует отметить, что в разряд специализированных могут переходить универсальные средства, если они используются в качестве штатных приборов, встроенных в СТД для контроля конкретных параметров, например, температуры выхлопных газов с помощью термометров, давления наддува дизеля с помощью манометров, расхода топлива или пара с помощью расходомера и т.д.

Специальные средства создаются для диагностики конкретных элементов машин, например, имеются специальные приборы для контроля состояния только подшипников качения или герметичности цилиндров ДВС. Как правило, специальные средства имеют в своей конструкции универсальные средства (манометры, амперметры и т.д.).

В зависимости от степени автоматизации судна СТС могут оснащаться системами сигнализации и дистанционного наблюдения за диагностическими параметрами.

**Классификация методов.** Комплекс методик и средств для оценки конкретных видов повреждений называется методом технической диагностики. Например, может быть разработан метод оценки зазора между втулкой и поршнем дизеля по уровню ударных импульсов, замеряемых на корпусе машины. Очевидно, в этом случае необходимо указать марку виброизмерительного прибора и всех его элементов (датчик, тип провода и т.д.), точное место установки датчика, режим работы двигателя во время измерений, критерии предельного состояния, порядок измерений и др. Все эти данные будут относиться только к конкретному типу двигателя.

По видам диагностирования методы и средства диагностирования подразделяются на рабочие и тестовые. Рабочее диагностирование — диагностирование, при котором выполняются измерение сигналов, возникающих при работе машины. К таким методам относятся измерения вибрации, шума, температуры и других физических полей.

Тестовое диагностирование — диагностирование, при котором на объект подаются тестовые воздействия, создающие диагностирующие сигналы. Например, о наличии трещин в корпусе, какого-либо устройства можно судить по спектру звука при ударном воздействии.

По принципу действия и назначению датчиков методы и СТД можно условно разделить на следующие группы:

- параметрические методы;
- инструментальные методы;
- методы диагностирования по герметичности замкнутых полостей;
- виброакустические методы;
- электрические и электромагнитные методы;
- теплоизмерительные методы;
- методы оценки износа по содержанию металла в масле;
- методы неразрушающего контроля материалов (дефектации) и др.

Указанный перечень методов не исчерпывает все возможные и вновь разрабатываемые способы измерения физических величин.

**Устройство СТД.** В общем случае любое СТД состоит из следующих элементов (блоков): источник воздействия (при тестовом методе), датчик, каналы



связи, усилитель и преобразователь сигнала, блоки измерения, расшифровки и регистрации (записи) диагностического параметра, блок накопления и обработки информации (рис. 26). При этом у современной диагностической аппаратуры блоки измерения, расшифровки, регистрации, накопления и обработки информации создаются на базе видео — и микропроцессорной техники, совместимой с персональным компьютером.

В простейших случаях перечисленные элементы явно не выражены и совмещены в одном устройстве (например, у ртутного термометра).

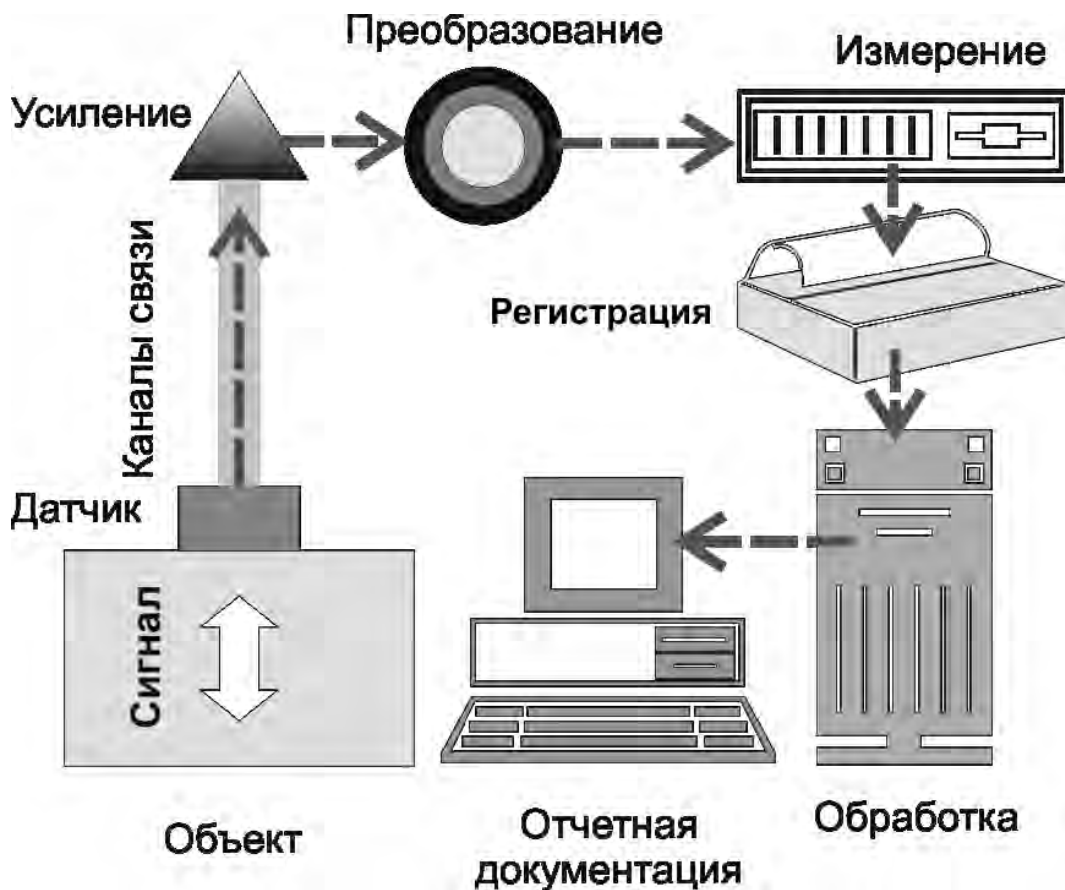


Рисунок 26 Основные блоки средств технической диагностики

В современных измерительных системах могут быть все указанные элементы. Конструкция датчиков зависит от принципа измерения физической величины, например, тепловые поля можно мерить за счет расширения ртути или спирта, деформации биметаллической пластины, изменения цвета специальных химических составов и другими способами. О величине давления газов судят по деформации пьезодатчиков, диафрагм, перемещению столба жидкости в дифманометрах и др. Изменение зазоров можно определять микрометрическими (механическими) приборами, путем измерения индуктивности или емкости электрических датчиков и т.д.

Каналы связи датчиков с измерительными блоками могут быть механическими, электрическими, оптическими, лазерными, электромагнитными (с радиопередатчиками) и другими в зависимости от способа передачи энергии от

датчика. В частности, оптические и электромагнитные каналы связи являются бесконтактными, что имеет большое значение для устранения помех при некоторых методах измерений (например, при тензометрировании).

Многие СТД основаны на измерениях микроперемещений элементов датчиков, которые преобразуются в слабые электрические сигналы. Для их распознавания и предназначены блоки усиления и преобразования сигнала. Для этого используются транзисторные усилители переменного тока и другие устройства. Часто усиление сигнала связано с преобразованием одного вида энергии в другой. Например, в шлейфном осциллографе небольшие угловые перемещения зеркала шлейфа под воздействием электрического сигнала создают увеличенное изображение следа от перемещения светового луча на фотопленке.

Современные приборы для изучения колебательных процессов снабжены АЦП — аналого-цифровыми преобразователями, которые принимают входные аналоговые и генерируют соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки микропроцессорами. АЦП устанавливается на входе в персональный компьютер для преобразования исследуемых физических показателей сначала в электрические, а затем уже с помощью преобразователей напряжение код — в цифровые величины.

#### 3.4.2. Диагностические параметры

В общем случае диагностическим (контролируемым) параметром называют параметр, который используется при его диагностировании (контроле) объекта. Однако для решения практических задач этого толкования не достаточно, ибо эту величину следует не только определять, но и оценивать. Поэтому это понятие в параграфе 3.3.3 было уточнено.

Диагностические параметры могут быть обобщенными и частными. Обобщенные диагностические параметры отражают интегральное влияние изнашивания различных деталей на работоспособность машины. Например, концентрация продуктов износа в масле характеризует суммарный износ всех деталей дизеля, изготовленных из одинакового материала. Частный диагностирующий параметр более точно указывает на степень износа конкретной детали. Например, об износе носового уплотнения дейдвудного подшипника можно судить по увеличению протечек воды через этот узел. Величина диагностического параметра зависит от вида аппаратуры и градуировки его регистрирующего органа. К таким величинам относятся сила тока в А, напряжение тока в В, линейные величины в мм, давление или вакуум в МПа, температура в °С, уровень вибрации в дБ и др.

Как было ранее отмечено, важнейшим критерием оценки технического состояния ТС являются номинальный L0, предельно – допустимый LA и критический LR уровни диагностического параметра. Эти уровни характеризуют поля работоспособности машины, которые можно разбить на три зоны, показанные на рис. 27, который соответствует схеме на рис. 21:

зона уверенной эксплуатации, ограниченная уровнями L0 и LA диагностического параметра;

зона неуверенной эксплуатации, требующая восстановления номинальной величины в удобное время и ограниченная уровнями LA и LR диагностического параметра;

зона недопустимой эксплуатации, требующая прекращения эксплуатации для незамедлительного ремонта (регулировки) и находящаяся выше уровня LR диагностического параметра.

В случае оснащения аппаратуры системами сигнализации они, должны быть настроены на допустимый диагностический параметр LA ("желтый свет"), а при достижении критической величины LR должен загораться красный свет и срабатывать звуковая сигнализация.

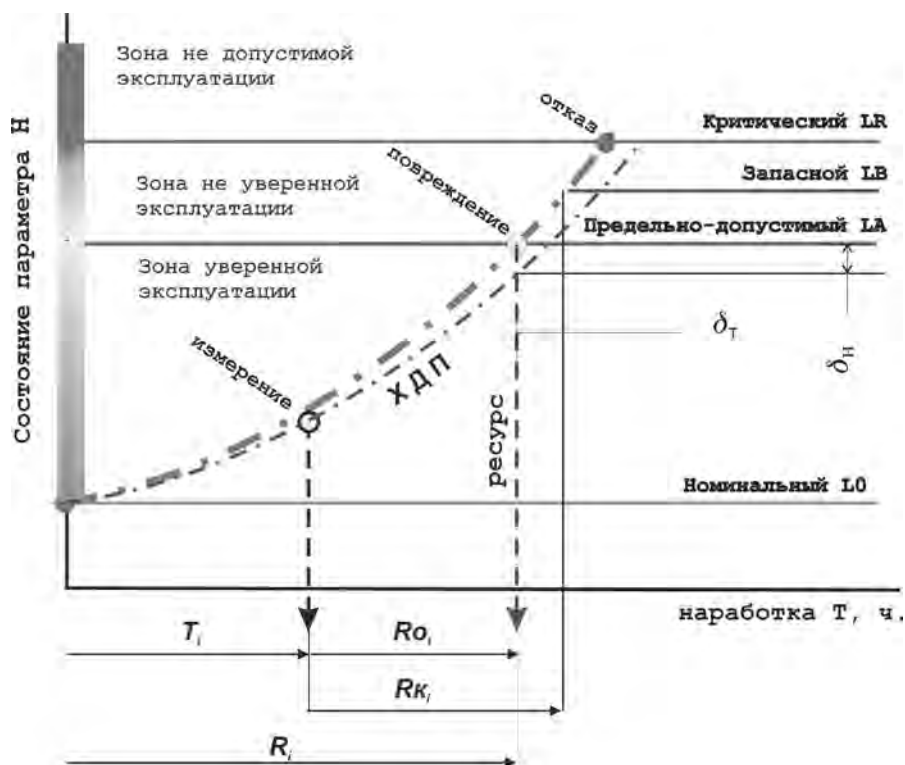


Рисунок 27. Принцип прогнозирования остаточного ресурса

Для корректировки назначенного ресурса, как было показано в разделе 3.3.3, целесообразно установить запасной уровень диагностического параметра LB, который находится между уровнями LA и LR (Рис.27).

Например, система непрерывного контроля вибрации прибором типа VIB-20 (фирма SPM INSTRUMENT, Австрия) настроена по следующим критериям оценки скорости вибрации (мм/с): номинальная  $L0 \leq 1.1$ , предельно - допустимая  $LA = 4.5$  и критическая  $LR = 11$ . В данном случае диагностическим параметром является скорость вибрации от неуравновешенных сил инерции масс машины, которая может возрасти из-за увеличения дисбаланса по мере износа подшипников (рис. 28)

В системе сигнализации имеется два диапазона измерения скорости вибрации — ALERT и ALARM. Уровень ALERT, это диапазон измерения скорости вибрации в диапазоне от  $L0 = 1.1$  до  $LA = 4.5$  мм/с. Эта ступень предусмотрена для контроля медленного повышения уровня вибраций машины, вызванного

износом и незначительными дефектами. По достижении установленного значения (барьера) дается сигнал обслуживающему персоналу. Уровень ALARM служит для защиты от неожиданных опасных повышений уровней вибраций, как например дисбалансы, вызванные повреждениями набора лопаток и промежуточных элементов. Посредством реле включается сигнальное предупредительное устройство и/или производится аварийное отключение. Сигнальный барьер может быть установлен на многократное (от I до 3х-кратного) значение ALERT (например, LB) . Подходящие для каждого типа машин предельные значения определяется по соответствующим международным стандартам.

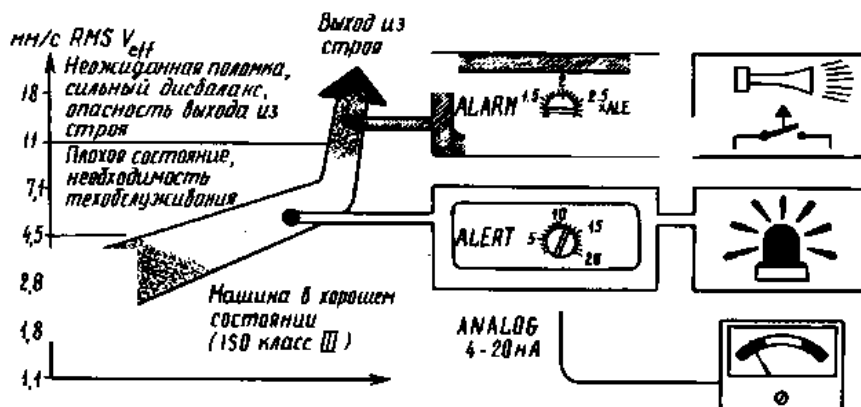


Рисунок 28. Схема сигнализации о достижении уровней диагностирования

К наиболее важной задаче диагностирования относится прогнозирование технического состояния техники. Согласно ГОСТ [11] этим термином обозначается процесс определения технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Поэтому целью прогнозирования может быть либо оценка общего ресурса объекта  $R$ , либо остаточного ресурса  $R_0$ . Далее будут приведены примеры обоснования возможности корректировки нормативных ресурсов с использованием запасного уровня LB.

Как показано на рис. 21, для этого, кроме указанных выше критериев предельного состояния, необходимо располагать характеристикой диагностического параметра, т.е. зависимостью изменения диагностического параметра  $H$  от времени  $T$ . ХДП определяется путем периодического измерения диагностического параметра  $H$  при наработках  $T$  с одновременным построением по этим точкам аппроксимирующей функции  $H(T)$  вида

$$H(T) = f(T) \pm Z \delta_H, \quad (31)$$

где  $f(T)$  – функция математического ожидания ХДП,  $Z$  – квантиль нормального распределения для заданной вероятности  $\gamma$ ,  $\delta_H$  - среднеквадратичное отклонение износа.

Частным случаем применения функции (31) является корреляционное уравнение (29) получаемое с использованием метода наименьших квадратов.

Введение в функцию (31) величины  $\delta_H$  означает, что методика прогнозирования ресурса должна учитывать вероятностную природу ХДП не смотря на то, что коэффициент вариации износостойкости при диагностировании конкретного объекта обычно заметно меньше, чем в случае разработки нормативов по данным большой выборки. Поэтому прогнозируемый ресурс приходится определять по нижней границе его рассеивания. Решение этой задачи показано в разделе 3.3.3 при рассмотрении вероятностной модели типа «Тренд» для двух вариантов аппроксимации ХДП — степенной и линейной. Было рекомендовано отдавать предпочтение линейным моделям, поскольку они имеют более спокойные тренды по сравнению со степенными моделями.

Демонстрация практического применения методов прогнозирования технического состояния дана в разделах 4.2 о поршневых кольцах дизеля, 4.3 о рамовых подшипниках машины и 4.5 о демпфере крутильных колебаний судового валопровода.

Некоторые средства измерения износов машин покажем в следующем разделе.

### 3.4.3. Мониторинг изнашивания цилиндровой втулки дизеля

**Задачи исследования.** Рассмотрим пример контроля процесса изнашивания цилиндровой втулки дизеля 8NVD-48 с целью решения следующих задач:

- Обосновать диагностические параметры, которые характеризуют износ детали и подлежат мониторингу во время эксплуатации.
- Выбрать (в том числе путем поиска в Интернете) или разработать средства и методы измерений этих параметров.
- Обосновать периодичность и технологию таких измерений.
- Разработать методику и программу прогнозирования остаточного ресурса по мере выполнения измерений.

**Исходные данные [57]** . По данным документации этого дизеля, для цилиндровой втулки предельно-допустимый износ составляет 2.1 мм, который не должен быть превышен после отработки назначенного ресурса до среднего ремонта, равного 24 тыс. ч. При этом предельная норма для износа на эллипс составляет 0.6 мм. Поскольку, эти параметры определяются непосредственным измерением линейных значений износа, то они одновременно являются и диагностическими параметрами.

**Выбор средств измерений.** В соответствии с правилами технического обслуживания и ремонта рассматриваемых дизелей износ зеркала цилиндров должен выполняться с помощью индикаторного нутромера НИ по ГОСТ 868-72. Такие нутромеры выпускаются для различных диапазонов диаметра отверстий от 6 до 1000 мм. Например, возможна поставка нутромеров с комплектацией наконечников следующих размеров: 7—10, 10—18, 250—450, 700—1000 мм. Для данного двигателя ( $D = 320$  мм.) выбрана комплектация 250—450 мм. Основные элементы конструкции подобного нутромера показаны на рис. 29.

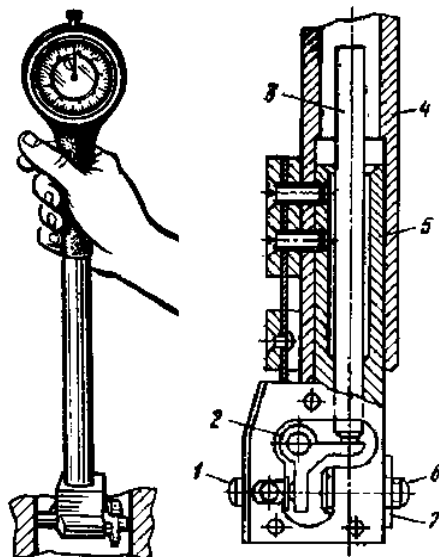


Рисунок 29 Обозначения: 1 — подвижный стержень, 2 — рычаг, 3 — шток, 4 — трубка, 5 — корпус, 6 — неподвижный стержень, 7 — контргайка

Иностранные фирмы создают подобные нутромеры с применением цифровых технологий с возможностью автоматизированного ведения протокола результатов измерений на компьютере. Путем поиска в Интернете современных мерительных инструментов был выбран нутромер фирмы SYLVAC (рис. 30).

Таблица 12 Характеристики нутромеров серии CBG

Код заказа	Тип	Диапазон измерения, мм	Возможная глубина под заказ, мм	Глубина, мм	Состоит из
956.2001	CBG 12.5-22	12.5—22	75,300	150	7ШТ + 1У
956.2002	CBG 22-50	22—50	75,300,450,600,760,910	150	6ШТ + 2У
956.2003	CBG 50-150	50—150	75,450,600,760,910	250	11ШТ + 1У + 3Ш
956.2004	CBG 150-300	150—300	600,760,910	380	6НШ + 1У
956.2005	CBG 150-600	150—600	600,760,910	380	6НШ + 1У

Обозначения:

ШТ — штырь, НШТ — настраиваемый штырь, У — удлинитель, Ш — шайба.

Максимальный диапазон измерения 1.5 метра под заказ. Максимальная глубина 3 м под заказ Максимальная ошибка — 5 мкм, Повторяемость — 2 мкм

Техническое описание:

Запатентованная измерительная система SYLVAC,

Измерительный диапазон 12.5 — 600 мм,

Вывод данных RS232,

Отражает фактический или относительный диаметр

Конструкция прибора:

Трехточечное центрирование, двухточечное измерение,

Твердосплавные наконечники,

Термически изолирован для обеспечения стабильности показаний,

Легкий и удобный в обращении,

Возможности: Мин/макс/дельта память, Возможность перед установкой запоминать мин/макс значения или любого другого значения.

Область применения: измерение размеров отверстий, определение погрешности формы и др.

Стандартная комплектация прибора: инструмент, согласно технической спецификации; инструкция по эксплуатации; деревянный пенал.



Рисунок 30 Нутромер серии CBG

**Технология контроля износов втулки цилиндров.** По правилам ремонта судовых дизелей втулки их цилиндров обмеряются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — в плоскости «вращения вала» и в плоскости «оси вала». Обмеры втулок цилиндров производятся только в рабочем положении, т. е. когда втулки установлены в блоке. При этом рекомендуются два варианта измерений.

Первый вариант измерений применяется при среднем ремонте двигателя с полным демонтажем кривошипно-шатунной группы (например, после отработке ресурса 24 тыс. ч.).

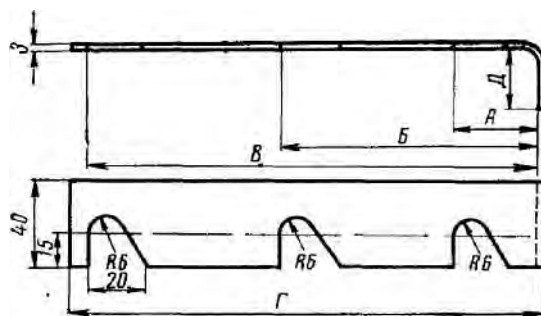


Рисунок 31 Рейка-шаблон.

Таблица 13 Характеристики рейки-шаблона

Марка двигателя	Размеры, мм				
	А	Б	В	Г	Д
<i>NVD-24</i>	47	171	466	490	36
<i>NVD-36</i>	58	243	696	715	20
<i>NVD-48</i>	76	316	916	940	25

Измерения выполняются в трех горизонтах по высоте.

Горизонт 1 соответствует району между первым и вторым верхними кольцами при положении поршня в верхней мертвой точке.

Горизонт 2 расположен на уровне оси поршневого пальца при положении поршня в верхней мертвой точке.

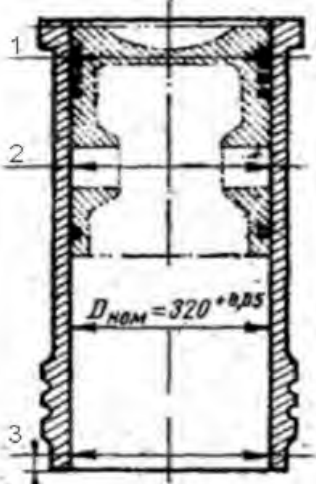
Горизонт 3 расположен на 15 мм выше нижней кромки втулки.

Обмеры втулок цилиндров производятся с обязательным использованием рейки-шаблона, позволяющей выполнять обмеры всегда в одних и тех же местах. Эскиз рейки-шаблона с указанием размеров по табл. 13 применительно к двигателям типа *NVD-48*, *NVD-36* и *NVD-24* приведен на рис. 31. Рейки-шаблоны изготавливаются ремонтными предприятиями для каждой марки ремонтируемых двигателей и используются ОТК этих предприятий и машинными командами. Хранятся рейки-шаблоны на судне и в ОТК ремонтного предприятия. Результаты измерений по горизонтам оформляются в стандартных картах обмеров по инструкции фирмы—изготовителя дизеля (табл. 14). При этом для каждого измерения должны рассчитываться следующие параметры по вращению и по оси вала (мм): максимальный износ по диаметру и максимальная эллиптичность. На основании сравнения результатов измерений с допускаемыми износами в карте делается запись о допуске цилиндрических втулок в эксплуатацию.

Второй вариант измерений предлагается применить для прогнозирования технического состояния втулок при выполнении ТО (например, через 6000 ч) при снятых крышках цилиндров, но при нахождении в цилиндре поршне. В этом случае поршень устанавливается в нижней мертвой точке, а измерения выполняются только в горизонте 1, где наблюдаются максимальные износы. Для этого применяется укороченная рейка-шаблон.



Таблица 14 Карта измерений износов цилиндровой втулки судового дизеля

Двигатель 8NVD48 	Карта 1			Судно «Красные зори»						Втулка	
	№ цилиндра	Номинальный диаметр, мм	Наработка, ч	Диаметр цилиндра, мм						Максимальный износ, мм	
				Горизонт 1		Горизонт 2		Горизонт 3		Диаметр	Эллипс
				По вращению	По оси	По вращению	По оси	По вращению	По оси		
1	320.01	7200	320.70	320.65	320.24	320.23	320.05	320.03	0.69	0.05	
2	320.00	7200	320.72	320.66	320.25	320.24	326.06	320.04	0.72	0.06	
3	320.02	7200	321.68	320.64	320.22	320.21	320.06	320.03	0.66	0.04	
4	320.02	7200	321.01	320.89	320.45	320.43	320.08	320.05	0.99	0.12	
5	320.02	7200	321.02	320.93	320.43	320.41	320.07	320.05	1.00	0.09	
6	320.01	7200	320.85	320.80	320.28	320.25	320.06	320.04	0.84	0.05	

Примечания.  
 Порядок № цилиндров: со стороны основного отбора мощности,  
 Втулки фирменные № 1...6  
 Мерительный инструмент: нутромер индикаторный.  
 Температура в помещении при обмере: 16° С.  
 Нормы предельных взносов: на диаметр 2.1 мм; эллиптичность 0.60 мм.  
 Заключение, по результатам обмеров: втулки допускаются к дальнейшей эксплуатации.

Результаты таких измерений рекомендуется оформлять в картах обмеров по форме табл. 15. Карта заполняется для каждой втулки в отдельности по мере выполнения каждого  $i$  — го измерения с регистрации даты, фактической наработки  $T_i$  и результатов измерений диаметра втулки в плоскостях по вращению  $D1_i$  и по оси  $D2_i$  коленчатого вала. Эти данные предназначены для расчета максимального износа  $H_i$  и эллиптичности  $E_i$  для каждого  $i$  — го измерения по формулам

$$\begin{aligned} H_i &= D1_i - D_0, \\ E_i &= D1_i - D2_i. \end{aligned} \quad (32)$$

где  $D_0$  — номинальный (построечный) диаметр втулки, мм.

Полученные данные используются для решения вопроса о допуске втулки к дальнейшей эксплуатации.

Методика расчета остаточного ресурса здесь не приводится, поскольку она подробно изложена в некоторых примерах главы 4.

Таблица 15 Результаты измерений износа цилиндровой втулки

Судно «Красные зори»				Карта замеров износов в горизонте 1			
Двигатель 8NVD48				Втулка цилиндров № 1			
$tk = 6000$ ч				$Rd = 24000$ ч			
$D_0 = 320.01$ мм		$Hd = 2.1$ мм		$Ed = 0.6$ мм			
$i$	Дата	Наработка, ч	$D1_i$ , мм	$D2_i$ , мм	$H_i$ мм	$E_i$ мм	Заключение
1	01.07.2007	0	320.01	320.01	0	0	Допускается
2	12.07.2008	7200	320.70	320.65	0.69	0.05	Допускается
3	12.09.2009	10000	321.01	320.95	1.00	0.06	Допускается
4	24.08.2010	18000	321.20	321.12	1.19	0.08	Допускается
5	02.09.2011	25000	321.50	321.40	1.49	0.10	Допускается
6	02.06.2012	31000	321.80	321.75	1.79	0.05	Ремонт

#### 3.4.4. Стандартная методика измерений зазора рамовых подшипников дизеля

Рамовые или коренные подшипники предназначены для создания заданного положения коленчатого вала при образовании и передачи крутящего момента с минимальными потерями на трение. Они состоят из стальных вкладышей, залитых белым металлом, и чугунных крышек (рис. 32).

Разъемные стальные или чугунные вкладыши рассматриваемых подшипников имеют заливку из антифрикционного сплава. Они состоят из двух полуцилиндров, что позволяет демонтировать их без съема коленчатого вала.

На внутренней поверхности верхнего вкладыша имеется кольцевая канавка, по которой подводится масло к холодильникам вкладышей и отверстиям в шейках коленчатого вала. В кольцевую канавку верхнего вкладыша масло подводится через сквозное отверстие в верхней части вкладыша. В это же отверстие вкладыша и в отверстие в крышке подшипника вставляется втулка, которая предотвращает проворачивание вкладышей. Крышки подшипников крепятся шпильками, ввернутыми в приливы в перегородках фундаментной рамы.

Для заливки вкладышей могут быть использованы баббиты, сплавы на медной основе, а также сплавы алюминия, кадмия, серебра с различными покрытиями. Лучшими баббитами, обладающими высокими антифрикционными свойствами, являются Б88 и Б83 на основе олова, которые применены в рассматриваемом двигателе. Коэффициент трения при работе баббита Б83 со смазочным материалом равен 0.005. Однако из-за низкого сопротивления усталости на более форсированных моделях этих дизелей они были заменены на так называемые трехслойные вкладыши для улучшения прирабатываемости и повышения износостойкости.

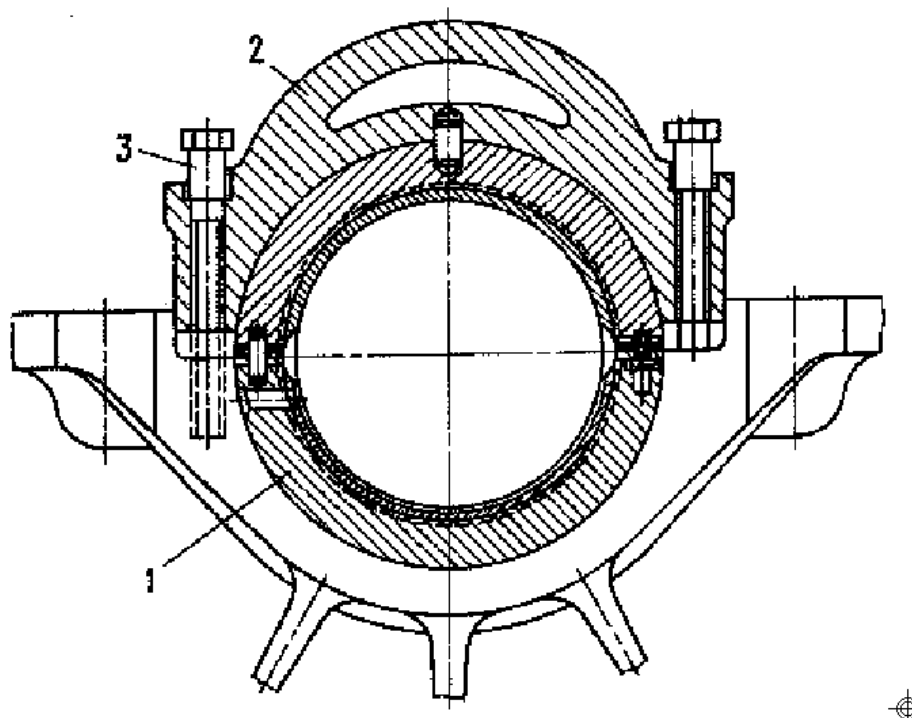


Рисунок 32 Рамовый подшипник

В качестве критериев предельного состояния используются результаты осмотра внешнего вида заливки вкладышей, и оценка достижение предельно – допустимого зазора, который указан в таблице 26.

Зазоры в подшипниках могут замеряться несколькими способами, например: аналитически, путем вычитания из диаметра подшипника диаметра шейки вала, с помощью щупа или помощью свинцовых выжимок и набора шаблонов. Основное внимание будет уделено последнему способу, поскольку он не требует разборки машины и позволяет оценивать зазор с минимальными погрешностями. Этот принцип давно и хорошо известен. В качестве пластического материала применяли свинцовую или медную проволоку, которую укладывали на вал при снятой крышке подшипника. Затем устанавливали крышку и обнимали шпильками под рабочей нагрузкой. После этого смятую проволоку изымают и измеряли ее толщину микрометром или штангенциркулем. Рекомендуется при-

обрести и применить наиболее удобный для данного случая проволочный микрометр (рис. 33).



Рисунок 33 Проволочный микрометр

В последнее время на рынке средств измерений появилось более эффективное средство - измерительные полосы для подшипников скольжения типа PLASTIGAUGE фирмы Saab (рис.34).

История **PLASTIGAUGE** началась на Английской королевской военно-морской верфи в 50-х годах прошлого столетия. По мере ввода в эксплуатацию нового высококачественного оборудования возникла потребность в чрезвычайно точных и воспроизводимых методах измерения зазоров в подшипниках и зазоров между скрытыми поверхностями.

Диапазон измерений зазоров и стоимость упаковок этого средства показано в таблице 16 (на июнь 2015 года).

Сегодня уже очевидно, что **PLASTIGAUGE** выдержал испытание временем и продолжает обеспечивать самые точные и эффективные методы измерения зазоров между пригнанными поверхностями.

PLASTIGAUGE представляет собой простую, но точную возможность измерения зазоров в подшипниках и величин зазоров. Применяется, например, у подшипников коленчатых валов, шатунов и в тех местах, где шуп-калибр неприменим.









Рисунок 34 Принцип измерения методом выжимки

Измеритель представляет собой тонкую пластичную нить абсолютно круглого сечения, которая раздавливается между вкладышем подшипника и шейкой коленчатого вала. После снятия крышки и вкладыша ширина раздавленной ни-

ти может быть измерена с применением специальной шкалы, нанесенной на упаковку набора. Зазор определяется по ширине раздавленной нити измерителя. Измерительный набор может быть приобретен в представительстве фирмы Saab. При пользовании пластичным измерителем следует действовать, описанным ниже образом.

Таблица 16 Сведения об упаковках измерительных полос

Наименование и диапазон	Наличие	Фото	до 49 шт	50-99 шт	> 100 шт
<u>Plastigauge PL - X</u> 0.018 мм — 0.045 мм	Да		100 руб.	85 руб.	70 руб.
<u>Plastigauge PL - A</u> 0.025 мм — 0.175 мм	Да		100 руб.	85 руб.	70 руб.
<u>Plastigauge PL - B</u> 0.100 мм — 0.250 мм	Да		100 руб.	85 руб.	70 руб.
<u>Plastigauge PL - C</u> 0.175 мм — 0.500 мм	Да		100 руб.	85 руб.	70 руб.
<u>Plastigauge PL - D</u> 0.500 мм — 1.00 мм	Да		240 руб.	220 руб.	200 руб.
<u>Plastigauge PL - E</u> 0.75 мм — 1.75 мм	Да		245 руб.	225 руб.	205 руб.

После удаления масляной ванны крышка подшипника удаляется, поверхности вала и вкладыша подшипника очищаются. Теперь накладывается подходящая полоса KS PLASTIC GAUGE поперёк к рабочей поверхности вала. Для того, чтобы измерительная полоса оставалась в нужном положении, она может фиксироваться небольшим количеством жировой смазки на валу. Поверхность подшипника перед монтажом при необходимости смочить силиконовым спреем, во избежание приклеивания измерительной полосы. Крышка подшипника теперь устанавливается и затягивается предписанным изготовителем крутящим моментом затяжки. Затем крышку подшипника надо вновь удалить и наложить приложенную измерительную шкалу на широко прижатую полосу KS PLASTIC GAUGE. Зазор в подшипнике можно теперь прочесть на измерительной шкале. Перед сборкой подшипника полоса KS PLASTIC GAUGE должна быть полностью удалена.

Результаты измерений зазора подшипников, также, как и измерений износов других узлов трения машин при их ТОР, должны регистрироваться в соответствующих картах дефектации в соответствии с правилами эксплуатации, как это будет показано в разделе 4.2.2. (рис. 71). Эти данные являются первичным источником информации для образования выборок износов и расчета показателей долговечности.

### 3.5. Развитие метода искусственных баз для измерения износов

**Введение.** Важнейшим фактором технического обслуживания при эксплуатации машин является контроль изнашивания их основных узлов и деталей, таких, например, как подшипники скольжения. Среди других способов изучения этого деградационного процесса особое место занимает метод искусственных баз (МИБ), предложенный в пятидесятых годах прошлого века Хрущевым М.М. и Берковичем Е.С. [55].

Описание сущности и практического применения МИБ дано во многих источниках, включая ГОСТы и другие документы по стандартизации [20,50,12]. Поэтому может возникнуть вопрос о причинах и целесообразности написания еще одной статьи, посвященной хорошо известному методу. Ответ на этот вопрос связан с появлением на рынке микроскопических устройств оригинальных цифровых микроскопов, которые отличаются малыми размерами и массой, возможностью фотографирования и точного измерения увеличенных (до 300 крат) изображений непосредственно на мониторе ноутбука при низкой стоимости прибора (от 2000 до 5500 руб.). Описание конкретной модели этого прибора “BIGMICROPROF” будет дано ниже. В сочетании с оригинальными способами создания искусственных баз, такой микроскоп позволяет расширить область применения МИБ в полевых условиях (например, на судне) за счет оперативного контроля износа узлов машины.

Рассмотрим преимущества предлагаемого варианта МИБ по сравнению с другими известными методами.

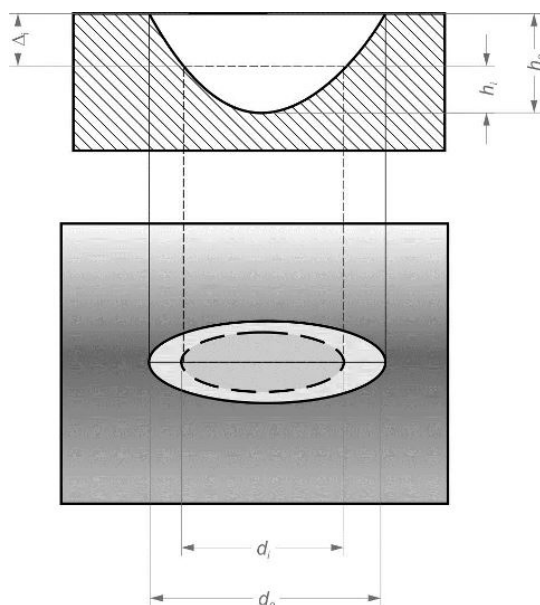


Рисунок 35 Схема для описания сущности МИБ

Но сначала напомним, что МИБ заключается в нанесении на поверхность трения углубления правильной формы по оси, расположенной по нормали к трущейся поверхности (рис. 35). Это углубление будем во всех случаях назы-

вать лункой, а ее глубину - базой  $h$ . Базы  $h$  рассчитывается по видимому на поверхности трения геометрическому размеру лунки  $d$  с учетом фактора  $K$  с помощью функции  $H(K, d)$ , зависящей от способа образования лунки. Размер  $d$  обозначим термином «входной параметр».

Оригинальность идеи МИБ состоит в том, по мере изнашивания детали при каждом  $i$ -м измерении после наработки  $t_i$  (между датами  $T_0$  и  $T_i$ ) входной параметр  $d_i$  и база  $h_i$  будут уменьшаться. Это позволяют оценивать износ поверхности  $\Delta_i$  за время  $t_i$  по формулам (33) и (34), как это показано на рис. 35.

$$\Delta_i = h_0 - h_i = H(K, d_0) - H(K, d_i), \quad (33)$$

$$t_i = T_i - T_0. \quad (34)$$

где  $d_0$  - входной параметр в начале испытаний в момент  $T_0$ .

Для обоснования предлагаемого варианта оперативного МИБ в полевых условиях сначала рассмотрим способы образования лунок, включая вид соответствующих функций  $H(K, d)$  и характеристики микроскопов для измерения входного параметра.

Затем более подробно изложим результаты исследований возможностей цифрового микроскопа “BIGMICROPROF” и технологии испытаний с целью повышения точности измерений. В заключении будут приведены программы для оценки базы  $h_i$  и износа  $\Delta_i$  по результатам измерений входного параметра.

**Способы образования и расчета параметров лунок.** Известны разнообразные способы образования лунок: вдавливанием или путем удара индентора в виде шара, пирамиды или конуса, путем вырезания вращающимся резцом, высверливанием специально заточенным резцом, выскабливанием или вышлифовываем лунки диском и другими способами.

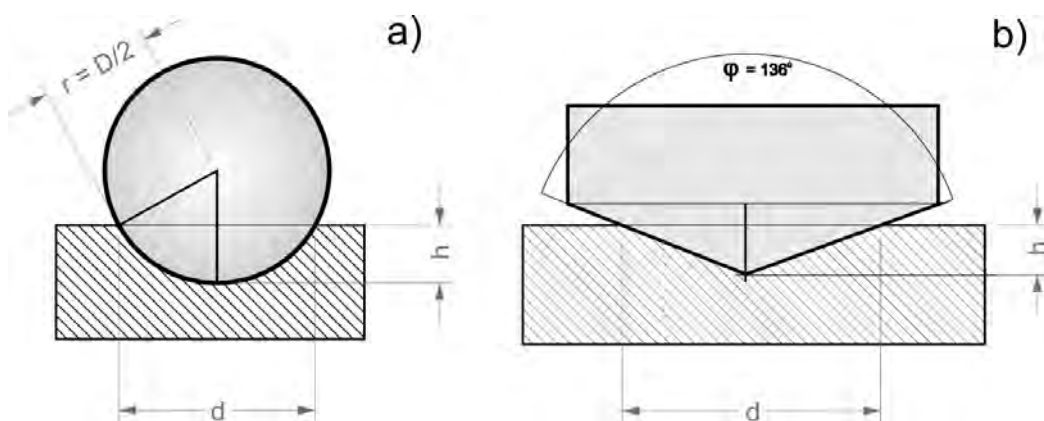


Рисунок 36 Образование лунки с помощью шара (а) при  $D = 10$  мм и алмазной пирамиды (б) при  $\varphi = 136^\circ$

Шаровой отпечаток можно получить путем вдавливания шарика диаметром  $D$  прибором для испытаний на твердость по Бринеллю (твердомер марки ТН600 и др.). Тогда формула (35) для оценки глубины лунки при  $i$ -м измерении будет соответствовать эскизу на рис. 36а и функции  $H(K, d)$  при  $K = D$ .

$$h_i = \left( D - \sqrt{D^2 - d_i^2} \right) / 2 = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d_i}{D} \right)^2} \right) \quad (35)$$

$$h_i = \frac{d_i}{2} \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (36)$$

Второй вариант метода отпечатка показан на рис. 36б. В этом случае образуется лунка пирамидальной формы, который наносят с помощью алмазного инструмента с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями  $\varphi = 136^\circ$ . Здесь используется прибор для определения твердости ПМТ-3 по Виккерсу. Глубина рассчитывается по длине диагонали  $d_i$  и очевидной формуле (36). Для  $K = \varphi = 136^\circ$  получаем

$$h_i = \frac{d_i}{2} \operatorname{ctg} \left( \frac{136^\circ}{2} \right) = 0,202 d_i$$

Твердомер ТН600 (рис. 37а) имеет: габариты 730x230x890 мм, массу 218 кг и стоимость 768620 рублей. У микро – твердомера ПМТ-3 (рис. 37б) такие параметры: габариты 270x290x470 мм, масса – 22 кг и стоимость 290000 рублей. Поскольку эти стационарные приборы имеют большие размеры и массы, то они не пригодны для оперативной работы в полевых условиях.

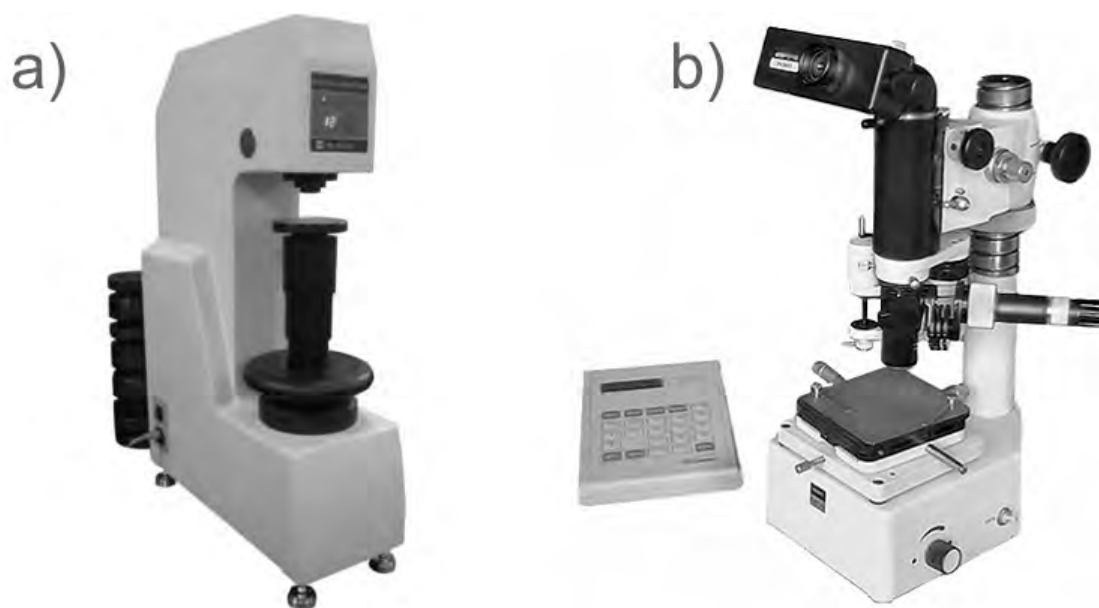


Рисунок 37 Твердомер ТН600 (а) и микротвердомер ПМТ-3 (б)

Для полевых условий с целью создания указанных отпечатков ударным воздействием целесообразно либо приобрести старинный переносной твердомер металлов «ПОЛЬДИ-ХЮТТЕ» стоимостью около 25000 рублей (рис. 38а) [7] или изготовить подобное приспособление (рис. 38б).

Твердомер «ПОЛЬДИ-ХЮТТЕ» имеет размеры 110x25 мм и массу 0.33 кг.



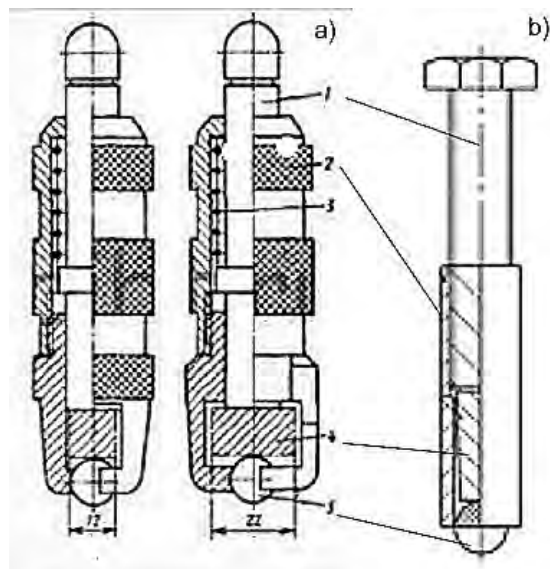


Рисунок 38 Твердомер «ПОЛЬДИ-ХЮТТЕ» (а) и ударное приспособление (б),  
1- боек, 2 - корпус державки, 3- спиральная пружина, 4 - эталонный брусок  
(мера твёрдости) или прокладка, 5. шариковый индентор - стальной шарик

Теперь рассмотрим самый популярный МИБ – метод вырезания лунок (МВЛ), который принято считать наиболее точным методом. Эта процедуры выполняется по ГОСТ 27860-88 прибором УПОИ-6 (рис. 39б), соответствующий ГОСТ 23.301-78. МВЛ также подробно изложен в рекомендациях Р 50-54-36-88 [50] по испытаниям износостойкости материалов из модифицированной древесины.

Основным элементом прибора является устройство с приводом перемещения алмазного резца по радиусу  $r$  относительно оси вращения (рис. 39а). Вторым обязательным условием является наличие микроскопа.

В зависимости от формы поверхности изделий и образцов устанавливается три типа приборов: для плоских поверхностей, для цилиндрических вогнутых поверхностей и для цилиндрических выпуклых поверхностей. Последние в зависимости от расположения лунки относительно образующей цилиндрических поверхностей делятся на две группы: для нанесения лунки перпендикулярно к образующей и для нанесения лунки вдоль образующей.

К прибору по ГОСТ 27860-88 предъявляет следующие требования.

Радиус траектории вершины резца должен быть  $11 \pm 0.1$  мм.

Форма рабочей части трехгранного алмазного резца РАИ-1 имеет угол между осью и гранью  $65^\circ$ , угол между ребрами в плоскости грани –  $115^\circ$  и отклонение вершины алмазной пирамиды от оси оправки – не более 0,2 мм.

Линейное увеличение объектива микроскопа должно быть не менее 3.7.

Линейное поле зрения микроскопа должно быть не менее 3 мм.

Цена деления шкалы окуляра микроскопа должна быть 0,03 мм.

Можно отметить два явных преимущества МВЛ по сравнению с методом вдавливания индентора. Во-первых, удастся избежать выпучивания краев отпечатка лунки и выполнения их зачистки, а во-вторых удлинённая форма лунки с

острыми окончаниями позволяет более точно измерять входной параметр лунки  $d$ , равный ее длине  $l$  (рис. 39а). Это значит, что  $d_i = l_i$ .

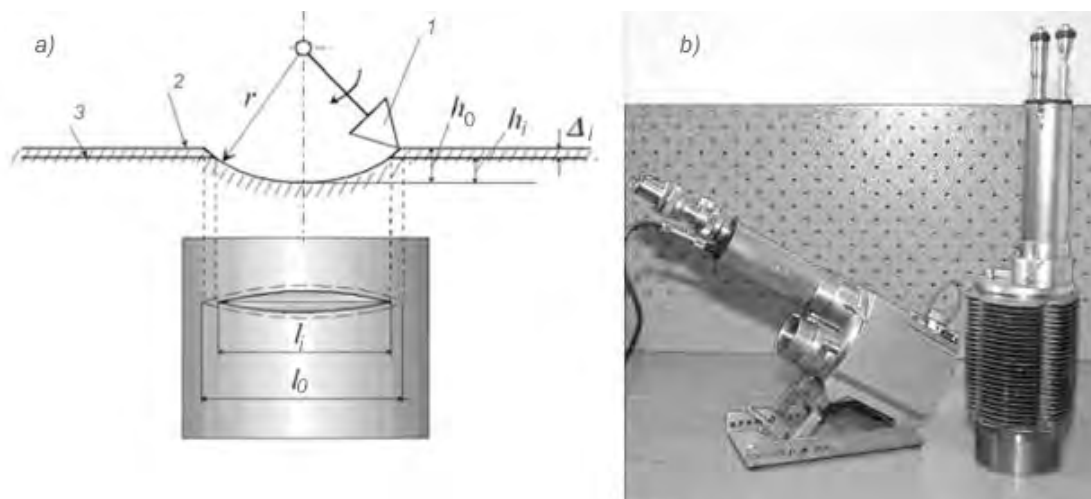


Рисунок 39 а) Схема нарезания лунок на поверхности трения и износа  $\Delta l_i$  по уменьшению длины лунки от значения  $l_0$  до значения  $l_i$ . Обозначения: 1 – алмазный резец, 2 – исходная поверхность, 3 – изношенная поверхность; б) Общий вид прибора УПОИ-6 в процессе измерения лунок

Вместе с тем это более трудоемкий и дорогой МИБ, что следует из дальнейшего описания устройства прибора, строгих требований к его изготовлению и способу нарезания лунки.

Вырезание лунки производят по схеме на рис 39а. Для этого трехгранный алмазный резец 1, вращающийся вокруг оси по радиусу  $r$ , периодически подводят к поверхности трения 2 детали (образца) при подаче 0.002—0.003 мм/об, наблюдая процесс вырезания с помощью микроскопа прибора. В результате прохода резца должна образоваться лунка, имеющая длину  $l$ . При достижении заданной длины лунки (рекомендуется от 1.5 до 4 мм) производят доводку ее поверхности вращением резца в ту и другую сторону без подачи. Допускается проводить окончательную доводку лунки путем приработки сопряженных поверхностей трения, после доводки длину лунки измеряют с погрешностью не более 0.5 деления шкалы окуляра, а результат заносят в протокол.

Глубину лунки  $h$  плоских поверхностей, а также цилиндрических поверхностей при расположении лунки вдоль образующей цилиндра, вычисляют по формуле (37), которая соответствует функции  $H(K, d)$  при  $r = K$  и  $l = d$ .

$$h_i = \frac{l_i^2}{8r} \quad (37)$$

Можно легко доказать, что результаты расчёта по формуле (37) при малых значениях отношения  $l_i/2r$  должны совпасть с исходной формулой (35) для круглой проекции шара. Для этого достаточно применить метод разложения выражения (3) в ряд Тейлора (Маклорена) по программе (38) редактора MATHCAD с учетом того, что  $r = D/2$  и  $l = d$ .

$$h_i = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d_i}{D} \right)^2} \right) = r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{l_i}{2r} \right)^2} \right) \text{ series } l_i, 4 \Rightarrow \frac{l_i^2}{8r} \quad (38)$$

При измерении по вогнутой или выпуклой окружности цилиндра радиусом  $R$  мм формула для базы принимает следующий вид (знак минус или плюс соответственно)

$$h_i = \frac{l_i^2}{8} \left( \frac{1}{r} \mp \frac{1}{R} \right) \quad (39)$$

После каждого  $i$  – го измерения длины лунки  $l_i$  при наработке  $t_i$ , следует рассчитывать износ детали (образца)  $\Delta_i$  по формуле (33), который также заносится в протокол.

Кроме рассмотренных способов для образования лунки можно применить методы высверливания и выскабливания. Еще можно использовать метод слепков. Эти методы будут показаны далее при изучении цифрового микроскопа “BIGMICROPROF”.

**Средства измерения лунок.** Измерение размеров лунок на плоских, сферических и цилиндрических поверхностях рекомендуется производить с помощью отсчетных микроскопов для определения твердости. Для сравнения рассмотрим характеристики двух таких микроскопов.

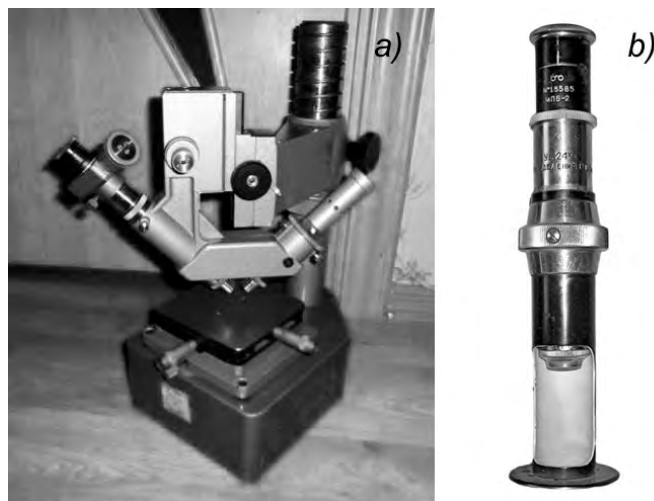


Рисунок 40 Двойной микроскоп МИС-11 (а) и микроскоп МПБ -2 (b)

Двойной микроскоп МИС-11 (рис. 40а) предназначается для проверки качества обработки наружных поверхностей деталей путем измерения шероховатости по методу академика Б.П. Линника высоты неровностей микропрофиля в пределах 0.8 – 40  $\mu\text{м}$ . Он также рекомендуется для измерения твердости по

Виккерсу, износа методами вырезания лунок и профилографирования. Прибор имеет следующие характеристики:

Общее увеличение прибора с окулярным винтовым микрометром: 80х, 158х, 269х, 517х;

Линейное поле зрения: 1,8; 1,0; 6,0, 3 мм;

Цена деления шкалы барабана окулярного винтового микрометра 0,01 мм;

Пределы перемещения предметного столика в двух взаимно-перпендикулярных направлениях: от 0 до 10 мм;

Цена деления шкал барабанов микрометрических винтов 0.01 мм;

Габаритные размеры 400×270×270 мм;

Вес 20 кг.

Стоимость – более 60000 руб.

Очевидно, что по причине больших размеров и массы — это средство не может быть использовано в полевых условиях.

В большей мере этим условиям соответствует микроскоп отсчетный типа МПБ-2 (рис. 40b), предназначен для измерения отпечатка (лунки), образуемого на поверхности различных металлов при определении твёрдости по методу Бринелля.

Принцип работы микроскопа основан на сравнении изображения отпечатка, получаемого от вдавливания шарика в исследуемый материал под определенной нагрузкой, со шкалой сетки. Подобный микроскоп входит в комплект поставки твердомера «ПОЛЬДИ-ХЮТТЕ». Основные характеристики этих измерительных приборов:

- Максимальный диаметр измеряемого отпечатка 6,5 мм
- Цена деления шкалы, 0.05 мм
- Поле зрения, не менее 8.5 мм
- Увеличение микроскопа, крат 24±5%
- Предел допустимой основной погрешности при измерении:
  - на длине до 2 мм (на любом интервале шкалы), ±0.01мм
  - на всей длине шкалы, ±0.02 мм
- Оцифровка шкалы 1 мм
- Габаритные размеры: высота 202 мм, диаметр 50 мм
- Масса, не более 0.48 кг,
- Стоимость 8000 руб.

В еще большей мере отвечает современным требованиям к оперативным измерениям МИБ в полевых условиях цифровой микроскоп “BIGMICROPROF” (рис. 41). Данный микроскоп оснащен 5.0 MegaPixel камерой, позволяющей получать снимки высокого качества и точно оценивать размеры полученных лунок при увеличении от 20 до 300 крат непосредственно на мониторе ноутбука. Особенности данного микроскопа являются:

- Профессиональный штатив;
- Съёмная веб-камера, которая может использоваться без штатива. Это удобно, когда мы имеем дело с массивными узлами, которые нельзя разобрать или разъединить (рис. 41б);
- Подключение к компьютеру через USB 2.0, аккумулятор не требуется;

- Плавная регулировка яркости освещения (светодиодов);
- Фото и видео съемка объекта, с последующим сохранением на компьютере или съемных носителях;
- Измерение расстояний, площадей, углов и радиусов увеличенных объектов, что необходимо для обработки изображений лунок.

Основные характеристики микроскопа DigMicroProf даны в таблице 17.



Рисунок 41. Микроскоп DIGMICROPROF (a) и веб-камера на объекте (b)

Таблица 17. Технические характеристики микроскопа DigMicroProf.

Датчик изображения	5 MPixel
Увеличение	20x-300x крат
Разрешение фото	2592x1944 JPEG или BMP
Разрешение видео	640x480 AVI
Объектив	Линза высокого качества
Источники света	8 белых светодиодов
Источник питания	5V от USB-порта компьютера
Частота кадров	30 кадров в секунду
Фокусное расстояние	от 10 до 500 мм
Язык ПО	English/Germany/French/Spanish/Русский
Размеры штатив	110x33 мм 175x140x110 мм
Вес	171 грамм
Стоимость	5500 руб.

Таким образом, данный микроскоп не только удовлетворяет условиям измерений в полевых условиях по весогабаритным характеристикам, но еще имеет такие ценные качества как возможность настраивать на резкость, фотогра-

фировать и записывать с высоким разрешением, а также измерять с высокой точностью изображения лунок непосредственно на мониторе ноутбука. Это позволяет снизить вероятность ошибок по причине так называемого человеческого фактора по сравнению с другими микроскопами индивидуального наблюдения через окуляр.

**Методика измерения износов микроскопом DIGMICROPROF.** Для оперативного использования этого прибора в полевых условиях необходимо было решить следующие задачи:

Задача 1. Освоить и описать фирменную методику фотографирования, калибровки и измерений мелких изображений на экране ноутбука.

Задача 2. Выбрать виды лунок и соответствующие инструменты, пригодных для оперативного образования и измерения износов лунок с приемлемой точностью в зависимости от размеров деталей.

Задача 3. Разработать программное обеспечение для оперативной обработки результатов измерений и расчета тренда износов.

Первая задача решается в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора, где описываются следующие процедуры после сборки системы и включения программы.

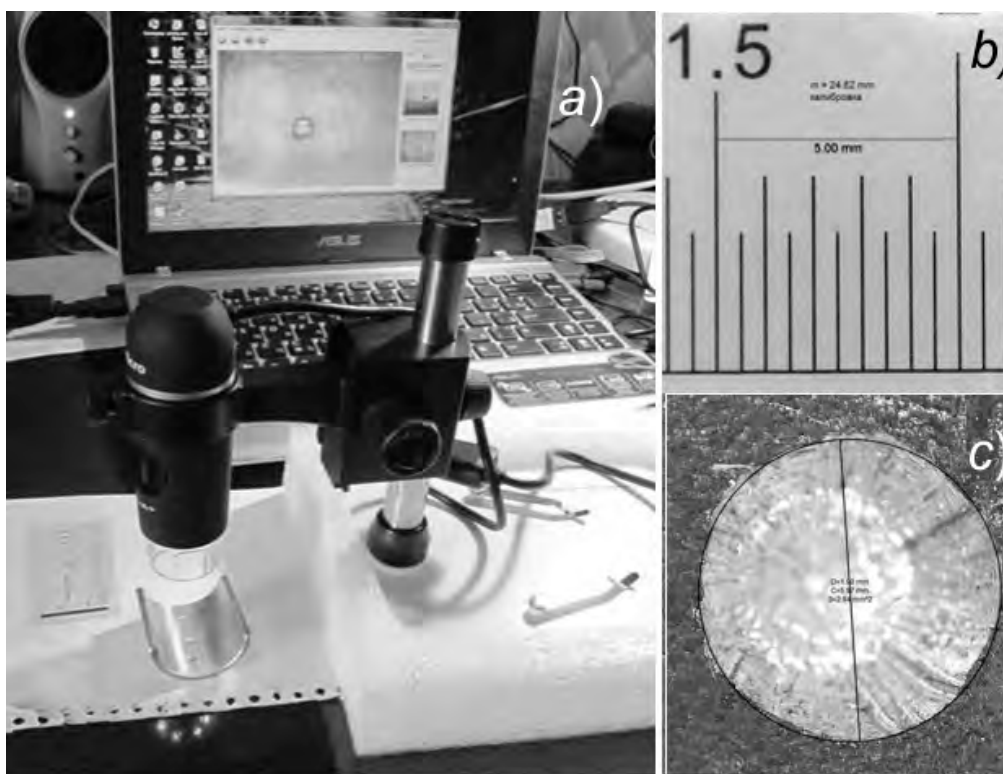


Рисунок 42 Основные операции фотографирования и измерения мелких изображений; установка прибора и подключение к ноутбуку (a), калибровка и определение масштаба по мерной сетке (b), измерение диаметра круглого изображения (c)

Сначала устанавливается резкость и фотографируется мерная сетка. Затем путем ее калибровки устанавливается масштаб записи (рис. 42b). Далее фото-

графируется резкое изображение объекта (рис. 42а) без изменения фокусного расстояния и определяются его размеры (рис. 42с).

Важно отметить, что программа прибора позволяет измерять линейные размеры, радиусы и диаметры круглых фигур и даже углы острых фигур. Особую ценность для круглых лунок имеет определение их диаметра (рис. 42с) и даже длины и площади окружности отпечатка. Благодаря направленному излучению светодиодов изображение лунки получается достаточно резким и четким, что позволяет обеспечить приемлемую точность измерений.

Принципиальное значение для оперативной оценки износов имеет способ образования лунок на объекте, хотя данный микроскоп вполне пригоден для любого из рассмотренных выше способов получения входного параметра, включая МВЛ.

С целью обоснования МИБ применительно к полевым условиям потребовалась провести специальные испытания на достоверность следующих способов образования лунок.

Способ 1. Ударным вдавливанием шарика диаметром  $D$  мм по рис. 36а с помощью приспособления на рис. 38б и 43а. Расчет базы  $h_i$  и износа  $\Delta_l$  выполнялся по формуле (35) и (33).

Способ 2. Высверливания круглой лунки сверлом 4 мм по металлу с углом режущих кромок  $118^\circ$  (рис. 43б). Расчет базы выполнялся для этого угла по формуле (36). Тогда  $h_i = 0.3 d_i$ .

Способ 3. Выскабливание лунки сверлом 10 мм для керамики (см. рис. 43с). Функция  $H(K, d)$  была получена путем корреляционного анализа координат профиля пера, замеренным при увеличении с помощью того же самого микроскопа. Для одного из вариантов резца была получена с высоким коэффициентом корреляции 0.997 такая формула

$$h_i = 0.491 d_i^{1.083} \approx 0.52 d \quad (40)$$

Способы 4 и 5 были специально разработаны для лунок, образованных с помощью аккумуляторной дрели или мини-дрели для гравировки с гибким валом (рис. 44а и 44б). Способ 4 заключается в вырезании насадкой с шаровым сверлом или шарошкой (рис. 44б) круглой лунки (подобной отпечатку шарика). Следовательно, и в этом случае для оценки износа применяются формулы (35) и (33). Способ 5 позволяет получить углубления в виде надреза радиусом сегмента 12 мм или 16 мм с помощью отрезного диском диаметром 24 мм или 32 мм (рис. 44с). Полученная таким путем лунка имеет удлиненную форму, подобную лунке типа МВЛ по ГОСТ 27860-88 [20]. Поэтому расчет базы и износа выполняется по формулам (37) и (33).

Кроме того, были испытаны и другие инструменты для нарезания лунок, такие как шарошки и фрезы по металлу с фигурным верхом (рис. 45). Изучались различные способы их использования в качестве ударных инденторов, включая автоматические керны с конусом  $100 - 120^\circ$ .

При рассмотрении рис. 43, целесообразно обратить внимание на явно доброкачественное изображение круглых лунок для всех способов их образования.

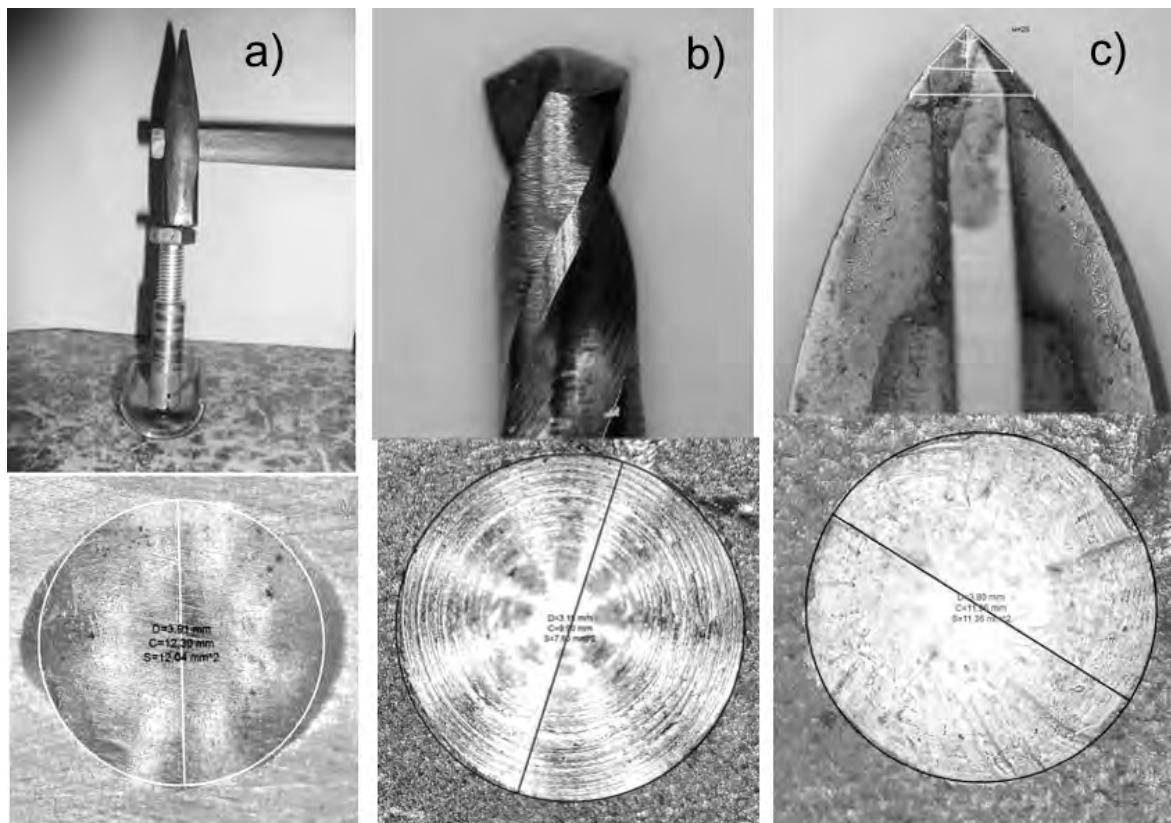


Рисунок 43 Способы образования и вид лунок, образованных: а – ударным вдавливанием шарика, б - высверливанием сверлом при  $\varphi = 118^\circ$  и с – выскабливанием сверлом для керамики.

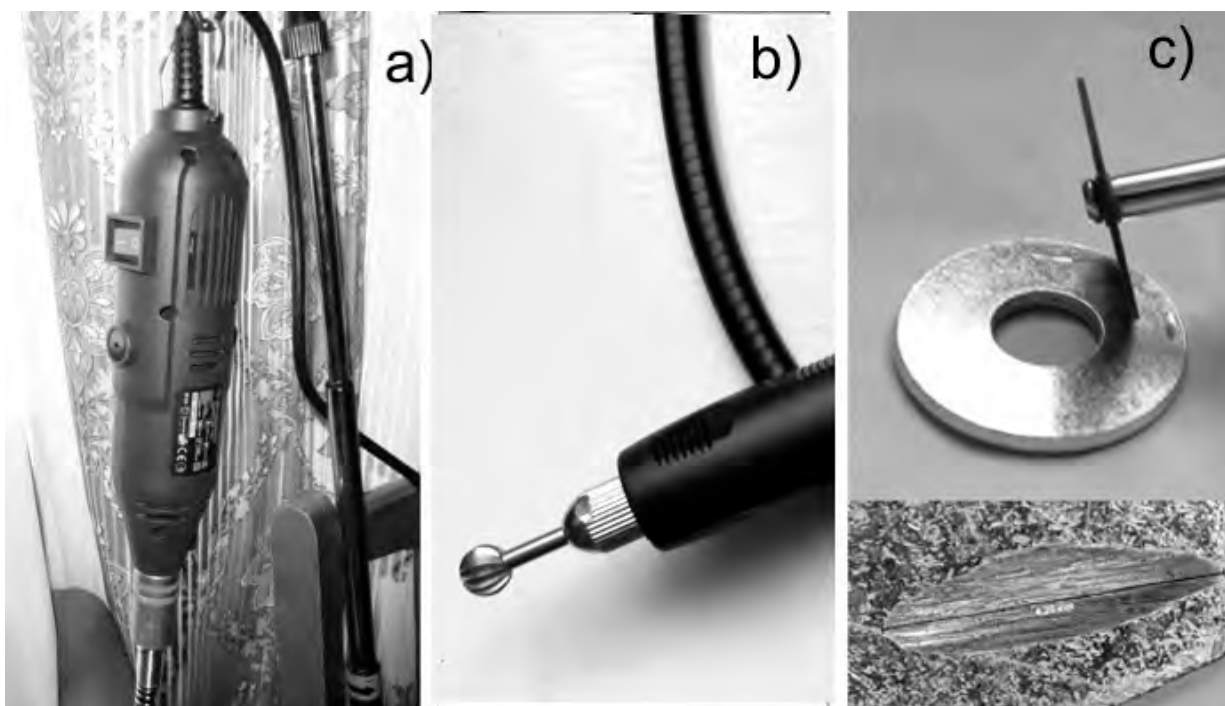


Рисунок 44. Применение мини-дрели (а) с гибким валом и шарообразным резцом (б) для образования различных лунок, включая вырезание диском удлиненных надрезов (с)





Рисунок 45 Инструменты для создания лунок. Шарошки: 1 – с вершиной  $100^\circ$ , 2 – с вершиной  $118^\circ$ , 3 – шарообразная 6 мм. Фрезы: 4 – шарообразная 8 мм, 5 – конус  $60^\circ$ . Для мини-дрели: 6 - шарообразная фреза 7.8 мм, 7 - отрезной диск 32 мм, 8 - отрезной диск 24 мм. 9 – автоматический керн с конусом  $90^\circ$

Это потребовало изучения различных технологических приемов этой работы. В частности, удалось определить, что для получения доброкачественных круглых лунок путём их сверления необходимо соблюдать строго вертикальное движение сверла путем использования специального направляющего приспособления для дрели (рис. 53.3). Для предотвращения соскальзывания режущего инструмента (включая шаровые резцы и фрезы) рекомендуется использовать автоматический керн (самострел), который сам является отличным индентором с конусом  $90^\circ$  (рис. 45.9) для мягких материалов.

Для случая неудобного расположения лунок предлагается метод отпечатков с помощью пластилина (рис. 46). Исследования показали, что такой прием позволяет достаточно точно измерить диаметр лунки, но ее глубину лучше оценивать пересчетом по формулам из-за недостаточного заполнения микро полости вязким материалом (пластилином).

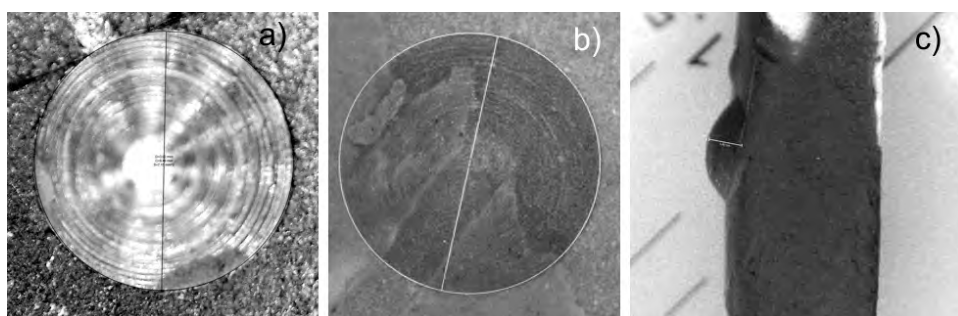


Рисунок 46 Метод отпечатка. а) – лунка, б) – отпечаток сверху, с) – отпечаток сбоку

Выбор способа образования лунок зависит от ряда факторов. Прежде всего, нельзя допускать ослабление прочности исследуемых деталей. Так, недопу-

стимо делать на шейках коленчатого вала надрезы методом МВЛ или с помощью отрезного диска (Способ 5). Здесь больше подходит способ вдавливания или выскоблывания инструментом шаровой или конусообразной формы, которые не создают концентраций напряжений. При этом следует учитывать соотношение твердости инструмента и поверхности трения. Например, износы баббитовых подшипников, твердость которых составляет 27 – 30 ед. по Бринеллю, можно оценивать не только ударными способами вдавливания, но и путем фрезерования мини – дрелью с гибким валом (рис. 44b).

Таблица 18 Зависимость глубины лунки от входного параметра  $d$

№	Инструмент	Глубина ячейки при параметре $d$ мм				
		1	2	3	4	5
	Шар $D=10$ мм	0.0251	0.101	0.2303	0.4174	0.6699
	Фреза $D=7.8 - 8$ мм	0.0322	0.1304	0.3	0.5519	0.9067
	Шарошка 6 мм	0.042	0.1716	0.4019	0.7639	1.3417
	Диск $r=12$ мм	0.0104	0.0417	0.0941	0.1678	0.2633
	Диск $r=16$ мм	0.0078	0.0313	0.0705	0.1255	0.1965
	Сверло при $\varphi=118^\circ$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
	Шарошка $\varphi=118^\circ$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
	Керн $\varphi=90^\circ$	0.4195	0.8391	1.2586	1.6782	2.0977
	Перо 10 мм	0.5	1	1.5	2	2.5
	Фреза $\varphi=60^\circ$	0.866	1.7321	2.5981	3.4641	4.3301

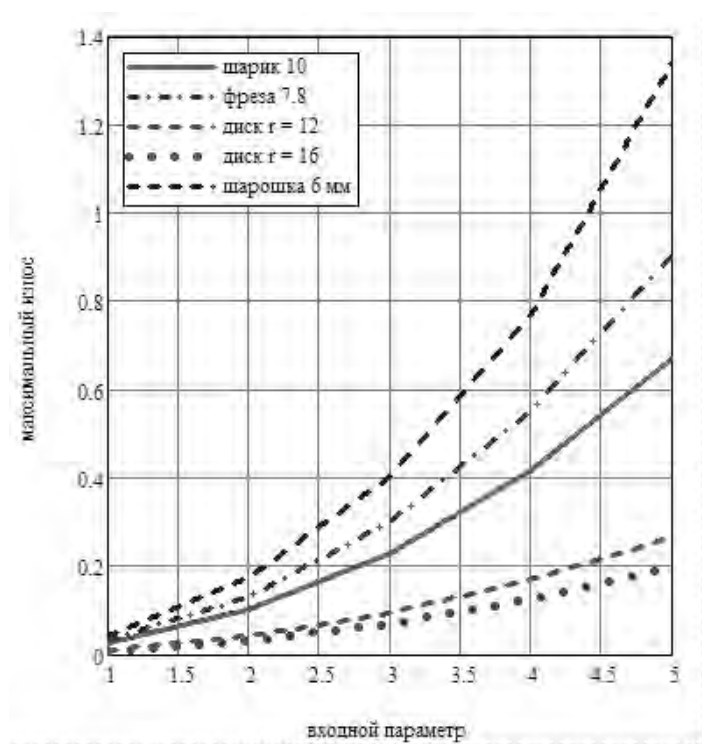


Рисунок 47 Графики глубины лунки, вырезанной инструментом с разными диаметрами

Решающим фактором для выбора инструментов для образования лунок является учет диапазона исследуемых износов поверхности  $h$  при разумном размере входного параметра  $d = 1 \dots 5$  мм. В таблице 18 и на графике рис. 47 приведены результаты расчета максимального размера ожидаемого износа (глубины лунки) в зависимости от требуемой величины входного параметра  $d$ .

Эти данные показывают, что большие износы от 0.5 до 1.5 – 2.5 мм можно изучать с помощью сверла (мини фрезы) по металлу или резцом (пером) по керамике. Для среднего диапазона глубин от 0.03 до 1.0 мм подходят методы вдавливания шариком или керном, либо выскабливание шарошкой менее 8 мм.

Отметим, что небольшие по размеру износы от 0.01 до 0.2 мм соответствуют вырезанию лунок инструментом (резцом или диском) с радиусом более 11 мм, что также относится и к самому трудоёмкому и дорогому МВЛ по ГОСТ 27860-88 и Р50-54-36-88 (при радиусах вырезания 11 и 12.5 мм). Поэтому к выбору средств вырезания лунок надо относиться очень осторожно.

Завершая сведения о способах образования лунок, целесообразной рассмотреть ряд вопросов о точности и достоверности измерения износов.

Первый вопрос связан с точностью образования первичной лунки, на что обращается особое внимание при МВЛ. В нашей методике этот вопрос решается проще. Размер первичного параметра не так важен и получится произвольно в зависимости от продолжительности и силы воздействия на инструмент для получения (обычно) параметра  $d = 3 - 5$  мм. Здесь нужна определенная сноровка и тренировка, но сама по себе величина  $d$  может быть любой, поскольку износ будет определяться как разность глубин первичной и последующих лунок после каждого  $i$ -го замера износа.

Второй вопрос относится к некоторому предубеждению относительно применения предлагаемых микроскопов в качестве равноправного измерительного инструмента. На этот принципиальный для автора вопрос можно высказать следующие соображения.

Известно, что во многих областях исследований на снижение качества измерений решающее значение имеет человеческий фактор. В нашей работе [35] приводятся результаты анализа этого фактора при измерениях по нониусу штангенциркуля. При выполнении одних и тех же замеров одного и того же эталона, одним и тем же инструментом, но разными людьми (студентами кафедры) были получены разные результаты расчета при недопустимо низком запасе метрологической надежности и соответствующей ему вероятности не достижения предела погрешности. Причина ошибочности в измерениях кроется в известной субъективности прочтения точных результатов по нониусу, разной силой сближения губок, неопытностью их установки к поверхности эталона и др. субъективных факторов. После того как студенты прошли обучение и повторили измерения были получены более высокие результаты проверки их умения применять инструменты.

При использовании оптических приборов наблюдаются схожие проблемы с погрешностью в процессе настройки резкости изображений относительно мерительной сетки и нониуса для перемещения органов микроскопа. В этом отношении традиционные оптические и предлагаемые цифровые микроскопы

находятся в одинаковых условиях, поскольку в любом случае качество измерений зависят от опыта и квалификации оператора (роль которого часто выполняют лаборанты, и то и студенты). В этой связи целесообразно напомнить о необходимости выполнения неоднократных повторений одного и того же измерения по причине их вероятностной природы. Можно рекомендовать шести – десяти кратные повторения на этапе освоения методики с оценкой математического ожидания, средней квадратической ошибки (СКО) и нижней границы измеряемой величины. После обучения и присвоения квалификации оператору может разрешить уменьшить число повторов измерений до трех раз с принятием за истину средней и нижней границы диагностического параметра.

**Программное обеспечение.** Для оперативного применения МИБ на рабочий ноутбук необходимо установить не только фирменную программу для микроскопа с веб-камерой, но и специальные программы для оценки глубины лунок  $h$  и износов  $\Delta$  по мере измерения входного параметра  $d$  после заданной наработки  $t$ . В зависимости от цели исследования программы могут предназначаться для наблюдения тренда изнашивания только одной лунки, либо – для решения более сложных задач путем одновременного контроля износа серии лунок. Например, оценка зазора в конкретном подшипнике может потребовать измерения износа верхней и нижней половинки вкладыша. Для изучения эпюры распределения износа по окружности подшипника или цилиндрической втулки лунки наносят в разных местах и направлениях. В многоцилиндровых двигателях износы рекомендуют изучать одновременно во всех однотипных узлах трения и т.д., и т.п. В частности, ГОСТ 27860-88 содержит примеры решения таких задач с построением эпюр расположения износов по местам измерения.

Рассмотрим пример универсальной программы исследования износов подшипника скольжения с помощью предлагаемых средств.

На рис. 48 показаны три начальные операции: ввод постоянных исходных данных, ввод переменных исходных данных и автоматический расчет искомых параметров по универсальным алгоритмам. К постоянным данным относятся параметры, соответствующие общему показателю  $K$ , например, диаметр шарика  $D$ , радиус диска  $r$  или угол  $\varphi$  инструмента (пункт 1). Переменные данные записываются в вектора наработок  $t_i$  и измерений баз  $d_i$  по мере их определения (пункт 2). На фрагменте рассматриваются два вектора – для верхней и нижней части подшипника.

Третий пункт фрагмента содержит универсальный алгоритм расчета глубины лунки  $h_i$ , износа  $\Delta_i$  и зазора  $\Sigma\Delta_i$  подшипников. Он состоит из четырех элементов. Первый элемент – это скрипт для выбора способа образования лунки (нажать нужное название). Вторым элементом является четырехступенчатая программа расчета глубины лунки  $h_i$  для выбранного способа. Затем следуют две простых формулы для износа  $\Delta_i$  и зазора  $\Sigma\Delta_i$ .

Рис. 49 содержит вектора с результатами автоматического расчета указанных выше величин, а также износостойкости по программе (40). В нижней части фрагмента дается сводная таблица результатов расчета и график зависимости износа и зазора от времени.

## ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСОВ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННЫХ БАЗ

Исходные данные для функции  $H(K, d)$      $ORIGIN = 1$   
 $K = D$  или  $K = r$  для окружностей и  $K = \phi$  для углов.  
 $d = d$  во всех случаях

1. Записать постоянные исходные данные  $K$  в зависимости от способа

Диаметр шарика или диска     $D := 10$     тогда     $r := \frac{D}{2}$      $r = 5$   
 или угол резца или шарошки     $\phi := 100 \cdot \text{deg}$     тогда     $0.5 \cdot \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) = 0.42$

2. Вводим переменные исходные данные параметра

номер замера     $mz := 5$      $i := 1..mz$

Наработка    Входной параметр для части подшипника     $j := 1..2$

$t_i :=$	Верхний	Нижний
$d_{i,1} :=$	$d_{i,2} :=$	
0	4.5	3.5
22	3.5	3
48	2.5	2
60	2	1.5
65	1.5	1.2

3. Расчет базы - глубины лунки  $h$  и износов  $\Delta$

а) Установить вариант способа     $BR :=$  Шарик  
Сверло  
Перо     $BR = 1$   
Диск

б) Тогда расчет глубины выполняется автоматически по программе

$$h_{i,j} := \begin{cases} \frac{D}{2} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_{i,j}}{D}\right)^2} \right] & \text{if } BR = 1 \\ \frac{d_{i,j} \cdot \cot\left(\frac{\phi}{2}\right)}{2} & \text{if } BR = 2 \\ 0.491 \cdot (d_{i,j})^{1.083} & \text{if } BR = 3 \\ \frac{(d_{i,j})^2}{8 \cdot r} & \text{otherwise} \end{cases}$$

в) программа для расчета износов

$$\Delta_{i,j} := h_{1,j} - h_{i,j}$$

в) программа для расчета зазора

$$\Sigma \Delta_i := \Delta_{i,1} + \Delta_{i,2}$$

Рисунок 48 Первый фрагмент программы: 1 – ввод постоянных данных, 2 – ввод переменных данных и 3 – универсальная программа расчета глубин, износов и зазора

#### 4. Результаты расчета

$$\Delta oJ_i := \begin{cases} 0 & \text{if } i = 1 \\ \frac{t_i}{\Sigma \Delta_i} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Время

$$t = \begin{pmatrix} 0 \\ 22 \\ 48 \\ 60 \\ 65 \end{pmatrix}$$

Глубина

$$h = \begin{pmatrix} 0.535 & 0.316 \\ 0.316 & 0.23 \\ 0.159 & 0.101 \\ 0.101 & 0.057 \\ 0.057 & 0.036 \end{pmatrix}$$

износ

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0.219 & 0.086 \\ 0.376 & 0.215 \\ 0.434 & 0.26 \\ 0.478 & 0.28 \end{pmatrix}$$

Суммарный

$$\Sigma \Delta = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.305 \\ 0.591 \\ 0.694 \\ 0.758 \end{pmatrix}$$

Суммарная износостойкость

$$\Delta oJ = \begin{pmatrix} 0 \\ 72.237 \\ 81.175 \\ 86.515 \\ 85.706 \end{pmatrix}$$

Сводная таблица зазора (подготовка не показана)



"t"	"d1"	"h1"	"U1"	"d2"	"h2"	"U2"	"zr"	"zc"
0	4.5	0.535	0	3.5	0.316	0	0	0
22	3.5	0.316	0.219	3	0.23	0.086	0.305	72.237
48	2.5	0.159	0.376	2	0.101	0.215	0.591	81.175
60	2	0.101	0.434	1.5	0.057	0.26	0.694	86.515
65	1.5	0.057	0.478	1.2	0.036	0.28	0.758	85.706

ITG =

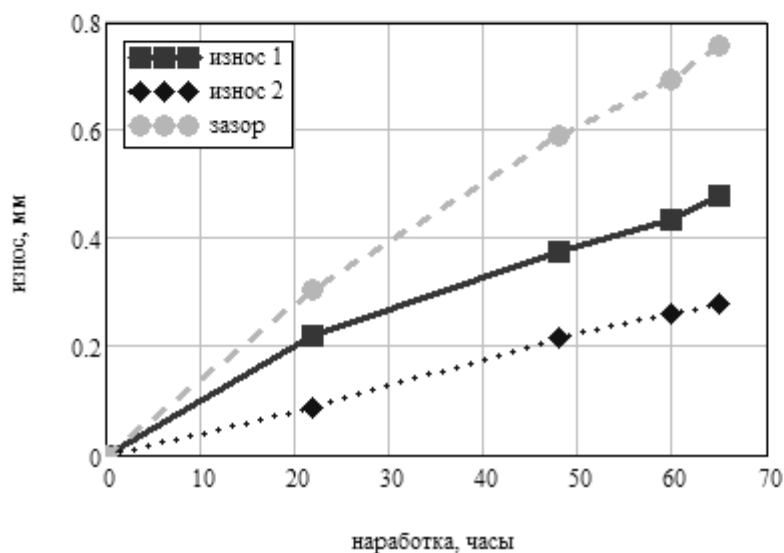


Рисунок 49. Второй фрагмент программы: результаты расчета искомых параметров

5. Оценка ресурса для предельного увеличения зазора

$$Z\Delta_d := 1.5$$

$$Aa := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Квантиль (1 или 2)  $Z := 0.84$   $\gamma := \text{snorm}(Z)$   $\gamma = 0.8$

$$ttt := 0..200$$



Б. Верная модель (для закона Гауса)

$$Z = 0.84$$

скопировать, удалить первую строку и присвоить другое имя  $\Delta t$

Износостойкость  $\Delta oJ = \begin{pmatrix} 0 \\ 72.237 \\ 81.175 \\ 86.515 \\ 85.706 \end{pmatrix}$   $\Delta t := \begin{pmatrix} 72.237 \\ 81.175 \\ 86.515 \\ 85.706 \end{pmatrix}$   $\text{rows}(\Delta t) = 4$

Интенсивность  $\Delta v := \frac{1}{\Delta t}$   $ji := 1.. \text{rows}(\Delta t)$

Средняя  $s\Delta := \text{mean}(\Delta v)$  ресурс  $R_s := \frac{Z\Delta_d}{s\Delta}$  СКО  $\sigma\sigma := \text{Stdev}(\Delta v)$

Наработка  $t_0 := \frac{Z\Delta_d}{\Delta v}$   $\sigma\sigma\sigma := \text{Stdev}(t_0)$   $kk := 1..3$   $\sigma\sigma = 1.052 \times 10^{-3}$

износ от времени

время от износа

$$\Delta\Delta(t,k) := t \cdot (s\Delta + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma\sigma)$$

$$RR(\Delta, k) := \frac{\Delta}{s\Delta + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma\sigma}$$

$\gamma = 0.8$

ГПР  $Rg_{kk} := RR(Z\Delta_d, kk)$   $Rg^T = (130.853 \quad 121.485 \quad 113.368)$

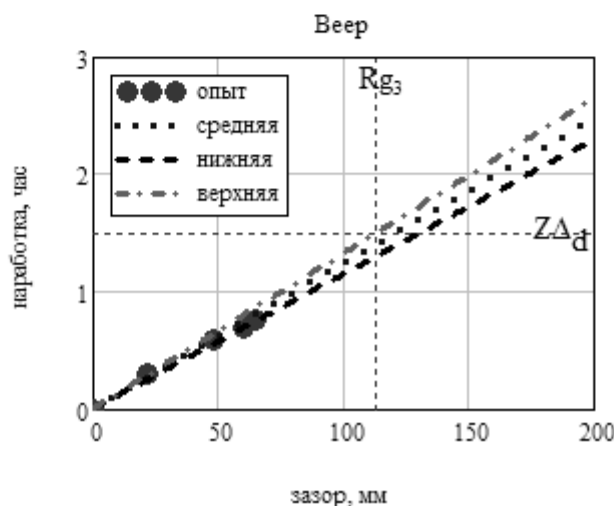


Рисунок 50. Третий фрагмент программы: Б) - верная вероятностная модель прогнозирования ресурса по нормальному закону распределения

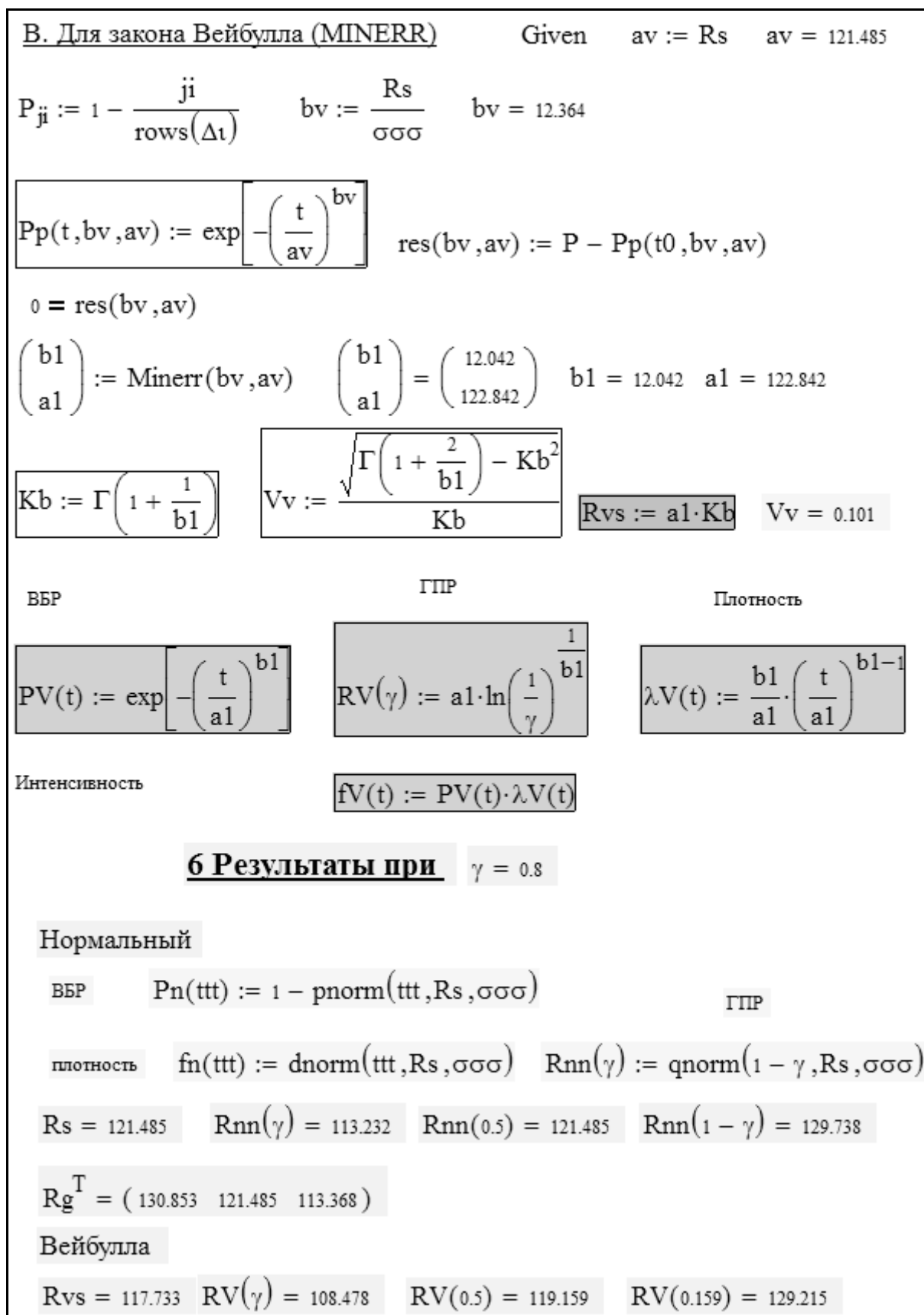


Рисунок 51. Четвертый фрагмент программы: В) - верная вероятностная модель прогнозирования ресурса по закону распределения Вейбулла и Основные результаты расчета ресурса



$$\Delta oJ_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i=1 \\ \frac{t_i}{\Sigma \Delta_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (41)$$

Программа (40) оценивает вектор износостойкости в интервалах наработки между датами замеров, которая записывается в конце  $i$ -го интервала. Поэтому и пришлось условно приравнять эту величину нулю при первом измерении.

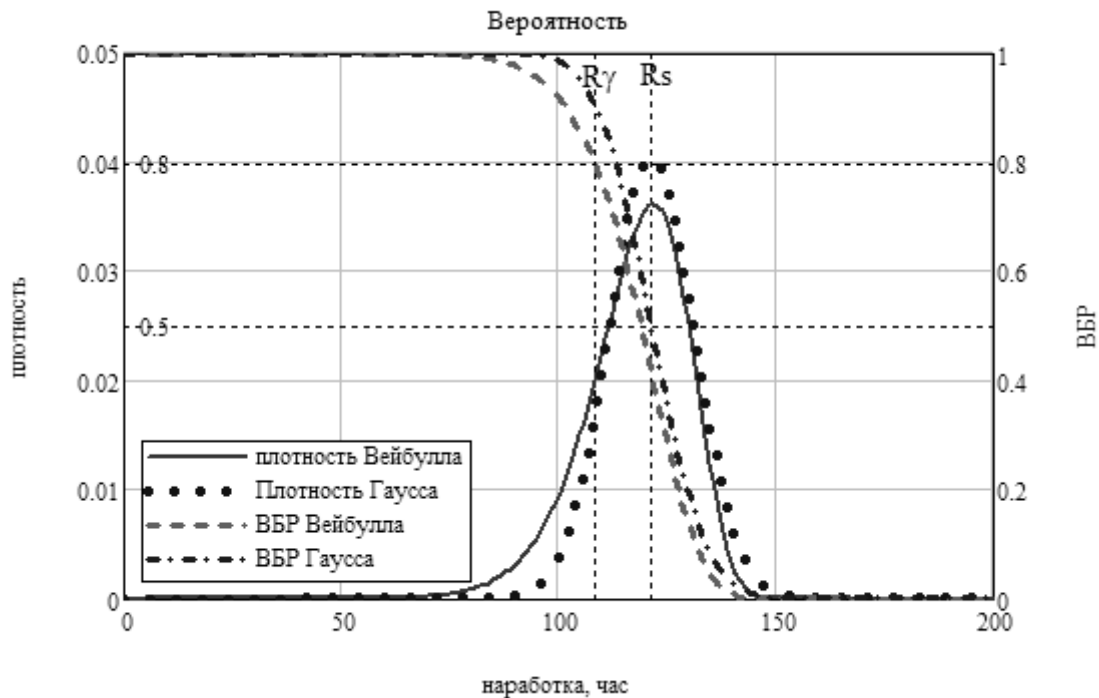


Рисунок 52. Пятый фрагмент программы: итоговый график распределений вероятности по законам Вейбулла и Гаусса

В следующих двух фрагментах (рис. 50 и 51) рассматривается основная задача данного исследования – прогнозирование гамма-процентного ресурса узла трения, т.е. наработки от начала эксплуатации до не достижения допустимого зазора с вероятностью  $\gamma$  процентов. При изучении износных отказов обычно принимают  $\gamma = 80\%$ . В работе [32] предлагается несколько вероятностных моделей решения этой задачи. В данном случае применена простейшая веерная модель, в которой случайной величиной является постоянная интенсивность (скорость) изнашивания, которую можно рассматривать как обратную величину износостойкости. Исходными данными для такого расчета служит вектор интенсивности  $\Delta v = I/\Delta t$  с предварительно удаленным нулем из первой строки вектора износостойкости  $\Delta t$ . Для получения корреляционных функций износа от времени и наработки от износа необходимо было сначала рассчитать среднюю интенсивность износа  $s\Delta$  и ее СКО  $\sigma\sigma$ .

На фрагменте рис. 50 эти параметры используются для веерной модели при нормальном законе распределения Гаусса при квантиле  $Z = 0.84$  и  $\gamma = 0.8$ . При этом расчет ведется сразу для трех прямых лучей износа – среднем, верхнем и нижнем луче (график внизу рис. 50). Тогда, 80 – процентный ресурс будет равен  $Rg_3 = 113.4$  часов, что соответствует точке пересечения линии допустимого зазора  $Z\Delta_d = 1.5$  мм с верхним лучом доверительной границы.

На фрагменте рис. 51 для той же модели использован закон распределение Вейбулла, параметры которого наиболее достоверно можно оценить с помощью оператора *Minert* на основе сопоставления искомой функции вероятности  $Pp(t)$  с эмпирическим распределением  $P_{ij}$  (формулы в верхней части фрагмента). Таким образом, были определены параметры формы  $av$  и масштаба  $bv$ , что позволило получить основные вероятностные функции, а затем рассчитать гамма – процентный ресурс при допустимой зазоре  $Z\Delta_d = 1.5$  мм. На фрагменте определены следующие функции: вероятности безотказной работы  $PV(t)$ , гамма – процентного ресурса  $RV(\gamma)$  и плотности вероятности  $fV(t)$ . В нижней части фрагмента показаны основные результаты вычислений, из которых следует, что минимальный ресурс  $RV(80\%) = 108$  часов соответствует закону Вейбулла.

Программа завершается построением на рис. 52 функций для рассмотренных законов распределений, что дает наглядное представление о вероятностной природе процесса износа.

**Организация исследований МИБ.** Выполнение исследований изнашивания узлов машин в полевых условиях требует выполнения ряда условий. К ним относится, во-первых, разработка инструкции для МИБ, во-вторых - подготовка квалифицированных специалистов по применению рассмотренных методов. В-третьих, необходимо скомпоновать мобильный набор инструментов и аппаратуры для оперативного контроля износов при техническом обслуживании и ремонте машины.

Подготовку специалиста целесообразно выполнять по инструкции, предусматривающей изучение средств и методов МИБ, а также порядок аттестации его знаний и умений качественно выполнять все операции по проведению испытаний и обработки их результатов.

В инструкцию необходимо включить описание объекта исследования, способ образования лунок, а так же методику измерений входного параметра и расчета износа по глубине лунки. Особое внимание надо уделить образованию и измерению первичной лунки со статистическим подходом к оценке математического ожидания и доверительных границ входного параметра. Рекомендуется выполнять до 10 повторов измерений с отбрасыванием первого результата. Последующие измерения той же лунки можно ограничить тремя измерениями.

В мобильный набор инструментов и аппаратуры для оперативного контроля износов рекомендуется включить следующие изделия, обозначенные на рис. 53.

- 1 - Мини дрель с гибким валом и набором насадок.
- 2 - Дрель с аккумуляторным или сетевым питанием, оснащенную угловым переходником для работы в труднодоступных местах.
- 3 - Устройство для вертикального перемещения дрели при сверлении.



Рисунок 53 Рабочий набор инструментов для МИБ

4 - Набор инструментов для образования лунок (автоматический керн, сверла, зенкеры, фрезы и прочее).

5 - Цифровой микроскоп с веб-камерой.

6 - Ноутбук, оснащенный программами для обработки изображений от веб-камеры и для расчета параметров износа и ресурса.

В зависимости от цели исследования из этих предметов формируется рабочий набор, размещенный в общей емкости для транспортировки.

**Заключение.** Подробное описание МИБ здесь дано в связи с тем, что этот метод имеет прямое отношение к управлению надежностью – ориентированным техническим обслуживанием машин в части контроля изнашивания их деталей и узлов в условиях эксплуатации. Будем надеяться, что внедрение предложенной методики в практику поможет более успешно решать эту проблему.

## **4. Примеры управления надежностью**

### **4.1. Управление надежностью малых холодильных машин**

#### 4.1.1. Предисловие

Содержание этого раздела монографии основано на информации из книги Канторовича В.И. [39], где проанализирован большой статистический материал об отказах и надежности малых холодильных машин и их элементов при массовом производстве. Там даны рекомендации по повышению надежности отдельных узлов и рассмотрено влияние различных эксплуатационных факторов на надежность малых холодильных машин: температуры окружающего воздуха, степени загрузки оборудования, регулирования автоматических приборов и др. Эта уникальная информация имеет большое практическое значение, хотя и относится к опыту изучения надежности машин в период между 1950 – 1970 годами. В частности, целесообразно обратить внимание на матричную форму оценки интенсивности отказов машин в гарантийный период эксплуатации, на систему кодирования отказов, на подробный сравнительный анализ надежности по типам машин и их элементам и другие методические особенности.

Для нашей концепции НОТЭ эти сведения можно отнести к проблеме изучения надёжности при ремонтах по потребности, которая успешно решалась на отраслевом уровне.

#### 4.1.2. Объекты, субъекты и задачи исследования надежности

К объектам технической эксплуатации в данном разделе относятся так называемые малые холодильные машины (ХМ), которые условно разделяются на домашние холодильники и холодильники торгового типа. В книге [39] подробно описывается развитие производства и организация эксплуатации изготовителями ХМ. Показано, что в 1970 году они производились на 30 заводах, среди которых передовые позиции занимали Московский завод им. Лихачева (ЗИЛ), Харьковский, Ярославский, Одесский и другие заводы ХМ. В период 1950 - 1970 годы годовой выпуск домашних холодильников возрос с 1200 до 4000000 шт. в год, а машин торгового типа – с 2600 до 240000 шт. В эксплуа-

тации в 1970 году находилось 18500000 домашних холодильников и 1400 холодильников торгового типа. В указанный исторический период выпускались следующие марки домашних холодильников.

Компрессионные: «Саратов» (рис. 54), "ЗИЛ-Москва", «Бирюса», «Орск», «Полюс», «Донбасс», «Юрюзань», «Минск», «Сарма», «Ярна», «Смоленск» и «Арагац».

Абсорбционные: «Кузбасс», «Север-61», «Кристалл-2».

Параллельно с ростом выпуска домашних холодильников развивалось и производство холодильников торгового типа.

Начиная с 1948 г. Харьковский завод выпускал фреоновые ХМ для торговых шкафов, витрин, прилавков. В 1958 г. выпуск аналогичных машин, таких как ФАК-0.7 (рис.55) был освоен и на Ярославском заводе холодильных машин. С 1949 г. производились машины для небольших стационарных камер московским заводом «Искра». Эти модели (ИФ-49 и ИФ-56 на 3000 ккал/ч и ИФ-50 на 1600 ккал/ч), выпускались также Одесским заводом холодильных машин, а затем Мелитопольским заводом холодильного машиностроения.

Наряду с поршневыми машинами в Советском Союзе начали осваивать ротационные машины с катящимся ротором холодопроизводительностью 900 ккал/ч. Эти машины выпускал рижский завод «Компрессор».



Рисунок 54 Старый домашний холодильник «Саратов»

Техническое обслуживание холодильных машин на предприятиях торговли и общественного питания осуществляется ремонтно-монтажными специализированными комбинатами министерств торговли союзных республик. Наибольший объем работ по ТОР выполнялся Московским специализированным комбинатом холодильного оборудования (МСКХО). Этим предприятием

обслуживались ХМ большинства типов (ФАК-06, ФАК-07, ФАК-11, ФАК-1.5, ИФ-50, ИФ-56, ИФ-49, АК-2ФВ-5/3, АК-2ФВ-8/4, ФРУ-08, ФГК-0.45, ФГК-0.7, ВН-0.35, ВСР-0.35, ЗИЛ и др., а также импортные ХМ). Например, в 1970 году у него на обслуживании находилось порядка 24000 машин типа ФАК-07.

Комбинаты производили монтаж и ТОР холодильного оборудования по договорам с предприятиями. При монтаже основная часть трудно устранимых отказов оформляется в виде актов-рекламаций заводам-изготовителям. Копии актов хранятся на комбинатах. После монтажа оборудование передавалось на техническое обслуживание (обычно другому цеху), где устраняются отказы (по вызовам) и проводится профилактический ремонт (по графику).

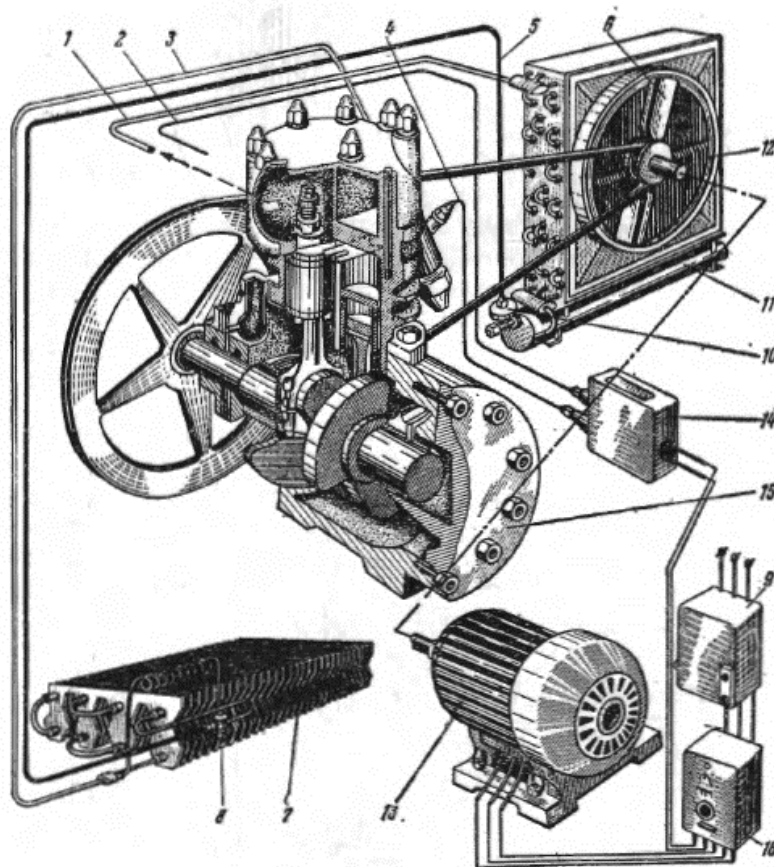


Рисунок 55 Холодильная машина ФАК-0.7:

1 — нагнетательный трубопровод; 2 — трубопровод к маноконтроллеру РД-1; 3 — всасывающий трубопровод; 4 — трубопровод к прессостату РД-1; 5 — жидкостный трубопровод; 6 — крыльчатка вентилятора; 7 —испаритель; 8 — терморегулирующий вентиль; 9 - автоматический предохранитель; 10 — жидкостный фильтр; 11 — ресивер; 12 — конденсатор; 16 — электродвигатель; 14 — реле давления РД-1; 15 — компрессор; 16 — магнитный пускатель.

Профилактический осмотр малых холодильных машин проводился раз в три или шесть месяцев. Действовал следующий порядок вызовов на ТОР: диспетчер регистрирует вызов (отказ) в книге учета вызовов и выписывает наряд-задание механику. Механик устраняет дефект и на наряде по возможности полно указывает причину отказа, марку, номер и дату выпуска машины. Эти дан-

ные регистрируются затем в книге вызовов, а при наличии картотеки разносятся на карточки-паспорта. Анализ учета вызовов и картотеки позволяет выявить параметр потока отказов для машин различных моделей.

Если дефект не мог быть устранен на месте, машина направляется в ремонтные мастерские комбината. В период ремонта на объекте обычно ставится машина обменного фонда. Практикуется и обезличенный ремонт, при котором машина обменного фонда остается у заказчика, а снятая и отремонтированная машина устанавливается на другом предприятии взамен вышедшей из строя.

В ремонтный цех направляются также машины, ремонт которых намечен при очередном профилактическом осмотре. В ремонтном цехе велся учет первичных отказов, дефектов, выявленных при вскрытии, и количества деталей, требующих замены.

За основную выборку при определении надежности малых холодильных машин в книге [39] приняты машины, обслуживаемые МСКХО. Наибольший удельный вес (55—60%) имеют машины типа ФАК-0.7. Примерно по 8—10% приходится на машины ФАК-1.1 ИФ-49 и БРРКФ-0.9. Удельный вес других машин несколько ниже. Однако наличие 200—300 машин какой-либо модели позволяет с достаточной степенью точности судить о ряде показателей надежности. По некоторым моделям (ФАК-0.6, ФРУ-0.8, РКФ-0.9, ДКК) можно проследить весь срок службы машины с первых лет выпуска и почти до полного исчезновения ее из эксплуатации (в результате списания или замены другой маркой). Примерно такая же структура парка холодильных машин и на других комбинатах Советского Союза.

Возвращаясь к концепции НОТЭ, можно сделать вывод, что в данном случае роль заказчиков играют заводы-изготовители ХМ, а исполнителями ТОР служат специализированные комбинаты, у которых, в частотности, накапливается информация об отказах ХМ в период эксплуатации. Другие источники информации об отказах ХМ и методы их обработки рассмотрим в следующих разделах монографии.

Задачи процесса изучения надежности ХМ очевидны. На основании сбора, накопления, систематизации и обработки информации об отказах и дефектах ХМ необходимо было устанавливать и устранять конструктивно – технологические недостатки машин и их элементов с целью повышения эффективности и безопасности эксплуатации. Большое значение имеет сравнительный анализ надежности разных типов ХМ в зависимости от различных факторов.

Кроме задач надежности конкретных типов ХМ имеются проблемы более высокого уровня. К ним относится разработка справочной и нормативной документации и ГОСТов на малые холодильные машины.

#### 4.1.3. Субъекты процесса исследования надежности

Понятно, что основными заказчиками ПИН холодильных машин должны быть их изготовители, поскольку именно они должны разрабатывать и внедрять конструктивно – технологические мероприятия для повышения качества и конкурентоспособности продукции. К заказчикам можно отнести и специализированные комбинаты по ТОР машин, заинтересованные в повышении качества при

ремонте техники. Что касается исполнителей ПИН, то их создание или назначение связано с традиционно сложными для многих отраслей промышленности проблемами, которые, так или иначе, решались в холодильной промышленности. Прежде всего, интересно рассмотреть историю создания служб надежности. До 1960 года на предприятиях таких служб еще не существовало. Из-за отсутствия данных о надежности конструктор вынужден был полагаться на свой опыт. В лучшем случае он мог связаться с ремонтно-монтажными комбинатами и организациями, где установлены машины, чтобы путем опроса составить хотя бы ориентировочное представление об их надежности. Однако практически это давало мало эффекта, так как на комбинатах тоже не было специальной службы надежности и разработанной методики. Работа эта поручалась техническому персоналу как временная, в виде дополнительной нагрузки.

Попытки проводить эксплуатационные испытания головных партий силами заводов-изготовителей также не могли дать положительных результатов по ряду причин. Во-первых, объем выборки и сроки испытаний были настолько ограниченными, что выборку нельзя считать репрезентативной. Во-вторых, испытания машин только силами завода-изготовителя, как правило, недостаточно объективны; в-третьих, отсутствие единой методики определения показателей надежности не позволяло сделать правильных выводов и т.д.

Только в 1960—1961 гг. на некоторых ведущих заводах были впервые созданы отделы надежности. С последующие годы такие отделы появились на многих заводах, хотя на некоторых предприятиях эта служба была рассредоточена по другим подразделениям, например, ОТК или конструкторские бюро.

Если дефекты в период гарантии устранялись силами завода, то их ОТК, как правило, располагал достаточно полной информацией об отказах машин в течение этого срока. Так обстояло дело, например, на заводах домашних холодильников. Однако, дефекты торгового оборудования обычно устранялись силами комбинатов (с оплатой счетов от комбината) или самими заводами по актам комбинатов. В этих случаях рекламации составлялись нерегулярно. На часть дефектов, обнаруженных при монтаже, акты вообще не составлялись.

На комбинатах, кроме актов-рекламаций, учитывающих отказы в период гарантии, регистрировались также отказы в течение всего срока эксплуатации. Однако из-за отсутствия единой системы учета отказов, анализ причин их возникновения не проводился. Это привело к тому, что недостатки конструкции и низкое качество изготовления машин на ряде заводов стали существенно беспокоить потребителей холода. Стоимость эксплуатации малых холодильных машин из-за их низкой эффективности и надежности непомерно возрастала.

Необходимость устранения этих недостатков привели к появлению таких исполнителей ПИН как творческие коллективы по выполнению научных и прикладных исследований. Так, в 1958 году по предложению МСКХО во Всесоюзном научно-исследовательском холодильном институте (ВНИХИ) была проведена первая серьезная работа по изучению эксплуатации ХМ. Были проведены наблюдения за 32 фреоновыми машинами в Москве и 9 машинами в Баку. В частности, были установлены и устранены эксплуатационные и конструктивно-технологические причины перерасхода электроэнергии и воды.



Это послужило основанием для разработки нормы расхода электроэнергии и воды для ряда ХМ и оснащению их электросчетчиками. На практике эту проблему пришлось решать комбинатам путем выборочного контроле технического состояния холодильных машин. В экономическом обосновании этих исследований приведена выборка суммарного количества крупных отказов (требующих ремонта в условиях мастерских) для различных марок машин и годов выпуска (по картотекам МСКХО) за 1952—1958 гг. Однако из-за отсутствия методики эти данные не были обработаны.

Первое исследование надежности отечественных ХМ (типа ФАК-0,7, ФАК-1.1 и ФАК-1.5) было проведено группой инженеров Научно-исследовательского института технологии и организации производства (НИИ-ТОП) в 1960 г. Работа выполнялась в содружестве с Харьковским заводом ХМ и Московским комбинатом. В этой работе были применены методы математической статистики для выявления характеристики надежности отечественных малых холодильных машин по результатам их многолетней эксплуатации. Не меньшее значение имел сам факт опубликования цифровых показателей надежности, что позволило сравнить уровень надежности машин различных заводов и в дальнейшем следить за его изменением. В ходе испытаний, Харьковский завод принимал оперативные меры по улучшению конструкции отдельных узлов и повышению надежности машин.

Исследование надежности малых холодильных машин показало, что больше половины отказов вызвано ненадежной работой автоматических приборов. Была проведена работа по исследованию надежности основных типов реле давлений, реле температуры и терморегулирующих вентилей, которыми комплектуются малые холодильные машины. Надежность реле температуры АРТ-2 для домашних холодильниках, исследовалась совместно с лабораторией ЗИЛа.

Проводимые ВНИТОП и другими организациями эксплуатационные испытания позволяли выявить наиболее слабые узлы и детали машины, частота отказов которых в десятки раз выше, чем у других узлов. Эти испытания позволяют конструктору выбирать узлы, которые, хорошо зарекомендовали себя с точки зрения надежности в других моделях. Если узел необходимо заменить одной из новых конструкций, не применявшихся ранее, то эксплуатационные испытания следует дополнять лабораторными исследованиями износоустойчивости и долговечности отдельных узлов.

Примерно в таком же направлении исследовалась надежность малых холодильных машин и в США, Англии и других странах. Сначала стали появляться статьи о типичных неполадках в работе холодильных машин и методах их устранения. Затем появился статистический материал по одному узлу установки — электродвигателю герметичного компрессора. В 1961—1962 гг. была опубликована серия статей, содержащих статистические данные и анализ отказов малых фреоновых машин на базе данных об эксплуатации 16 тыс. компрессоров. Объем выборки был примерно таким же, каким располагал и МСКХО. Интересно, что средние показатели надежности американских малых фреоновых машин почти совпали с нашими данными. Так, машины ХЗХМ типа ФАК

по надежности были выше, чем американские, но герметичные машины типа ФГК-0.7 несколько уступали американским.

В 1966 г. на МСКХО была создана специальная лаборатория для исследования эксплуатационной надежности холодильных машин. Накопление и обработка статистического материала, проведенные комбинатом по разработанной методике [39], позволили выявить основные показатели и влияние некоторых эксплуатационных факторов на надежность. Одновременно появились интересные работы по надежности герметичных машин, крупных агрегатов и приборов автоматики.

Большую роль в унификации терминологии по надежности ХМ, в обмене информацией о проводимых по надежности работах и в объединении усилий различных организаций сыграл постоянно действующий семинар, организованный в Ленинградском технологическом институте холодильной промышленности (ЛТИХП) на кафедре торгового машиностроения. Обобщение работ по систематизации отказов позволило ВНИХИ подготовить прогрессивные показатели надежности для включения их в ГОСТ на МХ.

В итоге можно утверждать, что основными исполнителями ПИН холодильной техники являются службы надежности изготовителей, лаборатории надежности ремонтных предприятий и творческие коллективы научно исследовательских институтов и ВУЗов.

#### 4.1.4. Объекты процесса исследования надежности

При изучении малых холодильных машин применяется особое толкование понятий о надёжности, соответствующее массовому типу производства продукции, этапам получения сведений об эксплуатации изделий и задачам анализа показателей качества.

Сразу следует отметить, что в данном случае основным объектом исследования являются показатели безотказности, определяемые путем обработки больших выборок информации об отказах, которую можно получить следующими способами.

**Специальные испытания.** Обычно это испытания небольшой группы изделий (практически от 10—15 до 400—500 шт.). Информация об отдельных отказах здесь наиболее полная. Однако точность статистической оценки показателей надежности из-за малого объема выборки невелика, особенно в отношении отдельных элементов. Эта информация используется главным образом для вскрытия физической сущности отказа. Определение показателей надежности в этом случае не вызывает затруднений и проводится непосредственно по классическим формулам.

**Учет актов-рекламаций в гарантийный период.** Эта информация имеет более высокую точность, так как объем выборки находится уже в пределах 200—3000 машин для холодильников торгового типа и достигает 50—500 тыс. шт. по отдельным заводам домашних холодильников. Однако в машинах торгового типа многие виды отказов устраняются организацией, осуществляющей монтаж оборудования без составления актов-рекламаций. Поэтому наряду с

анализом актов-рекламаций для этих машин необходимы специальные эксплуатационные испытания.

**Учет отказов в послегарантийный период** объем выборки здесь настолько велик, что полная информация при регистрации отказов практически невозможна и экономически нецелесообразна. В этом случае обычно не указывается период работы машины между отказами, а в отношении домашних холодильников, как правило, нельзя достаточно точно определить парк машин, с которого мастерской собраны отказы за определенный период. Тем не менее, благодаря большому объему выборки эта информация лучше, чем какая-либо другая, позволяет выявить надежность отдельных элементов, а при определенном методе обработки может быть даже использована для определения их долговечности.

При любом способе получения и регистрации информации об отказе требовалось указывать: тип оборудования; марку агрегата и его номер; месяц и год выпуска оборудования и отказавшего узла; месяц и год монтажа; дату отказа; место отказа; сущность отказа; дату устранения отказа; принятые меры (включая запасные части); дополнительные сведения о возможной причине отказа; шифр отказа по классификатору.

В гарантийный период характеристики отказов по рекламационным актам, а в послегарантийный — они регистрируются в журнале поступающих вызовов, а также в нарядах на вызов и в сводных формах учета отказов.

В рассматриваемой книге [39] показаны некоторые различия подходов для оценки показателей надежности в гарантийный период и послегарантийное время эксплуатации ХМ.

В гарантийный период в качестве основного показателя надежности применяется интенсивность отказов  $\lambda$  с размерностью %/мес., равная количеству отказов 100 машин в каждый месяц гарантийного периода и привязанная к соответствующему месяцу ввода их в эксплуатацию.

Уникальная методика расчета и анализа этого показателя с помощью так называемой «рекламационной матрицы» показана в следующем параграфе. Там определяются  $\lambda$  - характеристики для каждого вида отказов, что позволяет затем выявлять наименее надежные элементы машины. Особо отметим, что в гарантийный период при расчете исследуемые элементы условно рассматриваются как неремонтируемые изделия, которые после отказа не заменяются. Поэтому интенсивность определяется как отношение числа отказавших изделий  $n_i$  к числу еще не отказавших изделий  $(N - \sum_{i=1}^{i-1} n_i)$  в рассматриваемом  $i$  - м интервале

времени, где  $N$  - общее число подконтрольных изделий, а  $\sum_{i=1}^{i-1} n_i$  - накопленного числа отказавших изделий перед этим интервалом. На практике последним слагаемым можно пренебречь, поскольку при массовом производстве машин его значение на несколько порядков меньше исходной выборки объемом  $N$ .

Этот подход совпадает с методикой расчета показателей надежности машин в послегарантийный период, хотя отказавшие элементы рассматриваются

как ремонтируемые изделия и поэтому объем выборки после отказов не меняется за все время эксплуатации.

Тогда в качестве основного показателя надёжности используется параметр потока отказов  $\omega(t)$ , который соответствует среднему числу отказов за единицу времени по формуле (42).

$$\omega(t) = \Delta m / N \Delta t \quad (42)$$

где  $\Delta m$  - суммарное число отказов всех  $N$  изделий за интервал времени  $\Delta t$ .

Этот показатель имеет ту же природу и размерность (%/год), что и интенсивность отказов, определяемую как число отказов 100 изделий в год. Значение потока отказов  $\omega$  совпадает с интенсивностью  $\lambda$ , если суммарное число отказов относится к среднему возрасту машин  $\tau_c$ , а объем выборки в течении этого года практически не меняется.

Поэтому появляется возможность для оценки потока отказов в послегарантийный период применять уже упомянутый матричный метод анализа интенсивности отказов.

Параметры потока отказов разделяют на две группы в зависимости от стоимости работ на восстановление после отказа – мелкие и крупные. Мелкие отказы устраняются на месте, а крупные – в условиях мастерских. Субъективно полагая, что стоимость устранения крупных отказов на порядок (в 10 раз) больше стоимости устранения мелких отказов в методику введено понятие «условный индекс надёжности»  $\omega_y$ , который рассчитывается по формуле (43) по данным о параметрах потока для мелких  $\omega_m$  и крупных  $\omega_k$  отказов

$$\omega_y = \omega_m + 10 \omega_k \quad (43)$$

Статистика аварийных вызовов при эксплуатации, как правило, учитывает внезапные отказы на втором рабочем этапе эксплуатации машин по рис. 1. Постепенные отказы начинают проявляться на завершающем этапе работы. Они характеризуют назначенный срок службы машин, который у домашних холодильников может достигать 15 – 20 лет.

Параметр потока отказов и интенсивность отказов являются основными показателями для оценки уровня надёжности машины в целом и ее элементов, что подтверждается большим объемом фактических данных об основных типах ХМ и их элементов.

Кроме них в книге упоминается о вероятности безотказной работы, гамма – процентном ресурсе, а также о комплексных показателях, характеризующих ремонтпригодность машин. К ним относятся коэффициент готовности  $K_g$  и коэффициент простоя  $K_n$  машины, которые применительно к ХМ приняли следующий вид (44).

$$\begin{aligned}
 K_z &= t_{\text{раб}} / (t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}) & \text{а)} \\
 K_n &= t_{\text{рем}} / (t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}) & \text{б)} \\
 K_n &= 1 - K_z = \omega \tau_{\text{рем}} / (100 \cdot 365) & \text{в)}
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

где  $t_{\text{раб}}$  - суммарная наработка машины,  $t_{\text{рем}}$  - суммарное время, затраченное на ремонт и восстановление после отказов,  $\omega$  - параметр потока отказов %/год,  $\tau_{\text{рем}}$  - время ремонта после одного отказа, сутки.

Формула (44в) основана на том, суммарное время работы и простоев равно календарному годовому времени 365 суток, а общее количество отказов одной машины в год равно  $\omega/100$ .

В работе сказано, фактические затраты времени на ремонт одной машины колеблется в очень широких пределах от 2-5 дней до месяца (по субъективным причинам, например, отсутствие запчастей и материалов).

#### 4.1.5. Методы и средства оценки показателей надежности

Как было выше показано, в холодильной отрасли промышленности в период с 1950 по 1970 год постепенно сформировалась система получения и систематизации первичной информации об отказах в виде картотек по данным рекламационных актов в гарантийный период, карт вызовов мастеров и других учетных документов с результатами испытаний и наблюдений. Надо обратить внимание на то, что в те времена о современной (для 2015 года) вычислительной технике даже не мечтали и все огромная работа по сбору, накоплению и анализу информации выполнялась вручную.

Вместе с тем в холодильной отрасли промышленности была предпринята попытка выполнить кодировку отказов для автоматизации обработки информации. Первый классификатор отказов холодильных установок (с малыми герметичными машинами) был предложен в 1969 году. Ленинградским специализированным комбинатом по холодильному оборудованию совместно с ЛТИХП.

Для классификации предложен восьми – цифровой код (000.00.000). Схема универсального классификатора отказов с таким кодом показана в табл. 19.

Таблица 19. Формирование кода отказов

Место возникновения отказа			Характер отказа	Внешние признаки	Причины Возникновения	Объем работ
группа	узел	деталь				
1	2	3	4	5	7	7

В коде использован принцип УДК. Для указания места отказа установка разбита на девять крупных узлов (1—9): компрессор. электродвигатель. конденсатор с ресивером. приборы регулирования и т. д. Цифрой «0» обозначаются прочие узлы (внешние источники питания. ограждение и др.) Каждый крупный узел разбит на девять мелких узлов (вторая цифра). которые в свою очередь разделены на девять основных деталей. В приложении книги [39] дана полная

классификация крупных узлов (первые две цифры) и разбивка на детали основных узлов (всех узлов компрессора, трубопроводов, электро-пусковых и автоматических приборов и охлаждаемого объекта).

По характеру отказы подразделяются на механические (1-10 для деталей и 11—20 для узлов). физико-химические (21—40). количественные изменения компонентов в системе (41—60). электрические (61—80) и отказы во внешних источниках питания (81 —90).

К внешним признакам отказа (шестая цифра кода) относятся остановка компрессора. повышенная температура в объекте. увеличенный расход электроэнергии и потребляемой мощности. стук и т. д.

Причина возникновения отказа (седьмая цифра кода) — конструкционная. технологическая. монтажная и др.— не всегда может быть установлена в момент определения отказа (в коде ставится 0).

Процентное соотношение между крупными. средними и мелкими отказами. т. е. объем работ. требующийся для устранения отказа (восьмая цифра кода). характеризуется таким показателем надежности. как ремонтпригодность. а количество отказов. после которых установка подлежит списанию (ремонт уже нецелесообразен) определяется ее долговечностью.

Приведены следующие примеры пользования кодом.

Шифр 151.01.173. Пластина всасывающего клапана и открытом компрессоре. Поломка Высокая температура в объекте. Причина отказа — естественный износ пластины Отказ устранен путем замены клапана на объекте.

Шифр 240.65.105. Статор электродвигателя герметичного компрессора Межфазное замыкание. Прекращение работы. Причина отказа не установлена. Требуется замена агрегата.

Теперь рассмотрим методы расчета интенсивности отказов — основного показателей безотказности ХМ.

### **Гарантийный период эксплуатации.**

Оригинальная методика решения этой задачи в гарантийный период была основана на форме сбора информации об отказах, составленная в виде матрицы (рис. 56). Такая «рекламационная матрица» составляется по каждому виду отказа (указывается в заголовке матрицы). Кроме того, удобно иметь и сводную матрицу для регистрации суммы отказов по всем элементам.

Рекламации по данному виду отказа. полученные в течение какого-то месяца. например в феврале 1970 г. (строка  $b_2$ ). раскладываются по датам (месяцам) выпуска. Количество отказов, которое дали машины выпуска февраля 1968 г. ( $a_2$ ) записывается в квадрате  $v_2/a_2$ , отказы по машинам выпуска марта 1968 г. ( $a_3$ ) — в квадрате  $v_2/a_3$  и т. д. по строке  $b_2$ . Квадрат  $v_2/a_1$  остается пустым так как на машины выпуска января 1968 г. (при двухгодичной гарантии) рекламации в феврале 1970 г. уже не поступают. Аналогично сортируются отказы, собранные в марте 1970 г. (строка  $v_3$ ), в апреле 1970 г. (строка  $v_4$ ) и т. д. Вертикальный столбец такой матрицы позволяет проследить за изменением числа отказов машин каждого месяца выпуска в течение всего срока гарантии.

Для более точного определения показателей надежности изделия следует считать неремонтируемыми. т. е. не надо вносить в матрицу повторных отказов по данной машине.

В книге подробно рассматриваются различные варианты определения зависимости интенсивности отказов от месяца эксплуатации (с учетом даты выпуска ХМ). В частности, для исключения влияния летних пиков интенсивности рекомендуется обрабатывать сразу годовой выпуск ХМ с использованием принципа формулы (45), в знаменателе которой допустимо не выполнено вычитание накопленного малого числа отказов из очень большого годового объема выборки подконтрольных машин.

Год выпуска	Количество выпущенных (смонтированных) машин																								
	В 1968г. (α) - N <sub>68</sub> (N <sub>α</sub> )				В 1969г. (β) - N <sub>69</sub> (N <sub>β</sub> )				В 1970г. (γ) - N <sub>70</sub> (N <sub>γ</sub> )																
Год учета	Месяц	N <sub>1</sub> <sup>α</sup>	N <sub>2</sub> <sup>α</sup>	N <sub>3</sub> <sup>α</sup>	...	N <sub>i</sub> <sup>α</sup>	...	N <sub>12</sub> <sup>α</sup>	N <sub>1</sub> <sup>β</sup>	N <sub>2</sub> <sup>β</sup>	N <sub>3</sub> <sup>β</sup>	...	N <sub>i</sub> <sup>β</sup>	...	N <sub>12</sub> <sup>β</sup>	N <sub>1</sub> <sup>γ</sup>	N <sub>2</sub> <sup>γ</sup>	N <sub>3</sub> <sup>γ</sup>	...	N <sub>i</sub> <sup>γ</sup>	...	N <sub>12</sub> <sup>γ</sup>			
		1	2	3	...	j	...	12	1	2	3	...	j	...	12	1	2	3	...	j	...	12			
α (1968г.)	1	α <sub>1/α<sub>1</sub></sub>																							
	2	α <sub>2/α<sub>1</sub></sub>	α <sub>2/α<sub>2</sub></sub>																						
	3	α <sub>3/α<sub>1</sub></sub>	α <sub>3/α<sub>2</sub></sub>	α <sub>3/α<sub>3</sub></sub>																					
	...	...	...	...																					
	i	α <sub>i/α<sub>1</sub></sub>	α <sub>i/α<sub>2</sub></sub>	α <sub>i/α<sub>3</sub></sub>	...	α <sub>i/α<sub>j</sub></sub>																			
	...	...	...	...		...																			
	12	α <sub>12/α<sub>1</sub></sub>	α <sub>12/α<sub>2</sub></sub>	α <sub>12/α<sub>3</sub></sub>	...	α <sub>12/α<sub>j</sub></sub>	...	α <sub>12/α<sub>12</sub></sub>																	
	β (1969г.)	1	β <sub>1/α<sub>1</sub></sub>	β <sub>1/α<sub>2</sub></sub>	β <sub>1/α<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>1/α<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>1/α<sub>12</sub></sub>	β <sub>1/β<sub>1</sub></sub>															
		2	β <sub>2/α<sub>1</sub></sub>	β <sub>2/α<sub>2</sub></sub>	β <sub>2/α<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>2/α<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>2/α<sub>12</sub></sub>	β <sub>2/β<sub>1</sub></sub>	β <sub>2/β<sub>2</sub></sub>														
		3	β <sub>3/α<sub>1</sub></sub>	β <sub>3/α<sub>2</sub></sub>	β <sub>3/α<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>3/α<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>3/α<sub>12</sub></sub>	β <sub>3/β<sub>1</sub></sub>	β <sub>3/β<sub>2</sub></sub>	β <sub>3/β<sub>3</sub></sub>													
		...	...	...	...		...		...	...	...	...													
		i	β <sub>i/α<sub>1</sub></sub>	β <sub>i/α<sub>2</sub></sub>	β <sub>i/α<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>i/α<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>i/α<sub>12</sub></sub>	β <sub>i/β<sub>1</sub></sub>	β <sub>i/β<sub>2</sub></sub>	β <sub>i/β<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>i/β<sub>j</sub></sub>											
...		...	...	...		...		...	...	...	...		...												
12		β <sub>12/α<sub>1</sub></sub>	β <sub>12/α<sub>2</sub></sub>	β <sub>12/α<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>12/α<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>12/α<sub>12</sub></sub>	β <sub>12/β<sub>1</sub></sub>	β <sub>12/β<sub>2</sub></sub>	β <sub>12/β<sub>3</sub></sub>	...	β <sub>12/β<sub>j</sub></sub>	...	β <sub>12/β<sub>12</sub></sub>										
γ (1970г.)		1	γ <sub>1/α<sub>1</sub></sub>	γ <sub>1/α<sub>2</sub></sub>	γ <sub>1/α<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>1/α<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>1/α<sub>12</sub></sub>	γ <sub>1/β<sub>1</sub></sub>	γ <sub>1/β<sub>2</sub></sub>	γ <sub>1/β<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>1/β<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>1/β<sub>12</sub></sub>	γ <sub>1/γ<sub>1</sub></sub>								
		2	γ <sub>2/α<sub>1</sub></sub>	γ <sub>2/α<sub>2</sub></sub>	γ <sub>2/α<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>2/α<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>2/α<sub>12</sub></sub>	γ <sub>2/β<sub>1</sub></sub>	γ <sub>2/β<sub>2</sub></sub>	γ <sub>2/β<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>2/β<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>2/β<sub>12</sub></sub>	γ <sub>2/γ<sub>1</sub></sub>	γ <sub>2/γ<sub>2</sub></sub>							
		3	γ <sub>3/α<sub>1</sub></sub>	γ <sub>3/α<sub>2</sub></sub>	γ <sub>3/α<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>3/α<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>3/α<sub>12</sub></sub>	γ <sub>3/β<sub>1</sub></sub>	γ <sub>3/β<sub>2</sub></sub>	γ <sub>3/β<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>3/β<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>3/β<sub>12</sub></sub>	γ <sub>3/γ<sub>1</sub></sub>	γ <sub>3/γ<sub>2</sub></sub>	γ <sub>3/γ<sub>3</sub></sub>						
		...	...	...	...		...		...	...	...	...		...											
		i	γ <sub>i/α<sub>1</sub></sub>	γ <sub>i/α<sub>2</sub></sub>	γ <sub>i/α<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>i/α<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>i/α<sub>12</sub></sub>	γ <sub>i/β<sub>1</sub></sub>	γ <sub>i/β<sub>2</sub></sub>	γ <sub>i/β<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>i/β<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>i/β<sub>12</sub></sub>	γ <sub>i/γ<sub>1</sub></sub>	γ <sub>i/γ<sub>2</sub></sub>	γ <sub>i/γ<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>i/γ<sub>j</sub></sub>				
	...	...	...	...		...		...	...	...	...		...												
	12	γ <sub>12/α<sub>1</sub></sub>	γ <sub>12/α<sub>2</sub></sub>	γ <sub>12/α<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>12/α<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>12/α<sub>12</sub></sub>	γ <sub>12/β<sub>1</sub></sub>	γ <sub>12/β<sub>2</sub></sub>	γ <sub>12/β<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>12/β<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>12/β<sub>12</sub></sub>	γ <sub>12/γ<sub>1</sub></sub>	γ <sub>12/γ<sub>2</sub></sub>	γ <sub>12/γ<sub>3</sub></sub>	...	γ <sub>12/γ<sub>j</sub></sub>	...	γ <sub>12/γ<sub>12</sub></sub>			

Рисунок 56 Форма учета отказов в гарантийный период («рекламационная матрица»)

Сначала эта матрица была изображена на листе редактора (электронной таблицы) EXCEL, фрагмент которой показан в таблице 20.

Для выполнения расчетов эта таблица помещается в буфер обмена и переносится в табличную форму редактора MATHCAD (см. рис. 57).

Уникальной особенностью этой программы является простейший алгоритм расчета интенсивности отказов путем их сложения по диагонали матрицы, как это показано на фрагменте программы рис. 57.

Задачу суммирования отказов по диагонали матрицы удалось решить путем смещения ячеек для года эксплуатации по простому выражению (46) с последующим расчетом интенсивности по формуле (45).

$$\lambda_i = 100 \cdot \sum_{j=1}^{12} m_{i,j} / \sum_{j=1}^{12} N_j \quad (45)$$

где  $m_{i,j}$  - число отказавших элементов в ячейке  $i-j$ ,  $N_j$  - общее число выпущенных машин в  $j$  - месяце года.

Отметим, что суммирование отказов за каждый месяц эксплуатации должно производиться по диагоналям рекламационной матрицы.

Для решения этой оригинальной задачи с применением современных математических редакторов нами была разработана следующая методика с использованием опубликованном в книге примера рекламационной матрицы отказов реле температуры АРТ-2 за 1960-1962 годы.

Оценка интенсивности по матрице отказов												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	25	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	23	31	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	21	30	23	20	0	0	0	0	0	0	0	0
5	19	22	22	33	8	0	0	0	0	0	0	0
6	19	10	7	19	8	2	0	0	0	0	0	0
7	14	15	13	3	13	33	2	0	0	0	0	0
8	17	22	13	21	11	19	11	8	0	0	0	0
9	15	15	24	31	21	42	25	50	4	0	0	0
10	21	25	22	21	30	34	21	38	24	4	0	0
11	11	18	24	15	14	29	20	29	38	32	4	0
12	16	22	17	20	22	25	10	24	27	23	12	7

М =

Диапазон расчета    k := 1.. 12    j := 1.. 12

Рисунок 57 Исходная таблица в редакторе MATHCAD

В итоге была получена таблица и построен график зависимости интенсивности отказов от месяца эксплуатации, которые практически совпали с оригинальными данными из книги.



Таблица 20 Фрагмент редактора EXCEL рекламационной матрицы отказов реле температуры АРТ-2 за 1960-1962 годы

	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ж	К	Л	М	Н	О
	1		13											
	2		25	17										
	3		23	31	11									
	4		21	30	23	20								
	5		19	22	22	33	8							
	6		19	10	7	19	8	2						
	7		14	15	13	3	13	33	2					
	8		17	22	13	21	11	19	11	8				
	9		15	15	24	31	21	42	25	50	4			
	10		21	25	22	21	30	34	21	38	24	4		
	11		11	18	24	15	14	29	20	29	38	32	4	
	12		16	22	17	20	22	25	10	24	27	23	12	7
	13	1	9	12	19	4	13	11	18	19	16	22	23	38
	14	2	9	1	11	13	7	9	8	9	22	12	20	18
	15	3	9	10	6	11	13	13	10	13	12	27	20	22
	16	4	9	16	13	10	13	17	25	14	21	33	21	39
	17	5	5	7	11	6	5	13	14	21	20	38	15	50
	18	6	11	13	10	12	10	12	11	15	24	25	42	53
	19	7	10	12	12	15	8	17	21	20	10	35	51	61
	20	8	9	23	8	6	7	11	18	23	29	29	32	44
	21	9	15	16	11	11	7	25	17	26	35	31	34	44
	22	10	10	13	10	9	11	23	9	17	35	26	25	30
	23	11	10	14	8	16	10	14	18	23	32	27	19	22
	24	12	8	12	9	4	11	14	16	12	31	13	22	26

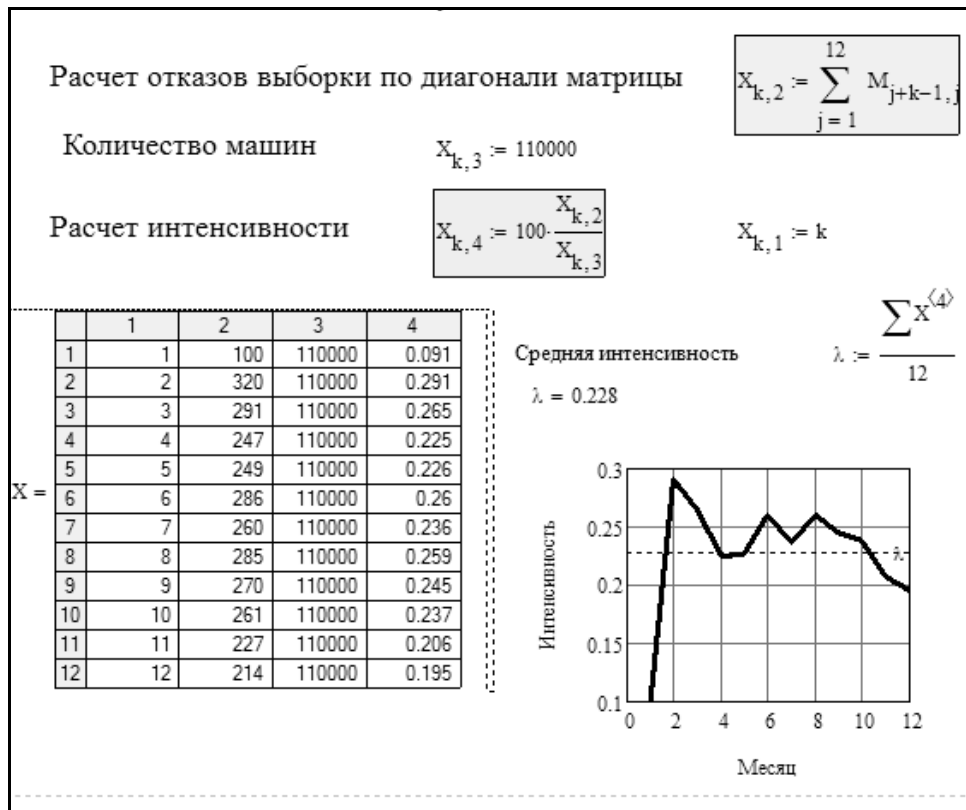


Рисунок 58 Программа расчета зависимости интенсивности отказов АРТ-2 выпуска 1960 года от месяца эксплуатации

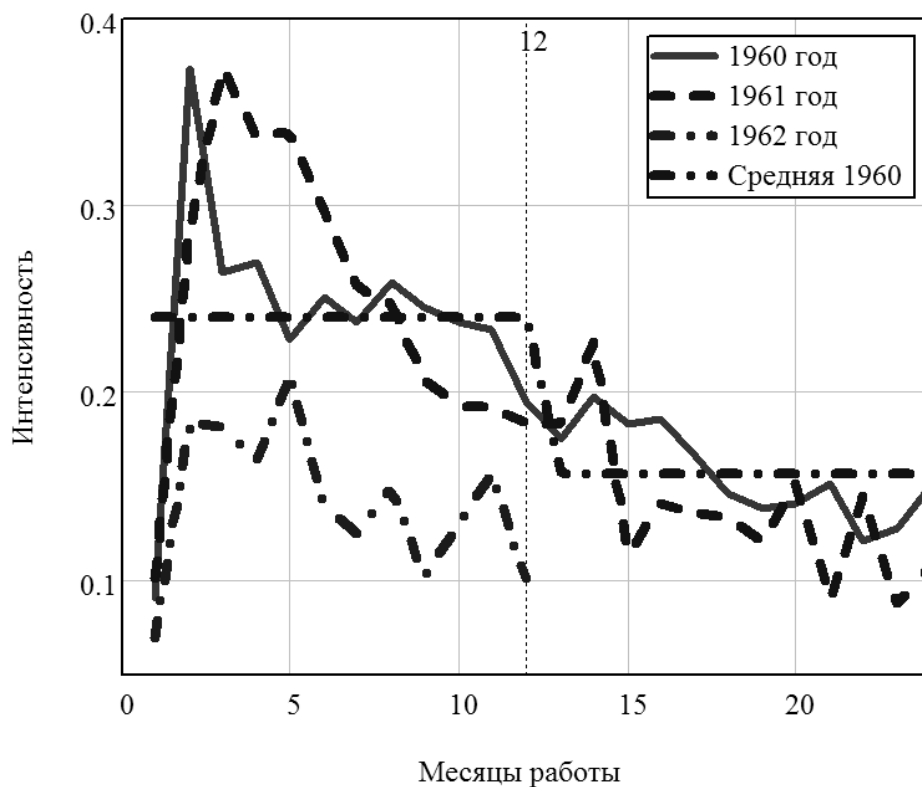


Рисунок 59 Интенсивность отказов АРТ-2 разных годов выпуска

## Расчет среднего срока службы машин

### Исходные данные

	1	2	3	4	5			
Y =	1	1959	1	20	20	0.5	строки kkk := 1..4	столбцы jj := 1..4
	2	1960	2	30	50	0.9		
	3	1961	3	40	90	1.3		
	4	1962	4	60	150	1.6		

$$\tau_{kkk} := \begin{cases} 0.5 & \text{if } kkk = 1 \\ \frac{(\tau_{kkk-1} + 1) \cdot \sum_{kkk=1}^{kkk-1} (Y_{kkk,3}) + 0.5 \cdot Y_{kkk,3}}{\sum_{kkk=1}^{kkk} (Y_{kkk,3})} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$YY_{kkk,1} := Y_{kkk,1} \quad YY_{kkk,2} := Y_{kkk,2} \quad YY_{kkk,3} := Y_{kkk,3} \quad YY_{kkk,4} := \tau_{kkk}$$

leg := ("год" "номер" "смонтировано" "срок службы")

SSL := stack(leg, YY) +

$$SSL = \begin{pmatrix} \text{"год"} & \text{"номер"} & \text{"смонтировано"} & \text{"срок службы"} \\ 1959 & 1 & 20 & 0.5 \\ 1960 & 2 & 30 & 0.9 \\ 1961 & 3 & 40 & 1.28 \\ 1962 & 4 & 60 & 1.57 \end{pmatrix}$$

Рисунок 60 Программа расчета среднего срока службы ХМ

Некоторое отличие можно объяснить вероятными погрешностями из-за большого объема вычислений при ручном счете, по сравнению с расчетами по программе на ЭВМ.

Результаты таких расчетов для изделия АРТ-2 за 1960, 1961 и 1962 год в редакторе МATHCAD приведены на фрагменте рис. 58, которые соответствуют данным первоисточника.

$$\sum_{j=1}^{12} M_{j+k-1,j} \quad (46)$$

Не вдаваясь далее в подробности специфических вариантов методики оценки надежности ХМ по источнику [39], целесообразно отметить эффективность этой деятельности для повышения надежности элементов машин. Например, показанное на рис. 59 резкое снижение пиковой интенсивности отказов

АРТ-2 в 1962 г. объясняется тем что, в конце 1961 г. на ЗИЛе была введена 100 процентная проверка АРТ-2 перед их установкой. В результате интенсивность отказов в 1962 г. снизилась почти в 2 раза.

Дальнейшее улучшение технологии контроля позволило еще более повысить надежность этого прибора в последующие годы и довести интенсивность отказов до 0.6 — 0.7% в год.

### Послегарантийный период эксплуатации

По окончании срока гарантии отказы ХМ устраняются, как правило, в соответствии с вызовами потребителей. На МСКХО все отказы регистрируются в журналах и за каждый месяц, и за год составляются отчеты по участкам, цехам и всему комбинату. В отчете указываются марка и число машин, находящихся на обслуживании, и количество отказов за отчетный период по каждому узлу и элементу. Поскольку срок службы машины до отказа обычно не регистрируется, изделия рассматривали как ремонтируемые. По этим данным непосредственно можно определить только параметр потока отказов  $\omega$  (отношение числа отказов за данный период к числу обслуживаемых машин).

Этот параметр относится ко всем обслуживаемым машинам данной марки, имеющим определенный средний возраст. Значение  $\omega$ , отнесенное к среднему возрасту  $\tau$ , совпадает по смыслу с интенсивностью отказов  $\lambda$ , что вытекает из ранее приведенных допущений. Для установления среднего возраста обслуживаемых машин можно использовать данные о ежегодном вводе в эксплуатацию ХМ различных марок, которыми обычно располагают комбинаты холодильного оборудования.

Принятые в методике допущения позволяют назначать средний возраст машин, смонтированных в первом году (в количестве  $N$  шт.), равным  $\tau_1 = 0.5$  года; на следующий год  $\tau_2 = 1.5$  года; затем  $\tau_3 = 2.5$  года и так далее. Если известен средний срок службы за предыдущий год  $\tau_{i-1}$ , то для расчета среднего возраста  $\tau_i$  (с учетом числа введенных  $N_i$  машин) предложена формула (47).

$$\tau_i = \frac{(\tau_{i-1} + 1) \sum_1^{i-1} N_i + 0.5 N_i}{\sum_1^i N_i} \quad (47)$$

Расчеты по этой формуле можно выполнить по новой программе в редакторе MATHCAD, показанной на фрагменте рис. 60. Там приведен пример расчета средних сроков службы по исходным данным первоисточника, результаты которых совпали с его результатами.

Параметр потока отказов  $\omega$  (или интенсивность отказов  $\lambda$ ) для заданного года выпуска, определяется как отношение числа отказов 100 машин к среднему сроку службы в рассматриваемый год эксплуатации.

Таблица 21 Данные о параметрах потока отказов разных ХМ

ХМ	$\omega_M$	$\omega_p$	$\omega_y$
ФАК-0,7	117	3.1	148
ФАК-1,1	106	4	146
ФАК-1.5	177	9.3	270
ИФ-50	124	21.6	340
ИФ-56	156	9	246
ИФ-49	120	5.6	176
ЛКФВ-4	110	10.1	211
ХМ соц стран	40	1.2	52
ХМ США1	132	3.1	163
МРФ-0,7	55	35	405
ФГК-0,45	67	8	147
ХМ США герм	89	8.6	175

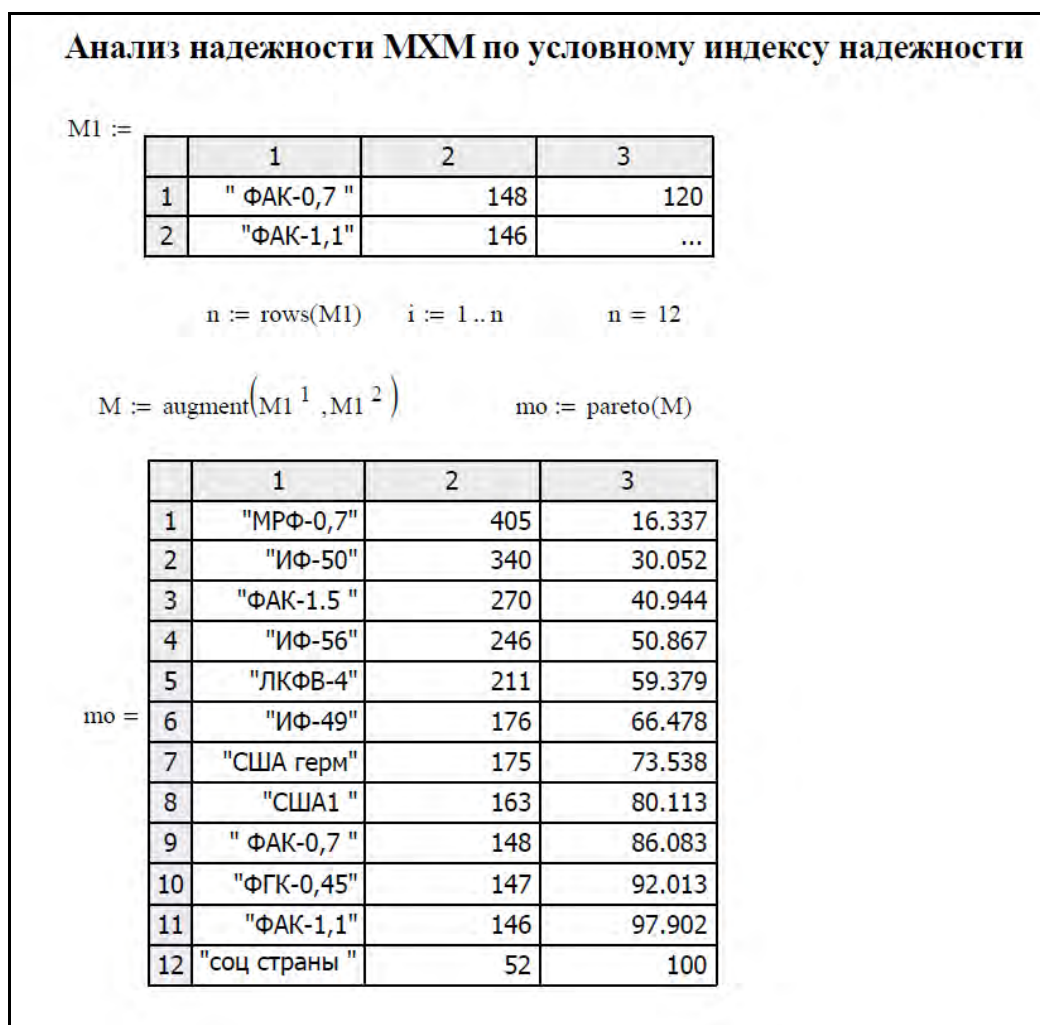


Рисунок 61 Программа для построения диаграммы Парето

При специальных эксплуатационных наблюдениях за небольшой партией машин составляют картотеку. Все отказы сортируют по машинам соответствующего года выпуска (монтажа). При этом получается годовая матрица, по виду не отличающаяся от рекламационной матрицы (см. рис. 56). Обработка ее ведется так же, как и в гарантийный период. В таблице 19 приведены сведения о параметрах потока отказов основных малых ХМ отечественного и иностранного производства (по данным 1950 – 1970 годов). В современных версиях МATHCAD появилась возможность выполнить факторный анализ и, в частности, применить диаграмму Парето для сравнения уровня надежности этих машин по условному индексу  $\omega_y$ , как это показано на фрагменте рис. 62.

Сама диаграмма изображена в виде гистограммы распределения условного индекса надежности по принципу убывания. Она позволяет наглядно выявлять наименее надежные машины и сравнивать их зарубежными образцами продукции. Из диаграммы и таблицы видно, что наименее надежны в эксплуатации ротационные машины. По причине износа и большого количества ремонтов (до 35 %/год) индекс надежности машин МРФ-0,7 достиг 405%/год.

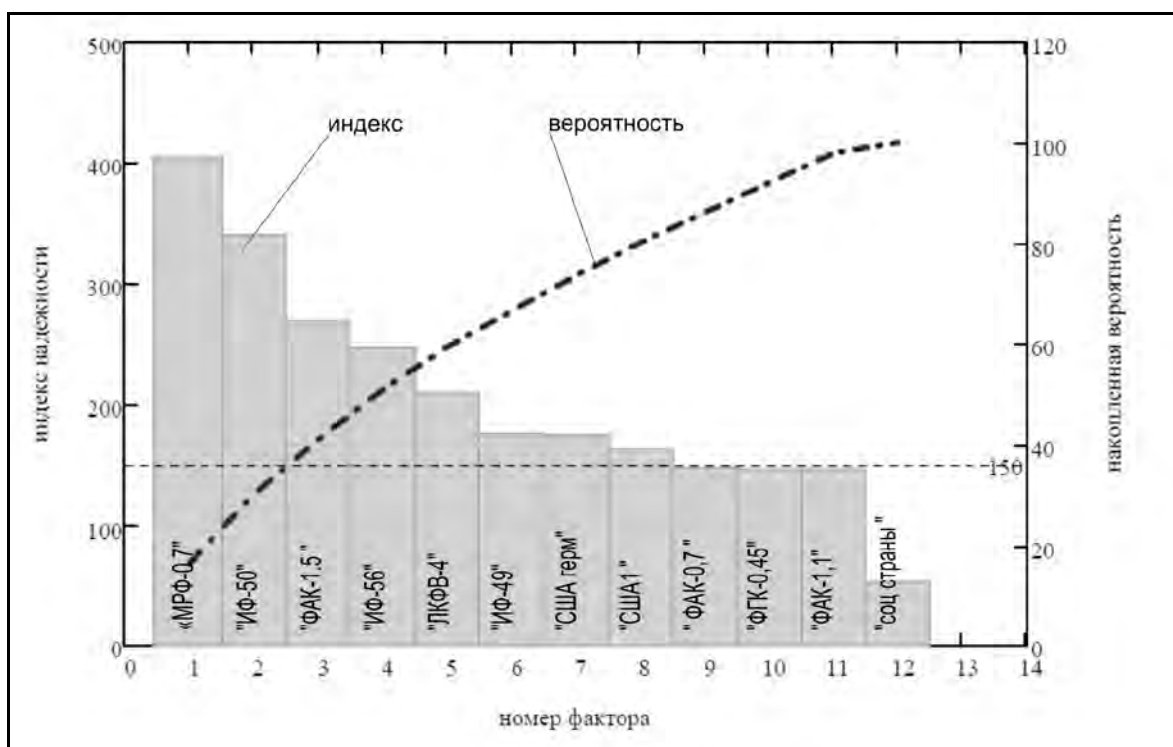


Рисунок 62 Диаграмма Парето для малых ХМ

Из-за различных недостатков конструкции очень низкой оказалась также надежность машин типа ФАК-1,5 (270%/год), ИФ-56 (246%/год) и ИФ-50 (340%/год). Наиболее надежными в эксплуатации из отечественных моделей малых ХМ явились машины типа ФАК-0,7 и ФАК-1,1: имея всего 3-4%/год ремонтов, они дают условный индекс надежности менее 150%/год.

Таковы основные особенности методов и средств изучения надежности малых холодильных машин по данным уникального труда [39] с добавлением

некоторых наших программ для расчета показателей на современных персональных компьютерах (2015 год).

Оценка эффективности приведенных выше методов изучения надежности малых ХМ будет сделана в следующем параграфе этой главы.

#### 4.1.6. Результаты и эффективность исследования надёжности ХМ

В заключении этой главы поставим естественный вопрос – в какой мере рассмотренный выше материалы о надежности малых ХМ относится к концепции НОТЭ машин? Ответ на этот вопрос может быть только утвердительным, поскольку здесь показано как в условиях массового производства продукции за счет создания системы подразделений надежности (служб, лабораторий) изготовителей и ремонтников удалось организовать сбор и обработку большого объема информации об отказах с целью повышения качество продукции. Главное достоинство этой системы заключается в том, что основными критериями для принятия корректирующих решений являются количественные показатели – параметр потока отказов или интенсивность отказов, определяемые по корректной методике для очень больших выборок сведений из сферы технической эксплуатации. Это значит, что именно подразделения ТОР машин играли основную роль в получении первичной информации об их надежности.

Кратко напомним некоторые результаты анализа материалов книги [39] .

Сравнительный анализ условного индекса надежности малых ХМ торгового назначения был показан в конце предыдущего параграфа, который позволил выявить типы машин с минимальной и максимальной надежностью. К этому можно добавить следующее сравнение надежности отечественных машин с зарубежными образцами:

наиболее надежны отечественные модели типа ФАК-0, 7 и ФАК- 1,1, которые составляли примерно 2/3 общего парка малых холодильных машин в Советском Союзе. Они на 10-15% превосходят средний уровень надежности холодильных машин открытого типа США (63%/год);

наиболее высокая надежность (52%/год) среди машин открытого типа оказалась у машин социалистических стран (Венгрия и Чехословакия);

отечественные герметичные машины типа ФГК (147%/год) также несколько надежнее герметичных машин США (175%/год).

Аналогичный сравнительный анализ был выполнен для домашних холодильников, что показано на фрагменте рис. 63. При этом в качестве показателя надежности использовалась интенсивность отказов, а не индекс надежности. Это объясняется тем, что домашние холодильники в основном ремонтируются по потребности, т.е по вызовам мастера.

Как видно из рис. 63, надежность моделей домашних холодильников очень различна. Компрессионные холодильники «Саратов» и «ЗИЛ» (1966 г.) имеют интенсивность отказов порядка 2%/год, а холодильники «Ярна». «Смоленск». «Арагац» и другие — более 10%/год отказов.

Резервы повышения надежности холодильников наиболее наглядно видны из сравнения надежности отдельных узлов (табл. 22).

Основным узлом компрессионных холодильников является герметичный компрессор. ЗИЛ, освоивший производство домашних холодильников значительно раньше других заводов, а также Омский агрегатный завод, поставляющий компрессоры для холодильников «Саратов» и «Бирюса», сумели довести интенсивность отказов по герметичному компрессору до 0.25—0.3%/год. Эти цифры почти совпадают с показателями надежности зарубежных компрессоров.

Вместе с тем на ряде отечественных заводов, освоивших выпуск герметичных компрессоров только в последние годы, надежность их еще очень низка (около 2%).

Отказы по агрегату в основном связаны с нарушением герметичности испарителя (0.15—0.2%/год).

Конденсатора (0.06—0.08%/год) и некоторых соединений. с засорением капиллярной трубки (0.1—0.7%/год). замерзанием в ней влаги (0.01—1.66%/год) и другими причинами (обрыв подвесок компрессора. кронштейнов испарителя и т. д.).

Наибольший удельный вес среди этих отказов составляют отказы из-за нарушения герметичности агрегата.

Примерно 50% всех отказов вызвано низкой надежностью приборов автоматики: реле температуры АРТ-2 (0.6—1%/год) и пускового реле РТП-1 (0.4—0.6%/год). Существенное отклонение от этих величин (более чем в 2 раза) говорит о конкретной причине, вызванной нарушением технологии изготовления или контроля, заменой материала или изменением конструкции данного узла. Например, интенсивность отказов по АРТ-2 в холодильнике «Север-6» выпуска 1967 г. достигла 6.8%/год, в то время как на большинстве заводов она не превышает 1 %/год (см. табл. 22). Оказалось, что на Московском заводе домашних холодильников для обеспечения плотности прилегания капиллярной трубки АРТ-2 ее наматывали на всасывающий трубопровод в виде спирали. Частые перегибы приводили к нарушению герметичности, что и увеличило количество отказов. Изменив крепление капиллярной трубки, марку полистирола, профиль уплотнительной резины и приняв другие меры по повышению надежности. завод уже в 1968 г. более чем в 2 раза снизил количество отказов своих холодильников. Исследования показали, что отдельные интенсивность отказов (приборы автоматики. заклинивание компрессора и др.) имеют ярко выраженный начальный пик. Для повышения надежности этих элементов выполнялось улучшение контроля на заводах-изготовителях.

В тоже время имеются элементы (уплотнительная резина, испаритель. арматура шкафа и др.) с увеличением интенсивности отказов с течением времени по причине низкого качества материалов, из которых выполнены элементы

Отсюда можно сделать следующий вывод. Располагая единой методикой определения интенсивности отказов и данными о достижениях ведущих предприятий, каждый завод на основе анализа интенсивности отказов ХМ сможет легко устанавливать ненадежные элементы и принимать меры для повышения надежности отдельных узлов и всего холодильника.



### Интенсивность отказов, %/год

$$M_1 := \text{augment}(M_2^1, M_2^4) \quad m_0 := \text{pareto}(M_1)$$

	1	2	3
1	«Север-67»	14.3	11.58
2	«Арагац»	13.3	22.35
3	«Смоленск»	10.6	30.934
4	«Ярна»	10	39.032
5	«Кристалл-2»	8.7	46.077
6	«Сарма»	7.3	51.988
7	"зил 60"	6.9	57.576
8	«Минск»	6.3	62.677
9	«Север-68»	6.13	67.641
10	"зил 59"	6	72.5
11	«Бирюса» 66"	5.6	77.035
12	«Юрюзань»	4.4	80.598
13	«Донбасс»	4.31	84.088
14	«Полюс»	3.97	87.303
15	«Орск»	3.6	90.218
16	«Бирюса» 68"	3.5	93.052
17	"зил 65"	3	95.481
18	"зил 66"	2.28	97.328
19	"Саратов 66"	1.8	98.785
20	"«Кузбасс»"	1.5	100

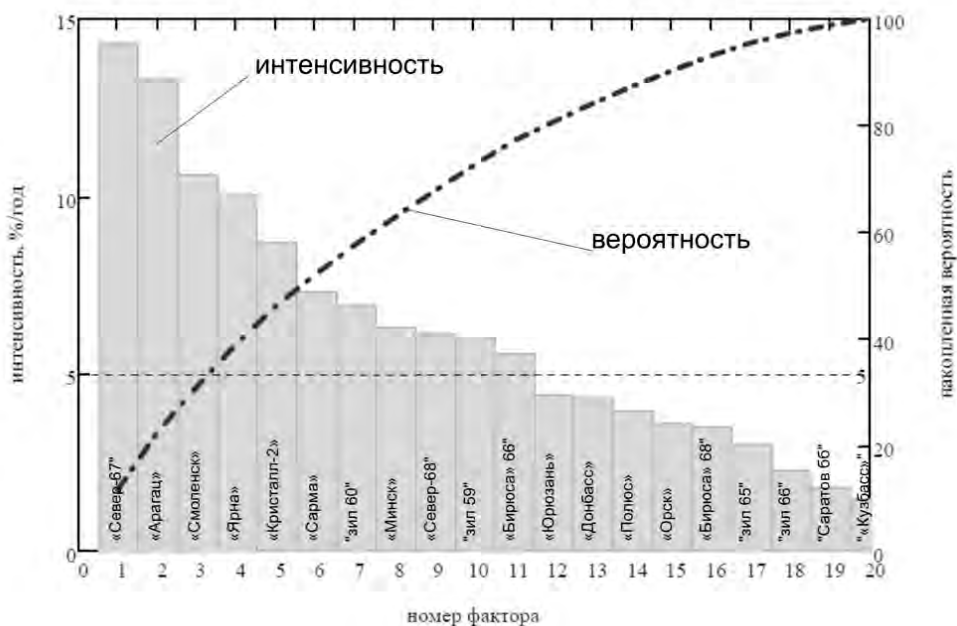


Рисунок 63 Диаграмма Парето для домашних холодильников

Таблица 22 Сводная таблица надежности элементов домашних холодильников

Отказы по элементам	«Саратов» 1956 г	«ЗИЛ – Москва»				«Бирюса»		Полюс 1967	Юрюзань 1967	Донбасс 1967	Минск 1967	Смоленск 1967	Аргзгап 1967	Мини мальня
		1959	1960	1965	1966	1966	1968							
<b>Герметичный компрессор</b>														
Компрессор														
Нет холодопроизводительности	0.053	0.21	0.2	0.085	0.045	0.07	0.04	0.24	0.13		0.036		0.79	0.04
Заклинивание	0.066	0.09	0.06	0.07	0.06	0.19	0.12	0.37	0.2		0.41	1.17	2.16	0.06
Стук, шум	0.046	0.03	0.02	0.16	0.11	0.13	0.13	1.22	1.5		0.23	0.15	1.62	0.02
Электродвигатель	0.154	0.37	0.32	0.041	0.065	0.17	0.1	0.15	0.28		0.304	0.5	0.16	0.06
<b>Итого по герметичному компрессору</b>	0.32	0.7	0.6	0.36	0.275	0.56	0.39	1.98	2.11	1.86	0.98	1.82	4.63	0.18
<b>Агрегат без компрессора Негерметичность</b>														
испарителя				0.15	0.12					0.13				0.12
конденсатора	0.25	3.8	2.05	0.06	0.08	1.37	1.05	0.18	0.22	-	0.46	2.5	1.7	0.06
трубопроводов				0.14	0.14									0.06
Засорение	0.022	0.07	0.01	0.01	0.009	0.05	0.12	0.07	0.42	0.88	0.7	0.08		0.01
Замерзание		0.09	0.04	0.01	0.005	0.29	0.11		0.07		0.03	0.16	0.36	0.01
Прочие	—	0.04	0.09	—	0.04			0.18	0.15			0.33		0.04
<b>Итого по агрегату</b>	0.28	4	2.19	0.37	0.39	1.71	1.28	0.43	0.76	1.01	1.2	4.57	2.06	0.3
<b>Приборы</b>														
Реле температуры АРТ-2	0.59	0.39	2.45	1.15	0.72	2.43	1.07	0.93	0.72	0.9	1.5	2.06	3.3	0.6
Пусковое реле РТП-1	0.31	0.63	1.1	0.48	0.4	0.6	0.64	0.57	0.47	0.18	1.38	0.7	1.76	0.4
<b>Итого по приборам</b>		1.02	3.55	1.63	1.12	3.03	1.71	1.5	1.19	1.08	2.88	2.76	5.06	1
<b>Шкаф</b>														
Внутренняя панель двери	0.01			0.37	0.3	0.08	0.05	0.011	0.17	0.11	0.25	0.1		0.01
Уплотнительная резина	0.01			0.05	0.05	0.027	0.013	0.007		0.02	0.45	0.07		0.02
Замок	0.28	0.16	0.1	0.03	0.03	0.008	0.032	0.02	0.01	0.077		0.7		0.03
Шкаф	0.01	0.04	0.41	0.18	0.12	0.08	0.029	0.012	0.04	0.15		0.19		0.01
Кнопка выключателя	—	0.04	0.045					0.05				0.38		0.02
Электропатрон				0.02	0.02	0.11	0.014		0.1		0.5			0.01
<b>Итого по шкафу</b>		0.24	0.555	0.65	0.52	0.3	0.14	0.055	0.32	0.36	1.2	1.44	1.56	0.1
<b>Всего</b>		5.96	6.9	3	2.3	5.6	3.5	3.97	4.4	4.31	6.3	10.6	13.3	1.6
<b>Объем выборки, тыс. шт.</b>	226.9	100.7	110.3	144.3	140	275	477	55	105	40	108	43	95.4	

В таблице 23 приведен рекомендуемый уровень надежности элементов и узлов малых ХМ, на который следует ориентироваться при выпуске новых моделей. Средняя интенсивность отказов машин открытого типа должна быть не более 80%/год, а герметичных - 50%/год, т.е. в среднем один отказ в два года.

Проведенные исследования позволили наметить и включить в ГОСТ по герметичным агрегатам нормативные показатели надежности. В качестве основного показателя надежности в стандарте принята среднегодовая интенсивность крупных отказов агрегатов, для устранения которых требуется вскрывать кожух герметичного компрессора.

Рекомендованы прогрессивные нормы числа отказов в период гарантийного срока для агрегатов основных типов. В новом проекте ГОСТа на герметичные компрессоры малой холодопроизводительности наряду с приведенными показателями регламентируется также надежность агрегатов для домашних холодильников: интенсивность отказов агрегата в период гарантии не должна превышать 0,5 %/год.

Хотя приведенные сведения относятся к далекой истории Советского Союза о производстве продукции в период с 1950 по 1970 год, они не потеряли своего значения на современном этапе развития народного хозяйства с возможностью использования современного программного обеспечения.

В заключение можно напомнить следующие преимущества и возможности рассмотренной системы управления надежностью ХМ при плавной системе народного хозяйства

Во-первых, создание в стране системы комбинатов по техническому обслуживанию ХМ обеспечивало своевременный ремонт по потребности конкретных машин. Во-вторых, службы комбинатов и изготовителей принимали участие в сборе и систематизации эксплуатационной информации об отказах машин, необходимой для оценки показателей надёжности элементов ХМ данного типа. В-третьих, методология позволяла изготовителям устранять выявленные дефекты и наблюдать за эффективностью принимаемых конструктивно – технологических мер. В-четвертых, определяемые показатели надежности позволили объективно сравнивать качество производства ХМ разных марок. В-пятых, анализ результатов оценки показателей служит материалом для разработки нормативов и стандартов по надежности ХМ, а также нормативно – технической документации по их техническому обслуживанию.

При рыночной системе хозяйства указанные задачи решаются в рамках сервисных служб фирм – поставщиков ХМ, но с учетом интересов потребителей этой продукции.

Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что в рассмотренной методике практически не исследовались показатели долговечности, хотя срок службы ХМ мельком, но все же там упоминается (15 – 20 лет). Это можно оправдать тем, что ТОР холодильных машин в основном осуществляется по потребности, а это не требует обоснования межремонтных периодов.

Другой подход будет показан далее при рассмотрении машин с плановыми стратегиями ремонта.

Таблица 23 Нормы надежности элементов малых ХМ

Причина отказа	Параметр потока отказов	
	машин открытого типа	герметичные машины
<b>Компрессор</b>		
Стук или заклинивание	3	2
Поломка всасывающего клапана	2	1
Поломка нагнетательного клапана	1	0.5
Негерметичность сальника вала	3	
Негерметичность в других местах	1	
Растяжение клиновых ремней	3	
Прочие	1	0.5
<b>Итого</b>	<b>14</b>	<b>4</b>
<b>Электродвигатель</b>		
Сгорание обмоток	4	4
Выработка подшипников	3	
Прочие	2	1
<b>Конденсатор</b>		
Негерметичность	0.5	0.5
Прочие	3	1
<b>Испаритель</b>		
Негерметичность	0.5	0.5
<b>Система</b>		
Негерметичность	10	5
Засорение	3	4
Замерзание влаги	3	3
Прочие	4	3
<b>Приборы автоматики</b>		
Выход яэ строя		
ТРВ	3	2
РД. АРТ-2	2	2
ВРВ	3	
Сгорание катушки МП	4	4
Прочие отказы в магнитном пускателе	3	3
Нарушение регулировки приборов	8	7
Срабатывание тепловой защиты	5	4
Прочие дефекты приборов	2	2
<b>Всего по машине</b>	<b>77</b>	<b>50</b>

## 4.2. Управление надежностью конкретной машины при системе ППР

### 4.2.1. Предисловие

В этом разделе рассматривается характерный пример управления надежностью конкретной машины при системе совмещенного ремонта по плану и состоянию. Заказчиками и исполнителями этой работы является обслуживающий персонал (судовые механики).

Объектом исследования выбрано уникальное промышленное судно - плавучий добывающий перерабатывающий консервный завод «Наталья Ковшова» построенный для СССР в 1965 году во Франции (судоверфь г. Нанда), фотография которого приведена на рис. 64.

Для интереса можно сообщить, что судно работало в Севастополе сначала в СССР, затем на Украине, а в 2003 году оно было продано в Россию и переименовано. После двухлетнего отстоя в городе Светлом, разграбленное судно ушло в Аланг (Турция) на разделку под названием "Mrinal VI".

Решение проблемы управления надежностью показано на примере конкретной машины – его главного двигателя типа ПИЛСТИК РС2-5 V 400 мощностью 2205 л.с. при 428 об/мин. Это 12 – цилиндровый V – образный дизель с наддувом. Диаметр цилиндров 400 мм, ход поршня 460 мм (рис. 65). На судне установлено три таких дизеля, что позволит нам увеличить объём выборки при изучении надежности.

Источником достоверной информации о постоянных и переменных показателях ТОР рассматриваемого объекта является фирменная инструкция по его техническому обслуживанию, где в частности приводятся следующие сведения.



Рисунок 64 Судно типа «Наталья Ковшова»

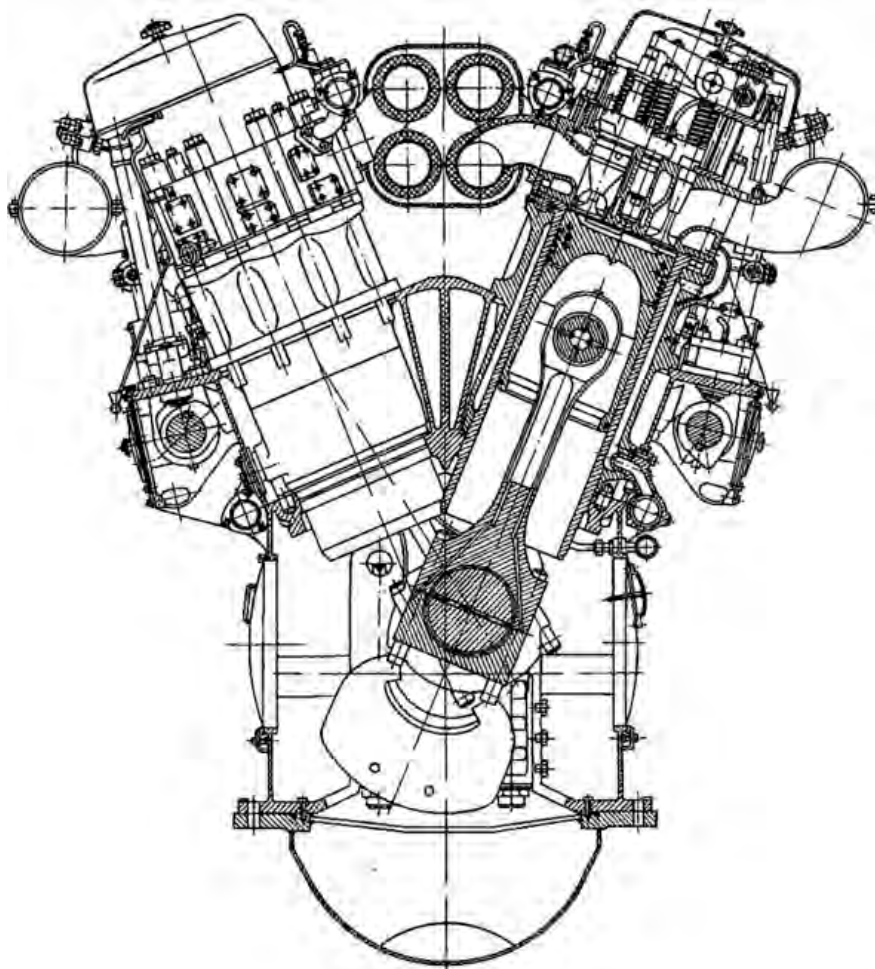


Рисунок 65 Дизель ПИЛСТИК РС2-5 V 400

В инструкции, применены следующие обозначение допустимых размеров LA и LR. LA допускаемый предел в зависимости от календаря обслуживания, LR крайний предел работы: исправление или немедленный брак. Между LA и LR деталь может еще работать, но может выйти за LR до следующего осмотра. Потребитель сам решает вопрос о замене детали в зависимости от рабочих условий, цены, доступности и промежутка между осмотрами.

Из приведенных ниже копий листов из инструкции (рис. 66...71) следует большое внимание, которое придает фирма-поставщик культуре обслуживания двигателя от применения специальных приспособлений для ремонта до учета масс основных деталей при сборке машины. Особое значение имеет информация об усилиях затяжки резьбовых соединений (рис. 67) и нормах износов и зазоров (рис. 70), как о диагностических параметрах основных узлов машины.

Эти параметры подлежат контролю (мониторингу) по регламентированному графику технического обслуживания и ремонта (система ППР). Система ППР расписана с периодичностью 1500 ч в диапазоне от начала эксплуатации до 36000 ч. При этом можно условно выделить четыре ключевых вида ремонта: текущий после 6000 ч, средний после 12000 ч, первый капитальный после 24000 ч и второй капитальный после 36000 ч.

Важно отметить указание о том, что время, по которому определяется те или иные операции осмотра и контроля, может изменяться в пределах  $\pm 20\%$ .



## 2 ПЕРЕЧЕНЬ СТАНДАРТНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Этот перечень состоит из приспособлений рынка, которые необходимы для разборки винтов, гаек, соединений, стопорных колец, шплинтов, встречающихся во время операций обслуживания.

Перечень специальных приспособлений упоминается в каждой главе инструкции.

Двойные вилчатые ключи /NF.E 74302/: Реф.70 SAM  
7 x 8, 10 x 11, 12 x 14, 13 x 17, 19 x 22, 21 x 23,  
24 x 27, 26 x 29, 30 x 32, 32 x 35, 36 x 41, 38 x 42,  
46 x 50, 54 x 58.

Простые вилчатые ключи /NF.E 74301/: Реф.69 SAM  
5,5 - 60 - 63 - 71 - 80 - 82 - 85 - 105

Гильзы: стандартной серии 1/2" SAM  
S 17 - S 19 - S 22 - S 24 - S 27 - S 32

Ключ с собачкой стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 151

Маленький удлинитель стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 210

Большой удлинитель стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 215

Ключи для шестигранных впадин NF.E 74331  
6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 17 - 24

Отвертка 1,5 шириной 7 NF.E 74351

Отвертка 2,5 шириной 14 NF.E 74351

Супердлинные толкатели шплинтов SAM Реф.7-35  
SAM Реф.7-70

Наси для внутренних стопорных колец FACOM Реф.179-14  
FACOM Реф.179-23

Наси для наружных стопорных колец FACOM Реф.177-14  
FACOM Реф.177-18

Гильза серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 32

Маленький удлинитель серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 210

Скользкая ручка серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 120

Многоугольный ударный ключ 63 SAM Реф. 108

Рекомендуется тоже достать все нижеуказанные продукты  
- Прибор для обнаружения раковин дефентоскопией - смазка  
для подшипников - смазка с молибденовым дисульфидом -  
паста для прокладок - контрольные материалы и продукты  
герметичности по приложениям 27 и 28 - продукты очистки и  
краски по приложениям 25 и 26 - нервущая буиага толщиной  
в 0,5-2мм - несмазываемые этикетки для определения деталей -  
диэлектрическая лента - тефлоновая лента.

Рисунок 66 Лист с перечнем необходимых инструментов

## 6 СВОДНАЯ ТАБЛИЦА МОМЕНТОВ ЗАЖИМА БЕЗ МОЛИКОТА

№ группа	НАИМЕНОВАНИЕ	СПОСОБ ЗАЖИМА		ЗАМЕЧАНИЯ
		МОМЕНТ в мдаН	УДЛИНЕНИЕ в мм	
1	<u>РАМОВЫЙ ПОДШИПНИК</u> - тяга в остове	180	0,7-0,85	3 человека на расстоянии 1 метра 140-190мм вращения фланца после приставки гайки с шпинделем 250 мм Давление 700 бар
	- боковой инт - винт домкрата крышки/гидрозажим/	320		
3	<u>ШАТУН</u> - гайка болта шатуна	-	0,3-0,4	Избегать зажим только по реперам
		-		
5	<u>ПОРШЕНЬ</u> - блокировка штифтов в головке	8	-	Нанесение пасты Моликот "G" Зажать поочередно 2 раза на 11м даН до окончательн. зажима 11 м даН
	- гайки болтов крепления головки-юбка	11		
8	<u>РАБОЧИЙ ЦИЛИНДР</u> - блокировка тяг в остове	120	-	2 человека на 1 м 300 <sup>0</sup> Давление 900 бар.
	- зажим гаек крышки цилиндра	-		
	- гидрозажим гаек крышки цилиндра	-		
10	<u>КРЫШКА ЦИЛИНДРА</u> - блокировка штифтов крепления на крышке цилиндра :		-	
	• выхлопных клапанов	12		
	• тяг коромысел Ø 24	15		
	Ø 16	6		
	• предохранительных клапанов	8		
• запускных клапанов	8			

Рисунок 67. Один из листов с усилиями затяжки резьбовых соединений



Глава	Рис.	НАИМЕНОВАНИЕ	Вес в кг
5 /продолж/	II	Кулачок впускной : реверсивн.двигатели	11
		Кулачок выхлопной : реверсивн.двигатели	11,35
		Кулачок топливный : реверсивн.двигатели	13,6
	I	Кулачок впускной : не реверсивн.двигатели	5,5
Кулачок выхлопной : не реверсивн.двигатели		5,6	
Кулачок топливный : не реверсивн.двигатели		12,1	
IV	Привод топливного насоса и подшипник распредвала	72	
6	I	Первичное колесо	240
		Промежуточное колесо	96
		Промежуточная шестерня	35
		Промежуточная ось	32
		Колесо на кулачковом валу	82
II III IV	Узел	350	
III	Картер	181	
7	I	Клапан главный /узел/	36
	III	Распределитель	31
8	I	Турбовоздуходувка VTR 400	1000
		Турбовоздуходувка VTR 401	1500
	I	Охладитель для 12 и 14 цилиндров	660
		Охладитель для 16 и 18 цилиндров	930
	II	Патрубок впускного коллектора	-
III	Патрубок выхлопного коллектора	-	
9	-	Реверсирование /узел/	600
10	II	Привод регулятора /узел/	72
	VI	Предельный выключатель /узел/	8
11	II	Водяной насос с валом и шестерней	200
	III	Масляный насос /с шестерней/ реверс.двиг.	415
		Масляный насос /с шестерней/ не реверс.двиг.	300
	IV	Топливоподкачивающий насос	
		- СЕМТ реверсивные двигатели	31,6
		- СЕМТ не реверсивные двигатели	29
	V	- ЛЕЙСТРИЦ* бронзовый реверсивные двиг.	47
		" бронзовый не реверс.двиг.	32
" чугунный реверсивные двиг.		42	
" чугунный не реверс.двиг.		27	

\*Вес одного насоса

Рисунок 68. Данные о массах основных деталей при ремонте

**5 ТАБЛИЦА ВРЕМЕН ДЛЯ МОНТАЖА**

Время каждой нижеуказанной операции нуждается в хорошем доступе к двигателю, в применении спец-инструментов и квалифицированном персонале. Времена операций, отмеченных X считаются с рабочего состояния двигателя.

	Разборка и сборка 2-х выхл.клапанов /крышка цил.на месте/ X			Глава 3
	Разборка и сборка одной форсунки X			Глава 4
	Разборка и сборка 2-х впускн.клапанов /крышка цил.на месте/			Глава 3
	Разборка и сборка крышки цилиндра X			Глава 3
	Разборка и сборка топливного насоса X			Глава 1
	Разборка и сборка вкладыша упорного подшипника /поршень, шатун и противовес на месте/X			Глава 1
	Очистка и замер износа одной втулки			Глава 2
	Смена узла втулка-рубашка /крышка цилиндра и поршень сняты/			Глава 2
	Разборка и сборка поршня с шатуном /крышка цил.снята/			Глава 2
Разборка и сборка вкладыша упорного подшипника /поршень и шатун на месте/ X			Глава 2	

Рисунок 69. Данные о трудоемкости сборочных работ

Это значит, что ежегодные осмотры и контроль, предусмотренные для выполнения через 6000 ч работы двигателя, могут быть произведены в промежутке от 4800 ч до 7200 ч.

Рассеивание износов зависит от таких факторов, как используемое топливо и масло, время работа двигателя на полной мощности, количество пусков, температура воды масел и топлива в период работы и т.п. Поэтому, во избежание ненужных разборок, предусмотрены осмотры и обмеры главных деталей после определенных периодов работы, в течение которых износы стабилизируются.

По линейным характеристикам рекомендовано определять пределы износов LR для основных деталей двигателя, колец и клапанов, подшипников или втулок. В данном двигателе использовано разумное сочетание систем ремонта по плану и по состоянию с использованием диагностики износов основных пар трения.

Из рассмотрения этой инструкции по техническому обслуживанию становится очевидным, что она соответствует требованиям НОТЭ машин, поскольку содержит подробное и иллюстрированное описание конструкции двигателя и всех операций по монтажу — демонтажу узлов, по измерениям износов и прочим атрибутам системы ППР.

#### 4.2.2. Объекты и задачи управления надежностью

Основной целью данного исследования является прогнозирование фактического ресурса до ремонта дизеля с целью корректировки нормативного срока на основании предварительного диагностирования наиболее важного элемента машины. Для решения этой задачи необходимо изучать износы и другие процессы деградации элементов машины, что предусмотрено данным документом. Там имеются бланки для регистрации износов (рис. 71) и простая методика для графического анализа изменения износа и прогнозирования остаточного ресурса детали (рис. 72).

Таблица 24 Напоминание о сроках ТОР блока элементов

Периодичность	Операции
Первые 6000 час. на двух цилиндрах и первые 9000 час. на двух других цилиндрах	Снятие двух штук и контроль: визуальный вкладышей шатуна, визуальный втулок, размеров втулок, <u>зазора двух первых колец и в их канавках, зазора маслосъёмных колец</u>
12 000 час. (а)	На всех цилиндрах: осмотр вкладышей, осмотр втулок, проверка расточки и полировка втулок, <u>замена колец, возможная правка канавок поршня.</u>
24 000 час.	Контроль втулок стойки шатуна, Контроль болтов головки шатуна, Снятие и осмотр цилиндров, замена прокладок низа втулки.

Примечание. Буква (а) означает, что время работы до осмотра всех узлов будет уточнено по заморенным износам во время операций 6000 и 9000 часов.

**3. ТАБЛИЦА ЗАЗОРОВ И ИЗНОСОВ**

Обозначение размеров LA и LR :

LA = допускаемый предел в зависимости от календаря обслуживания

LR = крайний предел действия : исправление или немедленный брак


Между LA и LR деталь может еще работать но может выйти за LR до следующего осмотра.

Потребитель решает заменить детали в зависимости от рабочих условий, цены, доступности и промежутка между осмотрами.

Все величины в мм.

Глава	НАИМЕНОВАНИЕ	LA	LR
1	Вкладыши подшипника: исчезновение слоя олово-свинца на больше 2/3 площади Продольный зазор/подшипник установки		0,4
2	Вкладыши шатуна: исчезновение слоя олово-свинца на больше 2/3 площади Уплотнительн. кольцо : зазор в канавке 1ое компресс. кольцо : зазор в канавке Маслосъемные кольца : зазор у стыка ∅ внутр. втулки стойки шатуна ∅ расточки выемок пальца поршня ∅ расточки втулок на 140мм от верхнего борта Максимальн. овальность втулок	0,35 3,2 0,35 3,1 2,7 170,45 170,07 - -	- - - - - 170,50 170,10 402 0,2
3	Регулировка пусков. зазора клапанов: 1мм Нижние направляющие клапана Верхние направляющие клапана Стержни клапана Втулки пальцев впускн. коромысел Пальцы впускных коромысел Втулки выхлопных коромысел Ось выхлопных коромысел	24,35 24,30 - 60,15 59,95 70,12 70	24,50 24,45 23,70 60,20 59,90 70,20 69,90
5	∅ расточки направляющ. коробок и гильз ∅ наружный направляющих роликов Зазор роликов на их оси/без разборки/	90,15 89,85 0,5	90,25 89,75 -
6	Зазоры зубьев шестерен распределения	0,45	0,60
11	Зубчатый вал топливоподкачивающего насоса Втулки и расточка свободн. шестерни Ось свободной шестерни	21,940 22,025 21,90	21,920 22,040 21,85

Рисунок 70. Допустимые износы и зазоры



## WEAR MEASUREMENT SHEET

of the two first piston rings and the two scrapers rings  
(by mesure of the gap clearance)

1

1/2

---

**INSTALLATION :** .....

**ENGINE N° :** .....


**DATE :** .....

Total running hours : .....

Running hours since the last inspection : .....

---

DIMENSIONS IN 0.01 mm



**RADIAL WEAR CALCULATION (TW)**

TW =  $\frac{A - B}{6.3}$  for vertical gap

TW =  $\frac{(C - D) \cdot 1.4}{6.3}$  for inclined gap

\* Cross out what does not apply

The gap clearance measure is made with the tool described in the overhaul manual

**MAXIMUM GAP CLEARANCE AS NEW IN mm**

ENGINE TYPE	Top ring		2 <sup>nd</sup> ring		Scrapers rings	
	B	D	B	D	B	D
PA_6	2,5		1,3		1,3	
PC2_ PC2.5	2,4		2,1		2,1	
PC3	2,7		2,5	1,9	2,5	
PC4	3,1		3,1		3,1	

---

Cyl N°	Running hours	TOP RING		2 <sup>nd</sup> RING		1 <sup>st</sup> scraper ring		2 <sup>nd</sup> scraper ring		REMARKS
		A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	
A 1										
A 2										
A 3										
A 4										
A 5										
A 6										
A 7										
A 8										
A 9										
A 10										
B 1										
B 2										
B 3										
B 4										
B 5										
B 6										
B 7										
B 8										
B 9										
B 10										
Total and radial wear average in mm/1000h										

Рисунок 71. Бланк для измерений износа колец

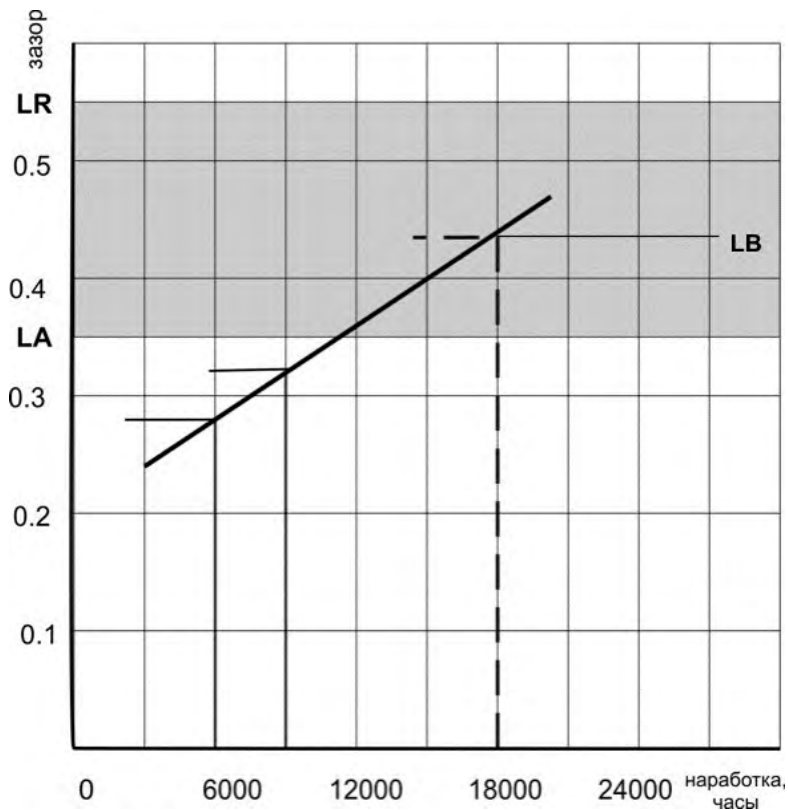


Рисунок 72. Графический анализ износа поршневых колец

Сущность методики управления техническим состоянием дизеля и его элементов по правилам инструкции покажем на примере поршневых колец.

Эта деталь входит в раздел инструкции об обслуживании блока «рубашка – втулка – поршень – шатун».

Интересно отметить оригинальный способ корректировки срока полной разборки и ремонта элементов этого блока через 12000 час, как это показано в таблице 24.

С целью сокращения затрат на ремонт рекомендовано выполнить предварительные измерения износов поршневых колец двух цилиндров сначала через 6000 час, а затем на двух других цилиндрах через 9000 час. По результатам этих замеров предусматривается оценка ресурса до полного ремонта графическим методом (рис. 72). Если, например, это время составит 15000 часов, то осмотр 12000 часов может быть отменен в течение еще 3000 часов.

В следующем параграфе рассмотрим некоторые особенности правил контрольной дефектации колец через 6000 и 9000 часов.

#### 4.2.3. Методика измерения износов поршневых колец

Измерения выполняются без извлечения колец из канавок поршня (рис. 73а), поскольку любая разборка колец влечет их замену, а значит, полировку втулок.

Контролю подлежат два верхних кольца (уплотнительное и компрессионное), во-первых, с целью проверки подвижности кольца в зависимости от сте-

пени нагарообразования (рис. 73*b*), а во-вторых – для измерения зазоров в стыке (рис. 73*c*) и в канавке.

Подвижность колец в канавках проверяется путем нажатия на кольцо в канавку. При этом его поверхность должны выступать в наружном диаметре поршня по всему кругу. В случае чрезвычайного загрязнения, следует проверить качество смазки и условия нагрузки двигателя.

Измерения зазора в канавках двух первых колец выполняют с помощью щупов в нескольких точках по кругу. Зазоры в стыках двух верхних колец и маслоъемного кольца замеряют щупом, сжимая их в специальном приспособлении (рис. 73*c*). Результаты измерений зазоров стыков записываются на листе замеров износа по форме рис. 71. Их необходимо сравнить с допускаемыми величинами уровня LA (см. таблицу 25) и по этим данным назначить ресурс до ремонта путем построения контрольного графика износов (рис. 72).

Таблица 25 Допустимые зазоры для поршневых колец, мм

Измерение	Статус	Первое кольцо	2-е кольцо	Маслоъемные кольца
Зазор в канавке	LA	0.35	0.35	-
Зазор стыка	LA	3.2	3.1	2.7
	LR	4	4	4.0
	L0	2.4	2.1	2.1

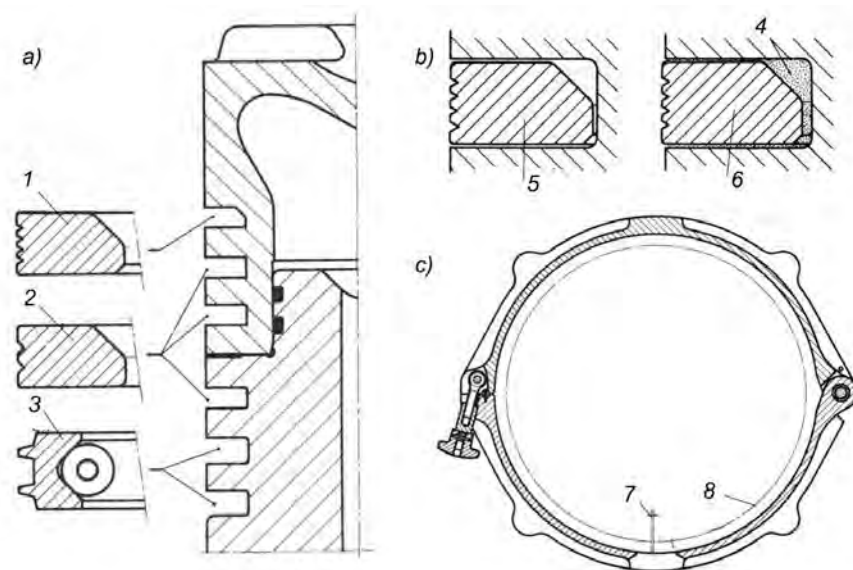


Рисунок 73 Контроль состояния поршневых колец

*a)* Расположение колец: 1 – уплотнительное, 2 – компрессионное, 3 – маслоъемное. *b)* Проверка подвижности кольца: 4 – нагар, 5 – хорошее состояние, 6 – плохое состояние. *c)* Приспособление для измерения зазора в стыке: 7 – зазор, 8 – кольцо в хомуте

Замена поршневых колец на запасные образцы ремонтного размера выполняются, если достигнут один из размеров LA, или обнаружены следующие дефекты. Любые следы трещины, отслаивания или вспучивания хрома первого кольца является основанием для брака. Наоборот, износ легкого медного покрытия компрессионных колец - это нормальное явление. Следует проверить, не поломаны ли кромки маслосъёмных колец ни в одном месте.

Полный осмотр с разборкой всех цилиндров дизеля осуществляется при ремонте, периодичность которого определяется в зависимости от замеренных износов во время операций 6000 час и 9000 час (12000 час, 15000 час и т.д.).

В этом ремонте необходимо выполнять следующие работы:

- замена поршневых колец,
- обработка изношенных канавок колец,
- подобрать кольца ремонтного размера,
- замеры, если нужно, прокладок между юбкой и головкой поршня.
- измерение износа втулки.

В инструкции излагается подробные сведения о выполнении всех операций по сборке – разборке, выполнения измерений и пр. с применением специальных способов и приспособлений. В частности, для изъятия кольца из канавки предусмотрены специальные клещи, а для прижатия колец в канавки при опускании поршня во втулку цилиндра применяется специальный ремень.

Из представленного обзора видно, что инструкция по ТОР дизеля позволяет получить необходимые исходные данные для оценки надежности каждого элемента машины по методике, которая рассматривается далее.

#### 4.2.4. Алгоритмы расчета показателей надежности

К объектам ПИН данного исследования относятся показатели надежности двигателя, определяемые в результате диагностирования поршневых колец. Будем рассматривать два этапа исследований. Первый этап связан с описанным выше диагностированием колец через 6000 и 9000 часов для корректировки назначенного ресурса до ремонта с полной разборкой всех цилиндров  $R_p$ . При этом учитывался предельный износ, который должен находиться в диапазоне между LA и LR (см. рис. 72). На основании анализа уровней предельного состояния на этот график добавили уровень LB по формуле (27).

На втором этапе ставится задача оценки доверительных границ износов при дефектации всех колец двигателя перед их заменой после отработки откорректированного назначенного ресурса. Эта задачу целесообразно решать с целью уточнения нормативов периодичности ремонтов или для изучения влияния различных факторов на надежность. К таким факторам относятся, например, качество изготовления запасных частей на разных предприятиях, уровень квалификации персонала при эксплуатации дизеля на разных судах данного типа, возраст судна и прочее.

Постоянные исходные данные для расчета указанных показателей уже известны. К ним относятся:

характеристика диагностического параметра – зазоры в стыке и канавке,



назначенные ресурсы до соответствующего ремонта в таблице 24, допустимые диагностические параметры в таблице 25.

Одностороннюю доверительную вероятность для коэффициента охвата  $Z = 2$  принимаем равной  $\beta = 97.5\%$ , что соответствует двухсторонней доверительной вероятности  $\beta \approx 95\%$ ,

Для каждого из указанных искомым показателей надежности разработано два алгоритма, которые отличаются друг от друга объемом выборок измерений. Первый алгоритм прогнозирования ресурса имеет только 4 расчетных точки для четырех типов колец.

Объем выборки измерений по второму алгоритму формируется с учетом сведений об измерениях в среднем ремонте (после 12000 или 15000 час) от одного до трех двигателей и 12 цилиндров в каждом дизеле. Следует отметить важнейшую особенность этого алгоритма. Дело в том, что все поршневые кольца в этом ремонте будут заменены на кольца ремонтных размеров, а поэтому после этого ремонта начнется новый цикл эксплуатации с нулевого износа. Это обстоятельство соответствует варианту изучения износостойкости большой выборки не восстанавливаемых изделий.

Оба алгоритма включены в общую программу, составленную в редакторе MATHCAD. Далее будут показаны фрагменты этих программ, поскольку так легче объяснить сущность расчетных процедур.

Теперь рассмотрим первый алгоритма обоснования срока полного ремонта поршневых колец по результатам их предварительной диагностики через 6000 и 9000 часов, идея которой показана на рис. 72. При составлении этой программы пришлось решить несколько вопросов.

Первый вопрос связан с тем, что мы имеем для каждого типа кольца не по одной, а по две точки, которые, строго говоря, не должны совпадать. Во-вторых, прямые, которые, проходят среди этих точек, должны исходить из точки начального зазора  $L_0$  при нулевой наработке с учетом рассеяния интенсивности изнашивания  $TW$ . В третьих, непонятно, почему формула на бланке рис. 71 имеет вид  $TW = (A - B)/6.3$ , а не  $TW = (A - B)/(\text{running hours})$ , что бы в большей мере соответствовало физике явления.

Анализ этих вопросов позволил принять решение о применении в данном случае вероятностную модель типа «Веер» с учетом углового рассеяния интенсивности изнашивания (рис. 74а), а не типа «Тренд» с учетом линейного рассеяния опытных точек (рис. 74б) [32].

$$w_{sk} = w_s + Z \begin{vmatrix} k = -1 \\ k = 0 \\ k = 1 \end{vmatrix} \sigma_w, \quad (48)$$

$$h(t)_k = w_{sk} t + h_0, \quad (49)$$

$$R(h)_k = (h - h_0)/w_{sk}. \quad (50)$$

Переменными исходными данными для первого алгоритма ПИН являются результаты измерения зазоров при 6000 и 9000 часов наработки (четыре точки, принятые условно исходя из рассмотренного принципа) для 4 номеров колец (уплотнительное, компрессионное и 2 масляесъемных). Целью обработки этих данных является получение функций зависимостей (49) и (50): зазора от времени  $h(t)_k$  и, наоборот, – ресурса от зазора  $R(h)_k$  с учетом верхней (при  $k = 1$ ) и нижней (при  $k = -1$ ) доверительной границы интенсивности изнашивания по формуле (48).

В этих формулах  $w_s$  - средняя интенсивность износа,  $\sigma_w$  - СКО интенсивности,  $Z$  - коэффициент охвата, равный 2 – при  $\gamma = 97.7\%$  и 1 – при  $\gamma = 84\%$ . Результаты этих расчетов видны на рис. 74.

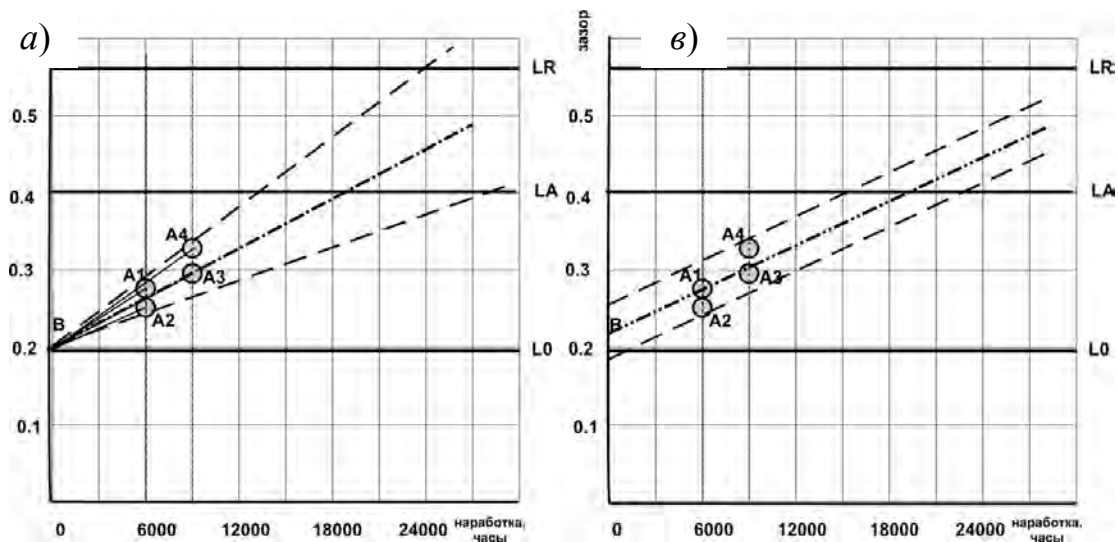


Рисунок 74 Вероятностные модели типа «Веер» (а) и «Тренд» (б), где А1, А2, А3 и А4 - опытные точки при наработках 6000 и 9000 часов, В – нормативная точка при нулевой наработке, L0, LA и LR – указанные выше уровни состояния колец

Основной фрагмент расчета искомых функций приведен на рис. 75, где сначала показаны матрицы с постоянными исходными данными о допустимых уровнях и с переменными данными о результатах измерений зазоров четырех колец. Там же определены уровни состояний L0, LA, LB и LR

Затем были определены средние значения интенсивности изнашивания, ресурса и зазоров, а также искомые функции  $w_{sk}$ ,  $h(t)_k$  и  $R(h)_k$  для построения итоговых матриц с результатами оценки доверительных границ этих величин. Их рассмотрение выявило, что наибольшую интенсивность износа имеет второе (компрессионное) кольцо. Поэтому для корректировки ресурса до планового ремонта далее выполнялся расчет показателей именно для этого кольца.

Результаты расчета доверительных границ зазоров при наработке 15 тыс. час и ресурсов при LA = 3.6 мм (рис. 76), которые определены для двух коэффициентов охвата  $Z = 2$  и  $Z = 1$ . Эти результаты подтверждают заключение о возможности переноса ремонта с 12000 час на 15000 час.

### ОЦЕНКА НАЗНАЧЕННОГО РЕСУРСА ПО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Нормы взоров	наработка до измерений	Результаты измерений
$NO = \begin{pmatrix} 0 & "k1" & "k2" & "k3" & "k4" \\ "IA1" & 0.35 & 0.35 & 0 & 0 \\ "LA2" & 3.2 & 3.1 & 2.7 & 2.7 \\ "LR" & 4 & 4 & 3.7 & 3.7 \\ "LO" & 2.4 & 2.1 & 2.1 & 2.1 \end{pmatrix}$	$z := \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 9 \\ 9 \end{pmatrix}$	$ZZ = \begin{pmatrix} "Нараб" & "k1" & "k2" & "k3" & "k4" \\ "6000" & 2.8 & 2.7 & 2.4 & 2.4 \\ "6000" & 2.78 & 2.65 & 2.35 & 2.4 \\ "9000" & 2.9 & 2.9 & 2.55 & 2.55 \\ "9000" & 2.91 & 2.85 & 2.55 & 2.6 \end{pmatrix}$

**Контрольный ресурс**  $Rk := 15$

Интенсивность износа	Ресурс	зазор при тестовом ресурсе
$xx_{j, \text{jjj}} := \frac{zz_{j, \text{jjj}} - \text{norm}_{4, \text{jjj}}}{z_j}$	$Rs_{j, \text{jjj}} := \frac{\text{norm}_{2, \text{jjj}} - \text{norm}_{4, \text{jjj}}}{xx_{j, \text{jjj}}}$	$Hh_{j, \text{jjj}} := Rk \cdot xx_{j, \text{jjj}} + \text{norm}_{4, \text{jjj}}$

$w_{\text{jjj}} := \text{mean}(xx^{\langle \text{jjj} \rangle})$	$w^T = (0.061 \ 0.091 \ 0.048 \ 0.051)$	$\sigma_{\text{jjj}} := \text{Stdev}(xx^{\langle \text{jjj} \rangle}) \quad \text{СКО}$
--	---	---

BA := ("знак" "Макс" "Сред" "Мин" )

### Первый вариант расчета ресурса до полного ремонта по средней износостойкости

Восстанавливаем уровни состояний

$LA := \text{norm}_{2, 2}$	$L0 := \text{norm}_{4, 2}$	$LR := 2 \cdot LA - L0$	$LB := 0.5 \cdot (LR + LA)$
$LA = 3.1$	$L0 = 2.1$	$LR = 4.1$	$LB = 3.6$

коэффициент охвата  $Z := 2$       два клика!

Знак дисперсии	$Aa := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$h := LB$	$kk := 1..3$ для номера кольца	$k := 2$
----------------	--	-----------	--------------------------------	----------

Функция интенсивности износа  $ws_{\text{jjj}} := w_{\text{jjj}} + Aa \cdot Z \cdot \sigma_{\text{jjj}}$

Ресурс при известном зазоре	Зазор от наработки	для средней линии
$Rsr(h, \text{jjj}) := \frac{h - \text{norm}_{4, \text{jjj}}}{ws_{\text{jjj}}}$	$ha(t, \text{jjj}) := t \cdot ws_{\text{jjj}} + \text{norm}_{4, \text{jjj}}$	$haa(t, k) := t \cdot w_k + \text{norm}_{4, k}$

$(Ha_{kk, \text{jjj}}) := ha(Rk, \text{jjj})_{kk}$       Изн := augment(BA<sup>T</sup>, stack(Oo, Ha))       $\sigma_k = 6.944 \times 10^{-3}$

$Res_{kk, \text{jjj}} := Rsr(h, \text{jjj})_{kk}$       PEC := augment(BA<sup>T</sup>, stack(Oo, Res))

Рисунок 75 Фрагмент расчета параметров функции износа от времени

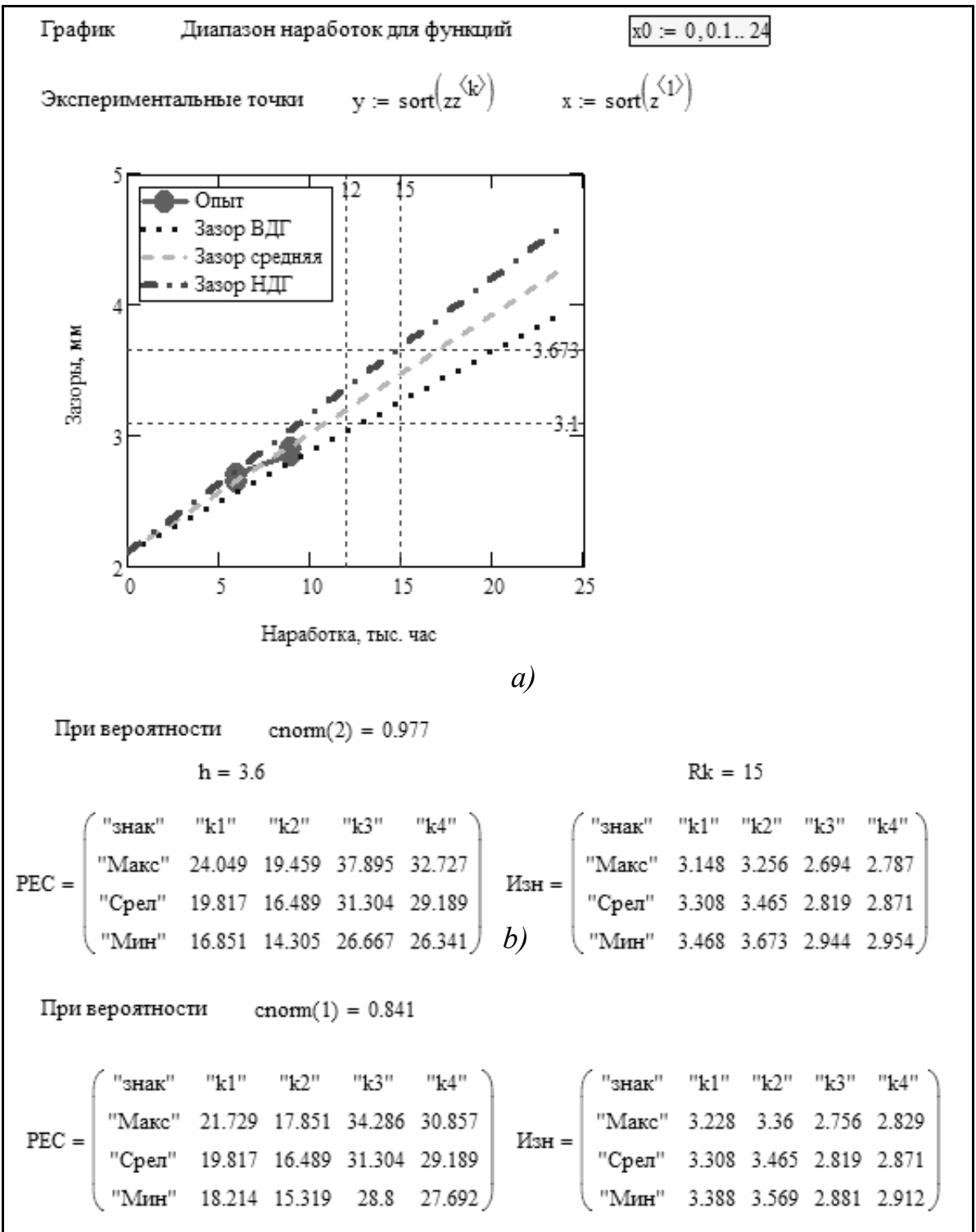


Рисунок 76 Результаты расчета функций изменения зазора в стыке поршневых колец от времени по вероятностной модели типа «Веер»: *a* – для коэффициента охвата  $Z = 2$  ( $\gamma = 97.7\%$ ) и *b* - для коэффициента охвата  $Z = 1$  ( $\gamma = 84.1\%$ )

**Второй вариант - рассматривается линейная функция параметры которой определяются МНК**

Экспериментальные точки при  $k = 2$   $x^T = (6 \ 6 \ 9 \ 9)$   $y^T = (2.65 \ 2.7 \ 2.85 \ 2.9)$

Оператор линейной регрессии

$$a := \text{line}(x, y)$$

$$a = \begin{pmatrix} 2.275 \\ 0.067 \end{pmatrix}$$

СКО по оси y

$$\sigma_y := \sqrt{\text{Var}(y) \cdot (1 - R_{xy}^2)}$$

$$\text{Var}(y) = 0.014 \quad \sigma_y = 0.029$$

Линейная функция зазора от времени

$$Y(X) := a_1 + a_2 \cdot X + 0$$

$$Z = 2$$

$$\gamma = 0.977$$

$$\beta = 0.954$$

Линейная времени от зазора

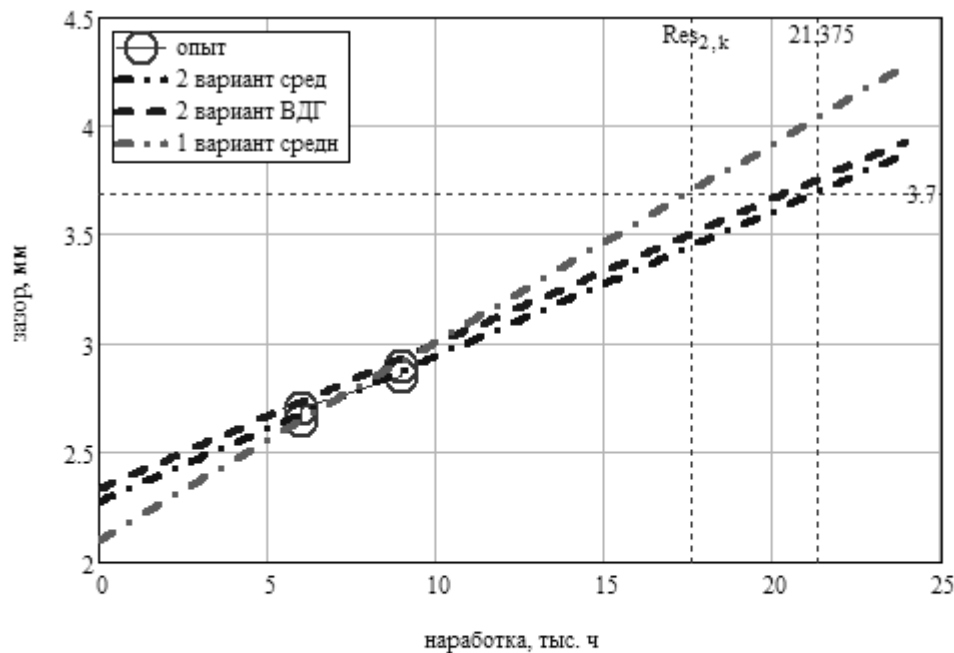
$$R_0(h) := \frac{h - a_1}{a_2}$$

$$\text{corr}(y, Y(x)) = 0.97$$

с доверительными границами

$$Ya(X) := Y(X) + Z \cdot Aa \sigma_y$$

$$Ra(h) := R_0(h) - \frac{Z \cdot Aa \sigma_y}{a_2}$$



$$\text{norm}_{2,k} = 3.1$$

$$\text{norm}_{3,k} = 4$$

$$ha(15, k) = \begin{pmatrix} 3.256 \\ 3.465 \\ 3.673 \end{pmatrix}$$

$$Ya(15) = \begin{pmatrix} 3.217 \\ 3.275 \\ 3.333 \end{pmatrix}$$

Рисунок 77 Второй вариант корреляции по вероятностной модели тип «Тренд»

В этом случае обеспечивается безопасная работа колец, поскольку диапазон доверительных границ зазоров 3.256...3.673 больше  $LA = 3.1$  мм, но меньше и  $LR = 4$  мм и соответствует уровню  $LB = 3.6$  мм с высокой двухсторонней вероятностью  $\beta = 1 - 2(1 - \gamma) = 1 - 2(1 - 0.977) = 0.954 \approx 95\%$ .

Для сравнения покажем второй вариант измерений зазоров путем линейной корреляции с применением метода наименьших квадратов для получения уравнения регрессии вида (51) (фрагмент на рис. 77).

$$h(t)_k = a + bt + Z \begin{vmatrix} k=-1 \\ k=0 \\ k=1 \end{vmatrix} \sigma_h, \quad (51)$$

$$R(h)_k = \frac{h-a}{b} - Z \begin{vmatrix} k=-1 \\ k=0 \\ k=1 \end{vmatrix} \frac{\sigma_h}{b}. \quad (52)$$

Для оценки постоянных  $a$  и  $b$  методом наименьших квадратов с помощью векторов измерений  $x_i - y_i$ , в редакторе MATHCAD имеется простейший оператор (53).

$$\text{line}(x, y) = \begin{vmatrix} a \\ b \end{vmatrix}, \quad \text{где} \quad (53)$$

$$a = \text{line}(x, y)_1, \quad b = \text{line}(x, y)_2.$$

Это соответствует вероятностной модели типа «Тренд», применение которой показано на фрагменте рис. 77. Приведенный на рисунке график изменения зазора от времени позволяет отметить меньшую эффективность этого варианта корреляции по сравнению с моделью типа «Веер». Во-первых, в данном случае постоянная величина,  $a$ , в принципе, может сильно отличаться от естественного монтажного зазора  $h_0$ , поскольку она принята постоянной величиной. Во-вторых, линии доверительных границ идут параллельно средней линии при постоянной погрешности отклонения, что не создает достаточного запаса надежности по сравнению с первым вариантом корреляции.

Поэтому, в данном случае наблюдается меньший разброс случайных зазоров при одном и том ресурсе 15000 часов: 3.217...3.333 мм против 3.256...3.673 мм, хотя они тем более не выходят за границы LR = 4 мм. При этом появляется соблазн сместить полный ремонт на еще большую величину (например, установить 20000 часов), что опасно с учетом малой выборки переменных данных.

#### 4.2.5. Результаты ПИН

Таким образом, в первом алгоритме преимущество имеет вероятностная модель типа «Веер». Однако в следующем, втором алгоритме для оценки гамма-процентного ресурса двигателя применена модель типа «Тренд», поскольку обмер 48 колец выполнялся не только во время ремонтов, но и при нулевой наработке после периода приработки (в отличие от первого алгоритма).

Информация о расчете параметров  $a = Ad_1$  и  $b = Ad_2$  уравнения регрессии методом наименьших квадратов по оператору (53) дана на фрагменте рис. 78, а на рис. 79 приведены графические результаты этих расчётов.

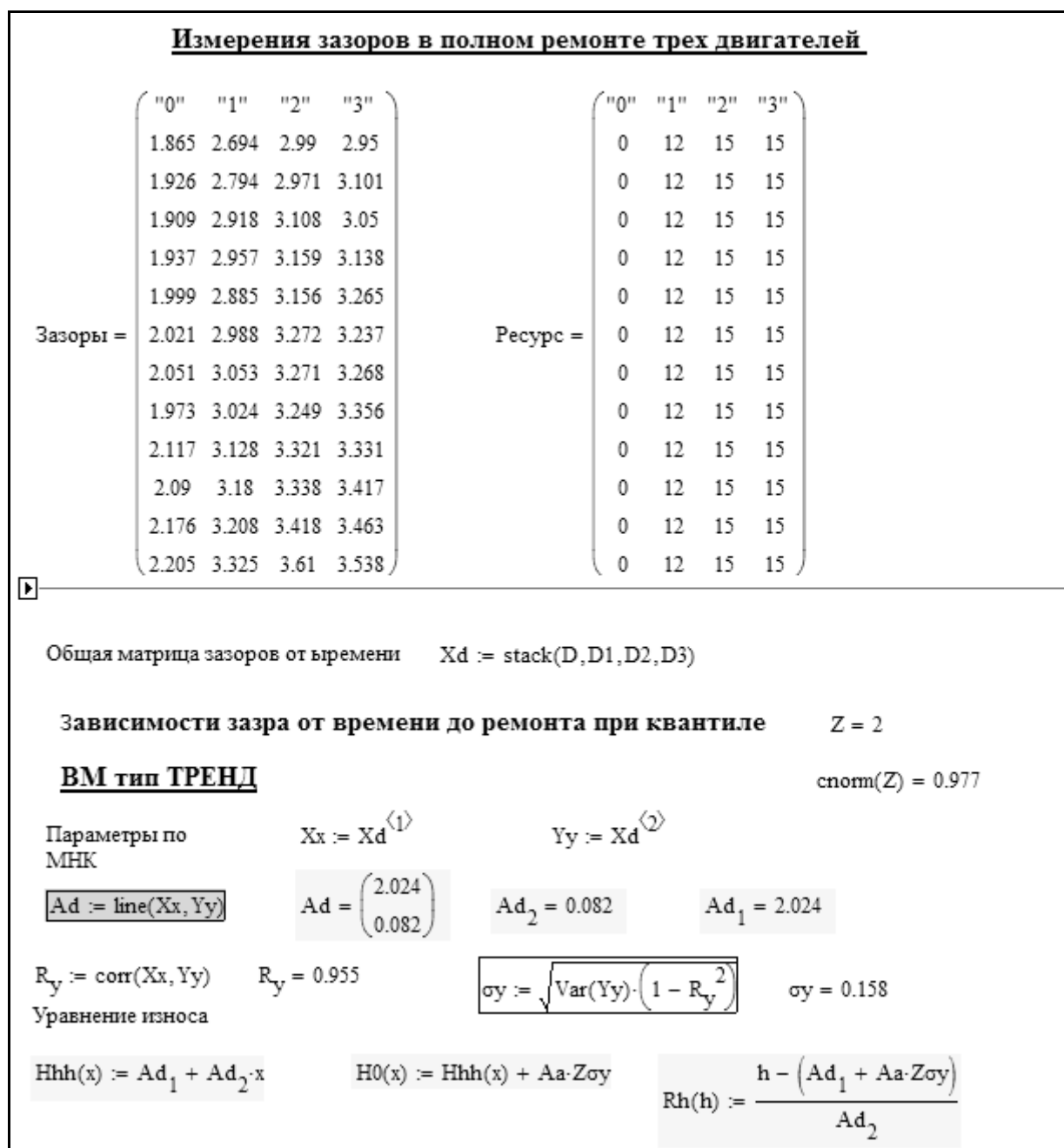


Рисунок 78 Измерение зазоров всех колец трех двигателей при полных ремонтах

Из графиков рис. 79a и 79b, а также из таблицы 26 видно влияние коэффициента охвата на диапазон доверительных границ. Так при ресурсе 15000 часов для  $Z = 1$  имеем диапазон 3.093...3.41 мм, а для  $Z = 2$  он составляет 2.935...3.569 мм, что также не выходит за пределы  $LR = 4$  мм с высокой вероятностью 97.7%.

Более того, этому условию отвечают даже зазоры 3.747 мм при  $Z = 3$  ( $\gamma = 99.865\%$ ), что соответствует вероятностным графикам на рис. 79c и 79d. Таким

образом, подтверждается назначение ресурса до полного ремонта 15000 часов взамен 12000 часов.

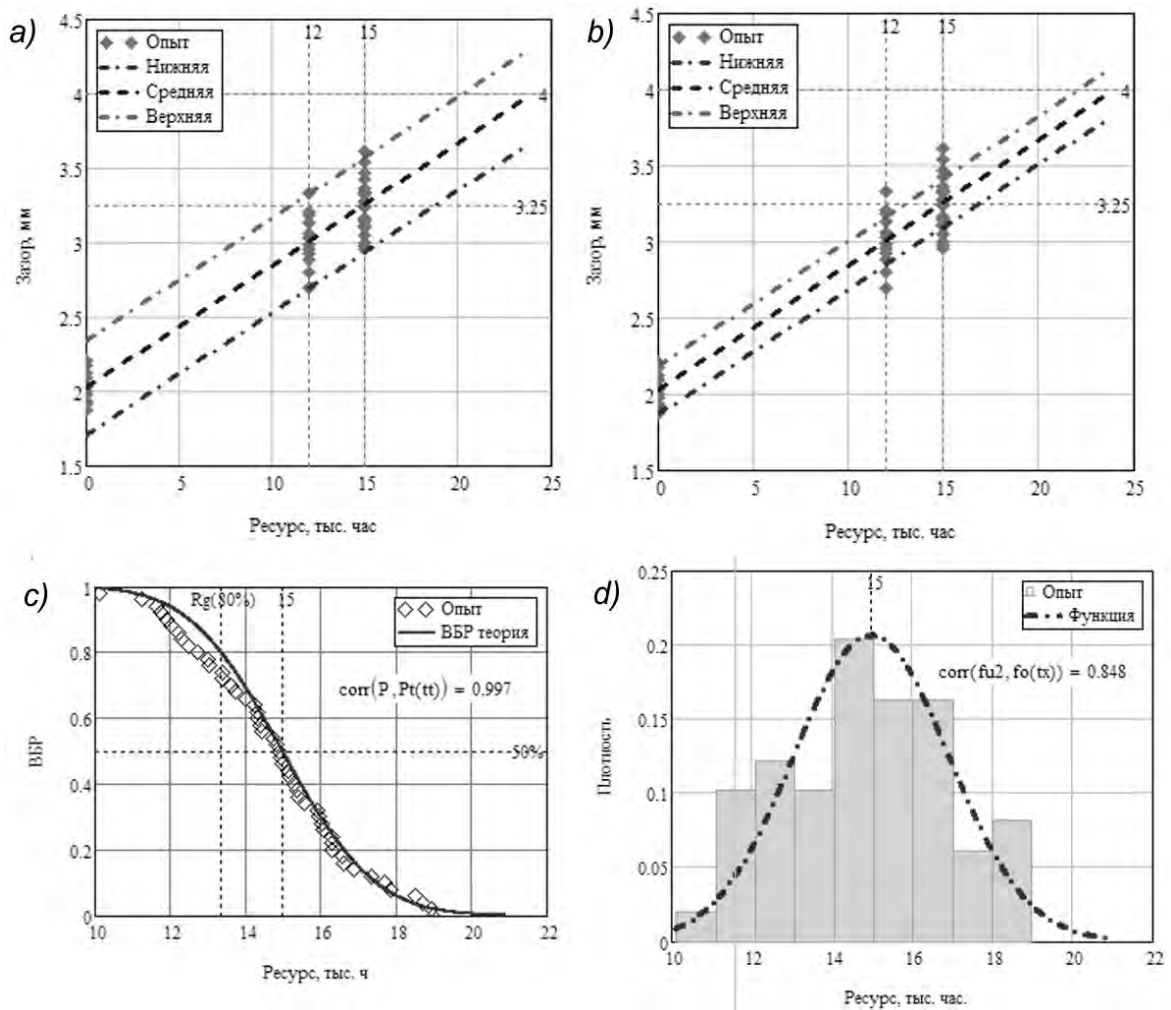


Рисунок 79 Графики измерения зазоров всех колец трех двигателей: модели типа «Тренд» при  $Z = 2$  (a) и при  $Z = 1$  (b), вероятностные графики ВБР (c) и плотности распределения (d)

Таблица 26 Диапазон рассеяния зазоров колец после наработки до ремонтов

Ресурс, часы	$Z$	$\gamma$	Линии для зазоров (мм)		
			"Нижняя"	"Средняя"	"Верхняя"
15000	1	84%	3.093	3.252	3.41
	2	97.7%	2.935	3.252	3.569
12000	1	84%	2.848	3.006	3.165
	2	97.7%	2.689	3.006	3.323

Полученные результаты можно положить в основу более уверенного планирования нового цикла ТОР после замены всех колец через 15000 по номенклатуре работ ремонта через 12000 часов.



### 4.3. Управление надежностью типовой машины при системе ППР

#### 4.3.1. Предисловие

При управлении надёжностью машин с системой ППР необходимо определять не только показатели безотказности в период между плановыми ТОР, но и показатели долговечности для обоснования или корректировки нормативов ТОР, включая, межремонтные периоды. В основе подхода к управлению надёжностью таких машин лежит принцип зависимости срока службы (или назначенного ресурса) до каждого вида ТОР машины (ТО, текущего, среднего и капитального ремонта и т.д.) от показателя долговечности соответствующих элементов машины (гамма – процентного ресурса). Этот показатель формируется под влиянием тех или иных постепенных процессов деградации состояния элементов с возрастающей интенсивностью отказов и его надо рассчитывать для соответствующей вероятности не достижения предельного состояния  $\gamma$ .

В наиболее развитых отраслях промышленности (автомобилестроение, самолётостроение, тепловозостроение и т.д.) такие проблемы решаются путем специальных экспериментально-расчётных исследований на этапе проектирования, хотя, возможно, что не все изготовители способны проводить такую работу. Тем не менее, все поставщики рассматриваемых типов машин обязаны тем или иным способом разрабатывать и представлять потребителям нормативную и руководящую документацию, содержащую перечни (графики) с последовательностью и распределением работ по видам ТОР за весь срок службы, которые должны строго соблюдаться при эксплуатации. В частности, такими документами являются руководство или инструкция с описанием технологии ТОР и сведениями о критериях оценки предельного состояния элементов машины (например, о нормах износов и других диагностических параметрах).

Эти документы являются источником постоянных исходных данных, которые позволяют управлять НОТЭ конкретной машины при системе ТОР по плану и по состоянию. Получение же необходимого объема переменных исходных данных об отказах и повреждениях типовой машины является более сложной проблемой для исполнителей ПИН. Возможно несколько вариантов получения этих данных.

Первый вариант заключается в управлении надёжностью конкретных машины силами обслуживающего персонала. Такой подход можно совместить с системой управления активами и ТОР по сервису портала ТРИМ.

Второй вариант, предназначен для управления надёжностью изготовителем машины данного типа путем накопления большого объема информации через сервисные службы ТОР этого изготовителя.

Третий вариант, пригоден для корректировки нормативов ТОР по отраслевым программам или заявкам владельцев ОКН при умеренном объеме качественной информации, получаемой исполнителем путем наблюдения за группой подконтрольных машин одного типа.

Четвертый вариант, можно применять для оценки надежности элементов машины при малом объеме качественной информации, получаемой исполнителем путем стендовых испытаний 1 - 3 подконтрольных машин и т.д.



Рисунок 80 Общая схема ПИН при плановых ТОР

На рис. 80 показаны основные этапы ПИН с целью оценки искомых показателей надежности с использованием постоянных и переменных исходных данных по методике, которая в принципе является общей для всех вариантов получения переменных исходных данных. К показателям надежности машин при плановой системе ремонта относятся назначенные ресурсы до ремонтов и интенсивности отказов между ремонтами. Для обоснования назначенных ресурсов в методике предусмотрены расчеты средних и гамма – процентных ресурсов для основных процессов деградации элементов машины.

В этой главе будет рассмотрен проблема ПИН машины с плановой системой ТОР, которая также относится к истории организации ТОР машин в одной из отраслей народного хозяйства СССР в период 1960...1990 годов. Будут рассмотрены методы ПИН при плановых ремонтах двигателей судов флота рыбной промышленности по третьему варианту получения исходных данных. Информация для этой главы взята из книг [32...37].

#### 4.3.2. Особенности технической эксплуатации флота рыбной промышленности Союза ССР

Незадолго до своего развала в Советском Союзе в течение 20 лет был создан самый мощный в мире флот рыбной промышленности. Он включал в себя суда различного класса и назначения. Основу его составляют добывающие суда прибрежного и океанического промысла, предназначенные для добычи рыбы, морепродуктов и морского зверя. Экспедиционная форма ведения промысла в удаленных районах Мирового океана обусловила создание другой важной группы судов — приемно-транспортных, транспортных рефрижераторов и плавбаз, которые предназначены для снабжения добывающих судов, приемки от них сырья или готовой продукции и доставки его на берег. В составе промыслового флота входили также производственные рефрижераторы, рыбодобывающие и крабодобывающие заводы и рыбодобывающие базы, которые осуществляют обработку сырья в районе промысла.

Суда промыслового флота отличаются от судов морского транспортного флота не только наличием на борту дополнительного специального оборудования, но и более жесткими режимами эксплуатации. Например, характерными режимами работы траулера на промысле являются: поиск рыбы, работа с орудиями лова, собственно траление, переходы к плавбазам и стоянка у плавбаз. Вместе с тем любое промысловое судно остается и обычным транспортным средством для доставки экипажа и грузов в районы промысла и на берег, а также для длительного проживания и работы людей.

Для обеспечения энергией судового оборудования на всех режимах его использования суда имеют энергетическую установку, которая в общем случае состоит из главной установки, электростанции, паровой установки, систем, магистралей хранилищ рабочих тел. В качестве основного привода главной установки и электростанции используются дизели. Такую энергетическую установку можно условно назвать дизельной (ДУ).

Для объективной оценки режимов работы дизелей применяются следующие показатели: средняя наработка за сутки эксплуатации  $t_c$ , средняя наработка за календарный год  $T_r$ , средние наработки за сутки перехода  $t_{пер}$  и промысла  $t_{пр}$ , средние относительные нагрузки за время переходов  $N_{пер}$  и промысла  $N_{пр}$ , а также их коэффициенты вариации  $V_{пер}$  и  $V_{пром}$ . Статистические данные об этих показателях приведены в таблице 27.

Суда промыслового флота отличаются большим разнообразием типов ДУ и комплектующего их оборудования [34]. Например, на добывающих судах среднего водоизмещения в 50-х годах устанавливались ДУ с четырехтактными тихоходными дизелями с прямой передачей на винт фиксированного шага (ВФШ). С начала 60-х годов на промысловый флот поступают средние морозильные траулеры (СРТМ), которые имеют четырехтактные главные двигатели, работающие при 300—375 об/мин непосредственно на гребной винт регулируемого шага (ВРШ).

В начале 70-х годов парк средне тоннажных добывающих судов пополнился сейнерами-траулерами типа «Альпинист». ДУ этих судов представляет собой дизель редукторный агрегат с одним главным двигателем типа 8NVD-48.2AU

мощностью 972 кВт при 428 об/мин, который соединен посредством упругой муфты с главным редуктором и работает на ВРШ. С главным редуктором соединен раздаточный редуктор для привода четырех навешанных генераторов. Установка работает при постоянной частоте вращения, а режимы работы судна обеспечиваются за счет поворота лопастей ВРШ.

Увеличение мощности и сложности ДУ были характерны и для судов большого водоизмещения.

Приведенные данные характеризуют далеко не все суда промыслового флота и применяемые на них типы ДУ и дизелей. Однако даже по такому краткому обзору можно судить о том, как за сравнительно короткий срок (20—25 лет) резко возросла общая мощность и сложность ДУ. За этот период произошёл переход от сравнительно малонагруженных дизелей (среднее эффективное давление  $P_e = 0.4 \dots 0.5$  МПа; средняя скорость поршня  $C_m = 4 \dots 5$  м/с) к форсированным среднеоборотным дизелям ( $P_e = 1,3 \dots 2,3$  МПа и  $C_m = 7 \dots 9$  м/с).

Таблица 27 Статистические данные о режимах работы судовых дизелей

Показатели использования главных двигателей	Транспортные и производственные рефрижераторы, плавбазы и др.		Рыболовные суда на траловом промысле		Рыболовные суда на кошельковом промысле	
	Дальневосточный бассейн Западный	Западный, Северный и Южный бассейны	С ВФШ	С ВРШ	с ВФШ	с ВРШ
$t_c, \text{ч/сут}$	8	15	19—21	20—22	13—17	15—18
$t_{\text{пер}}, \text{ч/сут}$	24	24	24	24	24	24
$t_{\text{пром}}, \text{ч/сут}$	1—3	10-12	17—20	18—21	9—15	12—16
$T_{\text{год}}, \text{ч/год}$	2300	4500	5000— 5700	5500— 6000	3500— 4500	4000— 5000
$N_{\text{пер}}, \%$	93—98	93—98	93—98	93—98	93—98	93—98
$N_{\text{пром}}, \%$	10—15	40—50	40—70	85—90	25—30	25—30
$V_{\text{пер}}, \%$	8—15	8—15	8—15	8—15	8—15	8—15
$V_{\text{пром}}, \%$	40—60	40—60	40—80	40—80	30—80	30—80

Отмеченные тенденции повышения эффективности использования судов путем форсирования и усложнения дизельных установок негативно отразились на других показателях качества и прежде всего на показателях надежности ДУ и затратах на ТОР с учетом стоимости запасных частей и приспособлений (ЗИП), что требует принимать меры по повышению прочности и износостойкости деталей машин. Решение этой проблемы не ограничивается только сферой проектирования и изготовления. Не меньшее значение имеет изучение фактической надежности при эксплуатации машин, и разработка на этой основе прогрессивных нормативов ТОР и требований к качеству нового оборудования.

Масштабная работа в этом направлении была организована на отраслевом уровне в рамках целевой комплексной программы «Ремонт» по созданию системы непрерывного технического обслуживания и ремонта (СНТОР). Цель со-

здания СНТОР – повысить коэффициент технического использования судов за счет переноса части объема заводских ремонтов в сферу эксплуатации. Организацией этой работы в масштабах отрасли занимались Гипорыблфлот и бассейновые ЦПКБ (1965 – 1990 годы) по заданию Министерства рыбного хозяйства (МРХ). Примерная структура рыбной отрасли в указанный период истории показана на рис. 81. Естественно, что с развалом СССР указанная структура так же развалилась, но для тематики нашей книги это не имеет значения, поскольку нам важно показать реальный пример организации ПИН машин.

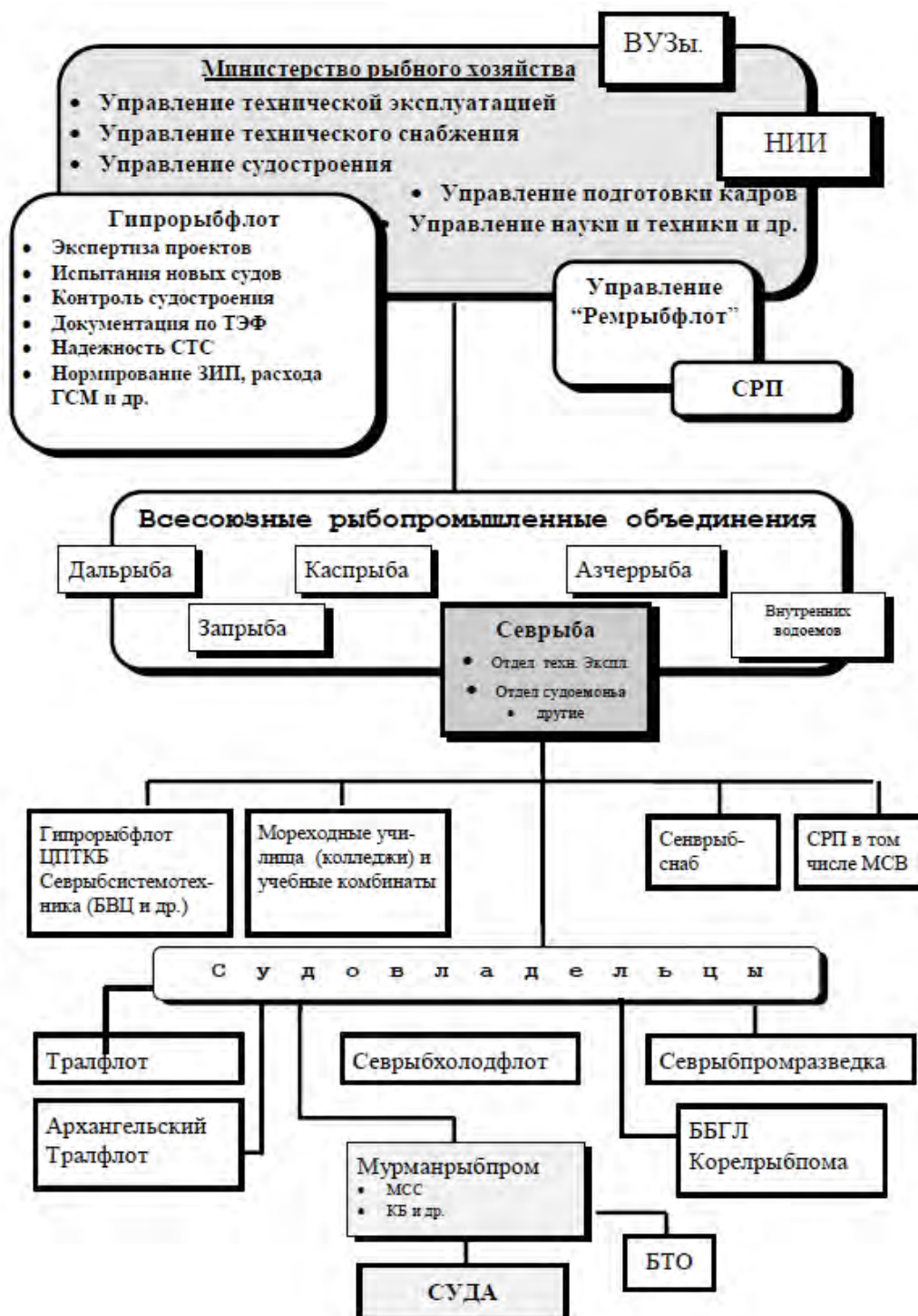


Рисунок 81 Структура организаций МРХ до 1990 года



Рисунок 82 Сейнер – траулер проекта 503

О масштабе деятельности проектных организаций можно судить по следующему перечню типовой документации по СНТОР, разрабатываемой ими на весь нормативный срок службы для многочисленного парка серийных и не серийных судов промыслового флота. К такой документации можно отнести:

сводный график ТО и ремонтов судна на нормативный срок службы (основной документ); типовые ведомости работ по ТО и ремонту технических средств; документы для ремонта судна согласно РНД 15-054—82 «Документация организационная для ремонта судов флота рыбной промышленности»; сводную ведомость годовой потребности в запасных частях, арматуре и материалах, необходимых для производства работ по ТО и ремонту судовых технических средств; ведомость заменяемого оборудования и прочее.

Учитывая различные условия и режимы эксплуатации одного и того же оборудования на судах разных типов, при разработке указанных документов приходилось изучать надежность этого оборудования с учетом требований Морского Регистра судоходства (Руководство по техническому надзору за судами в эксплуатации и др.) и отраслевой методики по надежности [33].

Рассмотрим методику обоснования ресурсов машины с плановой системой ремонтов на примере главного двигателя траулера проекта 503.

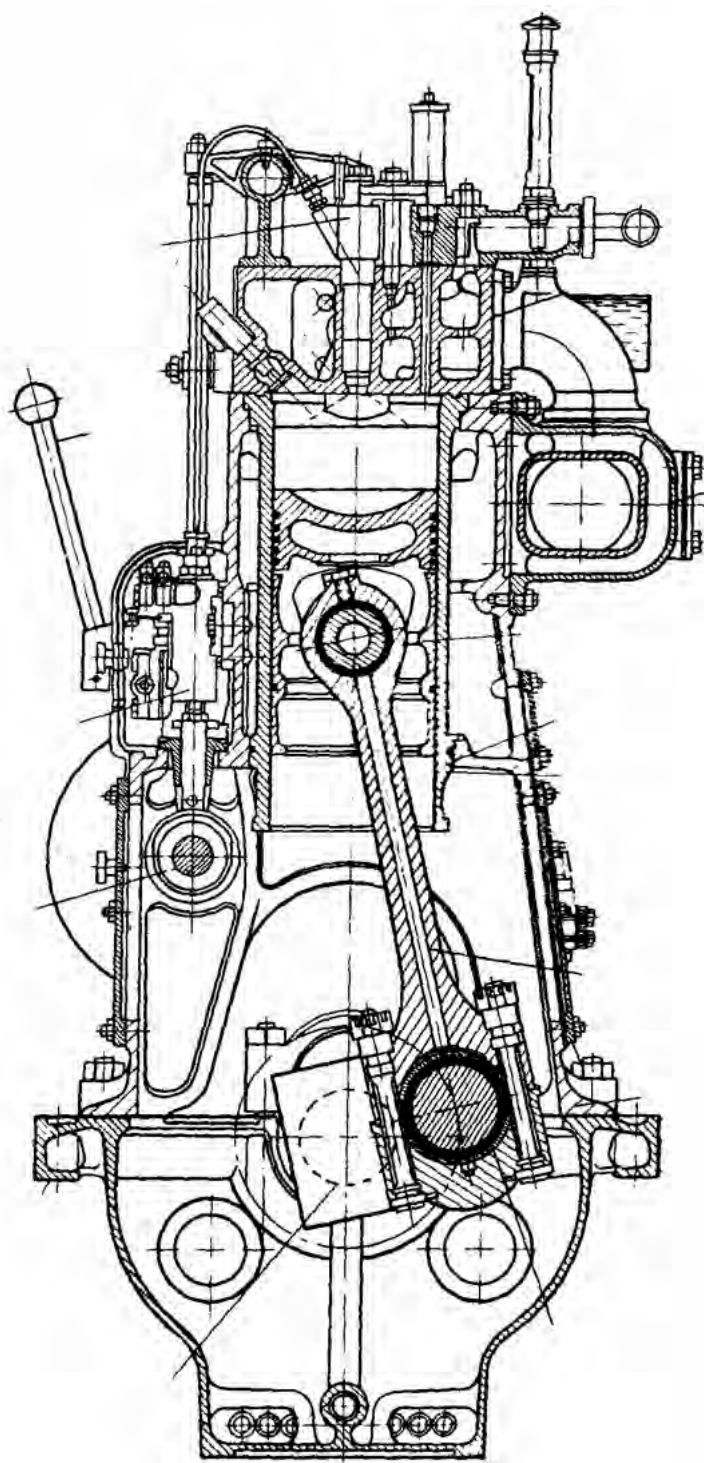


Рисунок 83 Двигатель 8NVD48 AU

Таблица 28 Назначенные ресурсы и предельные износы основных элементов двигателя 8NVD48AU

Шифр	Виды ТОР по системе ППР	ТО2 6 тыс. час.		Текущий 12 тыс. час.		Средний 24 тыс. час		Капитальный 48 тыс. час.	
		ho, мм	hd, мм	ho, мм	hd, мм	ho, мм	hd, мм	ho, мм	hd, мм
<b>1 Поршень - втулка цилиндров:</b>									
2.1	износ зеркала цилиндров, диаметр/эллипс,					0	2,1/0.7	0	2,1/0.7
2.2	износ поверхности юбки поршня,					0	0,25	0	0,25
2.3	зазор между втулкой и поршнем,					0,25	1,2	0,25	1,2
2.4	зазор в головном подшипнике,					0,15	0,3	0,15	0,3
2.5	зазор в замке первого кольца,	1,5	5,1	1,5	5,1	1,5	5,1	1,5	5,1
2.6	зазор в кепе первого кольца,	0,06	0,6	0,06	0,6	0,06	0,6	0,06	0,6
2.7	износ по высоте первого кольца.	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4
<b>2 Коленчатый вал - подшипники</b>									
2.1	износ шеек коленчатого вала,							0	0,15
2.2	зазор в шатунных подшипниках,			0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
2.3	зазор в рамовых подшипниках.			0,1	0,25	0,1	0,25	0,1	0,25
<b>3 Крышка цилиндров - клапана</b>									
3.1	зазор между штоком и втулкой			0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
3.2	износ тарелки клапана.			4	2	4	2	4	2
<b>4 Распределительный вал и привод газораспределения:</b>									
4.1	зазор в подшипниках вала					0,1	0,27	0,1	0,27
4.2	зазор у коромысла клапанов,	0,07	0,25	0,07	0,25	0,07	0,25	0,07	0,25
4.3	зазор в зубьях шестерен привода					0,2	0,8	0,2	0,8
4.4	износ кулачков распредвала.					0	0,14	0	0,14



### 4.3.3. Задачи ПИН судового дизеля

Рассматриваемый случай относится к исследованию надёжности на отраслевом уровне, когда Заказчиком является министерство, а основным исполнителем – проектные организации отрасли при участии служб владельца ОКН (судна). Главная цель этой работы заключается в совершенствовании документации по ТОР судов при условии соблюдения требований по безопасности эксплуатации, то есть – по надёжности. ОКН, в данном случае, является траулер проекта 503 (рис. 82). Типовой машиной служит главный двигатель 8NVD48AU мощностью 1320 л. с. при 428 об/мин (рис. 83). Ремонтный цикл двигателя, согласно руководству по его эксплуатации, отражен в таблице 28, где даны сведения о назначенных ресурсах двигателя до ремонтов и соответствующие им предельные износы и зазоры основных узлов машины [57].

Задача исследования заключается в корректировке ремонтного цикла этого двигателя в связи с изменением правил Регистра по освидетельствованию морских судов [52], так как ремонтный цикл с кодом «1 1 6 8» на рис. 15 соответствует четырёхлетнему сроку очередного освидетельствования, а по новым правилам этот срок увеличен до 5 лет. При этом доковое освидетельствование должно выполняться примерно через каждые 2.5 года. В таблице 29 показано сравнение этих ремонтных циклов, где для судна межремонтные периоды указаны в годах, а для двигателя – в тысячах часов.

Из таблицы 29 следует основная задача исследования – проверить возможность безопасного увеличения межремонтного периода двигателя до значений его наработки за межремонтный период судна.

Таблица 29. Ремонтные циклы судна и двигателя

Судно				Двигатель			
Вид ТОР	Исполнитель	Срок, лет		Вид ТОР	Основные детали	Ресурс, тыс. час.	
		был	надо			было	надо
МРТО	Экипаж	0.5	0.5	ТО1	Форсунки	3	3.5
РМРТО1	БТО	1	1	ТО2	Кольца	6	5 - 6
РМРТО2	Док	2	2.5	ТР	Подшипники	12	15
СР	СРЗ	4	5	СР	Цилиндры	24	30
КР	СРЗ	8	10	КР	Коленвал	48	60

Решение поставленной задачи заключается в оценке гамма – процентных ресурсов деталей и узлов по данным о дефектации элементов машины при выполнении ТОР на примере рамовых подшипников дизеля.

Возможны различные формы организации такой исследовательской работы. Первый вариант заключается в запросе информации от владельцев со всех судов данного типа на бумажных или электронных бланках. Сразу можно сказать, что попытки применить такую форму обречены на провал.

Более эффективная форма заключается в получении, систематизации и обработки информации сервисными службами изготовителя машины в его инте-

ресах. Но владельцам ОКН (судов) результаты таких исследований, как правило, будут недоступны и не пригодны для корректировки ТОР.

Третья форма относится к сбору информации из ремонтной документации силами исполнителя (например, кафедрой ВУЗа) путем командировок на предприятия владельцев ОКН. Такой путь вряд ли можно считать эффективным даже при условии заключения хоздоговоров, поскольку это связано с качеством отчетной документации и не заинтересованности работников предприятий допускать к анализу документов посторонних лиц.

Можно предложить следующую оптимальную форму получения более или менее достоверной информации о надежности машины исследуемого типа. Работу рекомендуется выполнять по договору с владельцами ОКН силами специалистов исполнителя (бассейновое ЦПКБ, ВУЗ и прочее) в содружестве с механиками подконтрольных судов в количестве 5 – 6 ед.

Работа должна проходить по согласованной программе, содержащей следующие разделы: цели и сроки работы, перечень подконтрольных машин, учетные и отчетные документы и формы для регистрации повреждений и отказов, обязанности исполнителей со всех сторон договора и прочее.

Целесообразно предусмотреть следующие основные этапы работы. На первом этапе определяются подконтрольные суда и назначаются ответственные лица со стороны ОКН. Затем, службы надёжности исполнителя проводят экспертный опрос опытных специалистов с целью предварительной оценки качества машин по заведениям судов данного типа и уточнения дальнейшего исследования. На третьем этапе организуется регулярная передача информации об измерениях износов и дефекта через интернет (электронную почту) от ОКН в службу надёжности исполнителя для обработки. Продолжительность этой работы, как правило, состоит из двух годовых отчётных периодов. В тот же период, в порядке выполнения четвёртого этапа, специалисты службы надёжности исполнителя периодически наблюдают за ТОР на месте эксплуатации и оперативно обрабатывают поступающую информацию из всех источников.

Далее покажем выполнения третьего и четвёртого этапов работы на примере измерения зазоров рамового подшипников указанного выше двигателя с целью корректировки нормативной периодичности сроков его диагностики.

#### 4.3.4. Алгоритмы расчета показателей надежности подшипников

Исходя и отмеченной выше необходимости корректировки ремонтного цикла двигателя с учетом новых правил морского регистра (таблица 29), цель настоящего исследования сводится к проверке возможности увеличения назначенного ресурса до текущего ремонта от 12 до 15 тыс. час, т.е. в 1.25 раза (или на 25%). Для достижения этой цели используем метод учета уровней состояний узла трения (раздел 3.3.3). Очевидно, что в нашем случае имеем следующие параметры зазоров подшипника (по таблице 28):

$$L_0 = 0.1 \text{ мм}, L_A = 0.25 \text{ мм}, L_R = 2 L_A - L_0 = 0.4 \text{ мм}$$
$$\text{и } L_B = (L_R + L_A) / 2 = 0.325 \text{ мм}$$

В основу алгоритма расчета положим два варианта уже рассмотренных вероятностных параметрических моделей типа «Веер» и «Тренд», алгоритмы которых приведены в разделе 4.2.4 (формулы (48) ... (50)).

Фрагменты этих расчетов для рассматриваемых подшипников даны на рис. 84...86. При этом в качестве постоянных исходных данных используются параметры  $L_0$ ,  $LA$ ,  $LR$  и  $LB$ , а также допустимые значения квантилей распределения  $Z=2$  ( $\gamma = 97.7\%$ ) или  $Z=1$  ( $\gamma = 84.1\%$ ). Они показаны на верхней части фрагмента рис. 84. Далее следуют переменные исходные данные в виде двух матриц наработок до измерений и соответствующие им результаты измерений.

В данном примере рассматриваются относительно большие выборки измерений, полученные с 5 судов. При этом с каждого судна были получены данные о двух ремонтах двигателей (по 9 подшипников на каждом судне). Таким образом, общая выборка составила  $2 \cdot 9 \cdot 5 = 90$  измерений без учета установки начального зазора  $L_0 = 0.1$  мм при нулевой наработке. Для расчета постоянных уравнения регрессии под указанными матрицами были образованы два вектора  $X$  и  $Y$  путем совмещения столбцов для сеансов измерений  $S_1...S_{10}$  подшипников  $C_1...C_9$  каждого дизеля.

На фрагменте рис. 85 для вероятностной модели типа «Тренд» определены функции зазора от наработки  $h(t,k)$  и ресурса от зазора  $R(h,k)$  с учетом доверительных границ при заданном коэффициенте охвата  $Z=2$  ( $\gamma = 97.7\%$ ).

Задача решалась по формулам (51) и (52) и оператору (53) для определения постоянных  $a_1$  и  $a_2$  уравнения регрессии. Это позволило определить указанные функции с высоким коэффициентом корреляции  $Kk = 0.991$ , что подтверждается линейным графиком зависимости зазоров от времени с доверительными границами, охватывающими опытные точки зазоров.

В заключительной части рассматриваемого алгоритма на рис. 85 впервые сформулировано правило принятия решение о корректировке нормативного ресурса с учетом возможного превышения предельно-допустимого уровня состояния  $LA$  при соблюдении требуемой высокой вероятности (например, 97.7% при  $Z=2$ ). Правило заключается в следующем.

Корректируемый ресурс может находиться в границах между гамма - процентными ресурсами, рассчитанными при уровнях  $LA$  и  $LB$  (в данном случае между 14.4 и 17.4 тыс. час). При этом он не должен превышать 1.25 назначенного ресурса, т.е. 15 тыс. час. Для этого ресурса надо определить верхнюю границу допустимого зазора, который должен быть не больше  $LB$ , что соответствует логической программе «принять». В итоге установлена допустимость увеличения ресурса до 15 тыс. час при соблюдении высокой вероятности безотказной работы.

## Оценка надежности подшипников

Постоянные данные

Уровни состояний

$$L0 := 0.1 \quad LA := 0.25 \quad LR := 2 \cdot LA - L0 \quad LB := \frac{3 \cdot LA - L0}{2}$$

$$\begin{pmatrix} L0 \\ LA \\ LR \\ LB \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.25 \\ 0.4 \\ 0.325 \end{pmatrix}$$

Контрольный ресурс

$$Rk := 12$$

Нормативный квантиль

$$Z = 2$$

вероятность  $\gamma := \text{snorm}(Z)$

$$\gamma = 97.725\%$$

Наработка =

"ZG"	"S1"	"S2"	"S3"	"S4"	"S5"	"S6"	"S7"	"S8"	"S9"	"S10"
"C1"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C2"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C3"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C4"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C5"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C6"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C7"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C8"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6
"C9"	3	6	3.5	6.5	2.8	5.6	3.2	7.2	2	6

Зазоры =

"ZG"	"S1"	"S2"	"S3"	"S4"	"S5"	"S6"	"S7"	"S8"	"S9"	"S10"
"C1"	0.14	0.17	0.144	0.18	0.135	0.17	0.14	0.186	0.125	0.18
"C2"	0.135	0.18	0.14	0.181	0.132	0.166	0.142	0.19	0.12	0.17
"C3"	0.138	0.177	0.15	0.179	0.14	0.172	0.137	0.188	0.122	0.175
"C4"	0.142	0.174	0.145	0.181	0.13	0.17	0.14	0.19	0.126	0.18
"C5"	0.13	0.167	0.15	0.177	0.138	0.168	0.143	0.18	0.124	0.2
"C6"	0.13	0.172	0.144	0.185	0.13	0.165	0.144	0.188	0.123	0.174
"C7"	0.135	0.171	0.149	0.18	0.137	0.173	0.146	0.19	0.127	0.174
"C8"	0.137	0.18	0.14	0.186	0.13	0.17	0.135	0.192	0.122	0.17
"C9"	0.14	0.17	0.15	0.182	0.133	0.169	0.14	0.19	0.125	0.18

## Расчеты

Вероятностная модель типа «Тренд»

Образование векторов

$$X := \text{sort}(\text{stack}(tt^{(1)}, tt^{(2)}, tt^{(3)}, tt^{(4)}, tt^{(5)}, tt^{(6)}, tt^{(7)}, tt^{(8)}, tt^{(9)}, tt^{(10)}))$$

$$Y := \text{sort}(\text{stack}(hh^{(1)}, hh^{(2)}, hh^{(3)}, hh^{(4)}, hh^{(5)}, hh^{(6)}, hh^{(7)}, hh^{(8)}, hh^{(9)}, hh^{(10)}))$$

$$xx := 0, 0.1..20$$

Рисунок 84 Первая часть оценки ресурса подшипников по модели «Тренд»

Оператор МНК

$$a := \text{line}(X, Y) \quad a = \begin{pmatrix} 0.099 \\ 0.013 \end{pmatrix} \quad a_1 = 0.099 \quad a_2 = 0.013$$

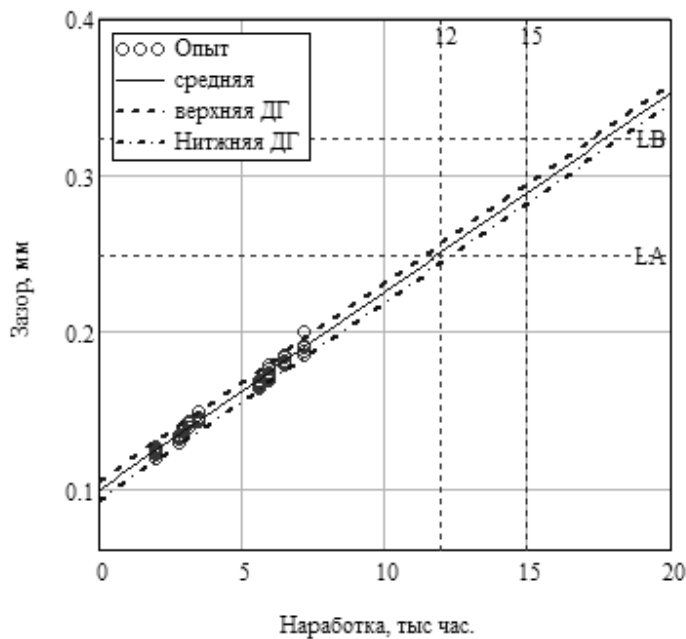
$$Kk := \text{corr}(X, Y) \quad Kk = 0.991 \quad \sigma_y := \sqrt{\text{Var}(Y) \cdot (1 - Kk^2)} \quad \sigma_y = 0.0031$$

$$Aa := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Квантиль (1 или 2)} \quad Z \equiv 2 \quad \text{snorm}(Z) = 97.725 \%$$

Функция износов

Функция ресурсов

$$h(t, k) := a_1 + a_2 \cdot t + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma_y \quad Rr(h, k) := \frac{h - a_1}{a_2} - Aa_k \cdot Z \cdot \frac{\sigma_y}{a_2} \quad k := 1..3$$



$$Rr(LB, k) = Rr(LA, k) = \begin{matrix} 18.341 \\ 17.854 \\ 17.368 \end{matrix} \quad \begin{matrix} 12.412 \\ 11.925 \\ 11.439 \end{matrix}$$

$$h(12, k) = h(15, k) = \begin{matrix} 0.245 \\ 0.251 \\ 0.257 \end{matrix} \quad \begin{matrix} 0.283 \\ 0.289 \\ 0.295 \end{matrix}$$

### Принятие решения

Ресурсы при  $\gamma = 97.725 \%$

Ресурс может находиться в диапазоне от  $Rr(LA, 3) = 11.439$  до  $Rr(LB, 3) = 17.368$  но не более 1.25 от назначенного ресурса  $Rk = 12$

Проверяем зазоры при увеличении ресурса на 25%

$$R25 := 1.25 \cdot Rk \quad R25 = 15$$

Отсюда максимальный зазор  $h25 := h(R25, 3) \quad h25 = 0.295 \quad LB = 0.325$

$$\text{Принять} := \text{round} \left( \begin{matrix} R25 & \text{if } h25 \leq LB \\ Rr(LB, 3) & \text{otherwise} \end{matrix} \right) \quad \boxed{\text{Принять} = 15}$$

Рисунок 85 Вторая часть оценки ресурса подшипников по модели «Тренд»

# Веер

Интенсивность износа

$$J_z := \frac{hh - L0}{tt}$$

$$\text{Интенсивность} := \text{augment}(vv^T, \text{stack}(VVV, J_z))$$

Интенсивность =

"ZG"	"S1"	"S2"	"S3"	"S4"	"S5"	"S6"	"S7"
"C1"	0.01333	0.01167	0.01257	0.01231	0.0125	0.0125	0.0125
"C2"	0.01167	0.01333	0.01143	0.01246	0.01143	0.01179	0.01312
"C3"	0.01267	0.01283	0.01429	0.01215	0.01429	0.01286	0.01156
"C4"	0.014	0.01233	0.01286	0.01246	0.01071	0.0125	0.0125
"C5"	0.01	0.01117	0.01429	0.01185	0.01357	0.01214	0.01344
"C6"	0.01	0.012	0.01257	0.01308	0.01071	0.01161	0.01375
"C7"	0.01167	0.01183	0.014	0.01231	0.01321	0.01304	0.01437
"C8"	0.01233	0.01333	0.01143	0.01323	0.01071	0.0125	0.01094
"C9"	0.01333	0.01167	0.01429	0.01262	0.01179	0.01232	0.0125

Математическое ожидание и СКО интенсивности износа

$$IZ_s := \text{mean}(J_z)$$

$$IZ_s = 0.012429$$

$$\sigma_s := \text{Stdev}(J_z)$$

$$\sigma_s = 0.00107$$

$$ks := \frac{\sigma_s}{IZ_s}$$

$$ks = 0.086$$

$$n := \text{rows}(J_z) \cdot \text{cols}(J_z)$$

$$n = 90$$

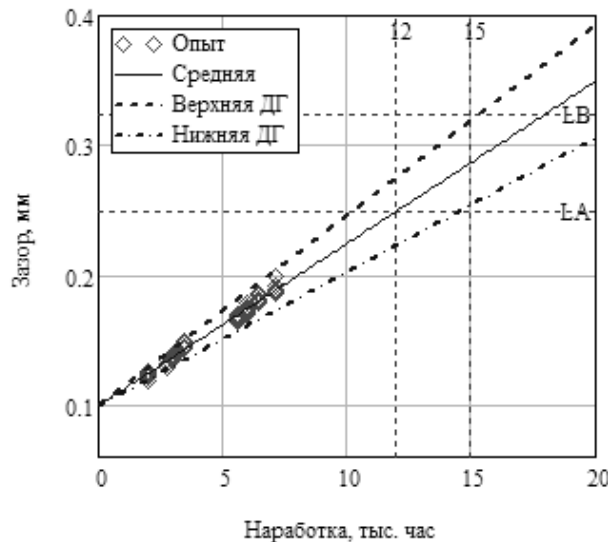
$$JZ_j := \sum J_z^{(j)}$$

Зазоры

$$Hh(t, k) := t \cdot (IZ_s + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma_s) + L0$$

Ресурсы

$$Rv(h, k) := \frac{h - L0}{IZ_s + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma_s}$$



$Rv(LB, k) =$	$Rv(LA, k) =$
21.881	14.587
18.102	12.068
15.436	10.291

$Hh(12, k) =$	$Hh(15, k) =$
0.223	0.254
0.249	0.286
0.275	0.319

Принятие решения Ресурсы при  $\gamma = 97.725\%$

Ресурс может находиться в диапазоне от  $Rv(LA, 3) = 10.291$  до  $Rv(LB, 3) = 15.436$

но не более 1.25 от назначенного ресурса  $Rk = 12$

Проверяем зазоры при увеличении ресурса на 25%  $R_{25} := 1.25 \cdot Rk$   $R_{25} = 15$

Отсюда максимальный зазор  $h_{25} := Hh(R_{25}, 3)$   $h_{25} = 0.319$   $LB = 0.325$

$$\text{Принято} := \text{round} \left( \begin{array}{l} R_{25} \text{ if } h_{25} \leq LB \\ Rv(LB, 3) \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

Принято = 15

Рисунок 86 Заключительный фрагмент прогнозирования ресурса

## Износостойкость Вейбулла

вектор

$$JJ_s := \text{sort}\left(\frac{X}{Y - L0}\right)$$

средняя  $izs := \text{mean}(JJ_s)$     ско  $\sigma v := \text{Stdev}(JJ_s)$     коэф вариации

$$izs = 80.928 \quad \sigma v = 5.498 \quad kkvv = 0.068 \quad kkvv := \frac{\sigma v}{izs}$$

нормальный  $Rvv(h,k) := (h - L0) \cdot (izs + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma v)$      $Hm(t,k) := \frac{t}{izs + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma v} + L0$

параметры  $nn := \text{rows}(JJ_s)$      $nn = 90$      $i := 1..nn$

ВБР  $P_i := 1 - \frac{i}{nn}$     Приближенные  $aa := izs$      $bb := \frac{1}{kkvv}$      $bb = 14.72$

$$Pm(t, aa, bb) := e^{-\left(\frac{t}{aa}\right)^{bb}}$$

$$\text{res}(aa, bb) := P - Pm(JJ_s, aa, bb)$$

Given  $0 = \text{res}(aa, bb)$

$$\begin{pmatrix} a1 \\ b1 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(aa, bb)$$

$$\begin{pmatrix} a1 \\ b1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 81.864 \\ 21.975 \end{pmatrix}$$

тогда

$$Pn(t) := e^{-\left(\frac{t}{a1}\right)^{b1}}$$

$$Rg(\gamma) := a1 \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b1}}$$

$$\lambda V(t) := \frac{b1}{a1} \cdot \left(\frac{t}{a1}\right)^{b1-1}$$

$$\text{corr}(P, Pn(JJ_s)) = 0.98$$

$$fV(t) := Pn(t) \cdot \lambda V(t)$$

Зазоры

$$Hm(t, \gamma) := \frac{t}{Rg(\gamma)} + L0$$

Ресурс

$$RVv(h, \gamma) := (h - L0) \cdot Rg(\gamma)$$

Допустимый диапазон назначения ресурса 15000 час

$$RVv(LA, 80\%) = 11.469 \quad RVv(LB, 80\%) = 17.204$$

Диапазон допустмых зазоров при 15000 часов, которые больше  $LA = 0.25$

но меньше  $LB = 0.325$

$$Hm\left[15, \begin{pmatrix} 20\% \\ 50\% \\ 80\% \\ 97.7\% \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} 0.279 \\ 0.286 \\ 0.296 \\ 0.317 \end{pmatrix}$$

Рисунок 87 Применение закона Вейбулла

Это правило также применено в заключительной части исследования интенсивности износа по модели типа «Веер», которые показаны на фрагменте рис. 86. Здесь использована ранее показанная методика по формулам (49...50) с упрощенным алгоритмом расчета средней  $Iz_s$  и СКО  $\sigma_s$  интенсивности для всей матрицы  $Iz$ , рассчитанной по данным матриц наработок и зазоров фрагмента рис. 85. Модели типа «Веер» и «Тренд» различаются друг от друга выбором случайной величины. В первой модели такой величиной является интенсивность износа и ее дисперсия, что и приводит к лучеобразной форме доверительных границ, хотя средние линии в обеих моделях практически совпадают. У модели типа «Тренд» погрешность накладывается на всю функцию и поэтому доверительные границы идут параллельно средней линии. По этой причине более простая модель типа «Веер» обычно обеспечивает несколько больший запас надежности, что имеет значение в условиях известной неопределенности при сборе информации.

На фрагменте рис. 87 показан еще один способ обоснования возможности повышения назначенного ресурса до 15 тыс. час на основе применения закона Вейбулла для допустимых вероятностей  $\gamma = 80\%$  и  $\gamma = 97.7\%$ . Показано, что допустимы зазор в этом случае, хотя и превысил  $LA = 0.25$  мм, но не вышел за пределы  $LB = 0.325$  мм.

#### 4.3.5. Оценка безотказности двигателя в межремонтный период

В 70-80 годах прошлого века службы надежности промышленного флота при участии экипажей подконтрольных судов фиксировали сведения о наработках каждого изделия, число отказов, время простоя и трудоемкость восстановления после отказов, описывали отказы и способы восстановления изделий, а также указывали расход сменно-запасных частей (СЗЧ). Рейсовые отчеты обрабатывались по специальной методике службами надежности [6, 33]. Данные рейсовых отчетов позволяли определить наработку на отказ, коэффициент готовности, удельную трудоемкость восстановления и расход СЗЧ за отчетный год.

По этим данным составлялись ежегодники отчеты об эксплуатационных качествах серийных судов данного типа, которые направлялись в головную организацию отрасли для разработки совместных решений с поставщиками судовой техники об устранении обнаруженных недостатков.

Кроме того, результаты анализа надежности с помощью информации, получаемой по второй системе, позволяли оценивать качество изделий судовой техники в процессе государственной аттестации, выбирать лучшее оборудование при комплектации судов на стадии проектирования и разрабатывать требования по надежности.

Здесь целесообразно кратко отразить только оценку показателей безотказности по данным второй системы сбора информации.

Основными показателями, характеризующими фактический уровень безотказности любого изделия в условиях планово-предупредительной системы ремонтов, являются наработка на отказ  $t_o$ , коэффициент готовности  $K_g$  и удельная трудоемкость восстановления  $w_o$ . Для оценки безотказности по конкретному виду отказов используется - вероятность безотказной работы  $P(t)$ .



Все эти показатели рассчитываются только применительно к фактическим отказам, которые приводят к внеплановым простоям изделия.

Это допущение позволяет значительно упростить методику сбора и обработки информации о фактических отказах, так как отпадает необходимость совмещения отсчета наработки отказавших изделий. При этом в интервал времени (чаще всего равный одному году) включаются все изделия, которые находились под наблюдением, независимо от их возраста.

На флоте рыбной промышленности составленные таким образом рейсовые донесения поступали в службу надежности судовладельца или отрасли, где они систематизировались и обрабатывались по формулам табл. 30.

Расчет выполняется для числа изделий  $N$ . Расчет удобно вести в табличной форме, приведенной в таблице на рис. 88, где дан пример определения показателей надежности главных двигателей траулера. В этом случае рассматриваются подконтрольные двигатели при суммарной наработке 7620 час. и назначенном ресурсе непрерывной работы 600 час.

Сначала выполняются вычисления для каждого вида отказов в соответствующей строке таблицы. Для примера проследим ход вычислений в третьей строке, где рассмотрены отказы плунжерных пар насосов высокого давления двигателя (заклинивание). В этом случае  $n = 10$ ,  $\tau = 32$  час,  $w = 33$  чел.-ч. Используя эти данные и формулы из табл. 30, нетрудно определить

$$t_o = 7620/10 = 762 \text{ ч.}$$

$$K_z = 7620/(7620 + 32) = 0.9958$$

$$P(t) = \exp[-(600/762)] = 0.455$$

$$w_o = 100 \cdot 33/7620 = 4.33 \text{ чел.-ч./тыс.ч}$$

Аналогично вычисляются показатели по остальным видам отказов.

Таблица 30 Показатели безотказности

Показатели надежности	Формула для расчета показателя надежности
Наработка на отказ, ч.	$t_o = \sum_{i=1}^N t_i / \sum_{i=1}^N n_i$
Вероятность безотказной работы за время, равное назначенному ресурсу	$P(t) = \exp(-t/t_o)$
Коэффициент готовности	$K_z = \sum_{i=1}^N t_i / \left( \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right)$
Удельная трудоемкость восстановления работоспособности, чел.-ч./тыс час.	$w = \sum_{i=1}^N W_i / \sum_{i=1}^N t_i$

Элемент изделия	Причина отказа	Способ восстановления	n	τ, ч	W, чел.-ч	t <sub>0</sub> , ч	P (t)	K <sub>Г</sub>	ω <sub>0</sub> чел.-ч/тыс.ч
Насосы высокого давления: трубопровод нагнетательные клапаны плунжерные пары топливные трубки Распылители форсунок Масляный холодильник Холодильник пресной воды Регулятор типа Р6А-16 Шестерня привода регулятора Шестерня привода распределительного вала Упорное кольцо крепления кулака топливных насосов	Разрушения по сварке	Заварка или замена	10	27	43	762	0,455	0,9965	5,640
	Обрыв обратного клапана	Замена	3	8	7	2540	0,790	0,9990	0,920
	Заклинивание	Замена	10	32	32	762	0,455	0,9958	4,200
	Течь	Замена	5	12	18	1524	0,675	0,9984	2,360
	Зависание иглы	Замена	3	6	7	2540	0,790	0,9992	0,920
	Течь, трещины	Заглушение	3	28	44	2540	0,790	0,9970	5,770
	Течь	Заглушение	3	38	69	2540	0,790	0,9950	9,055
	Выход из строя	Замена	1	2	4	7620	0,924	0,9997	0,520
	Раковины и пitting на зубьях	Ремонт на заводе	1	6	15	7620	0,924	0,9992	1,970
	Срезание болтов и шпилек	Ремонт на заводе	1	30	87	7620	0,924	0,9960	11,410
Разрушение	Ремонт на заводе	1	500	987	7620	0,924	0,9580	129,530	
Итого:	по всем отказам		41	684	1313	185,8	0,040	0,9170	172,310
	по топливной аппаратуре		31	85	—	245,8	0,087	0,9890	14,040

Рисунок 88 Копия таблицы с показателями безотказности топливной аппаратуры

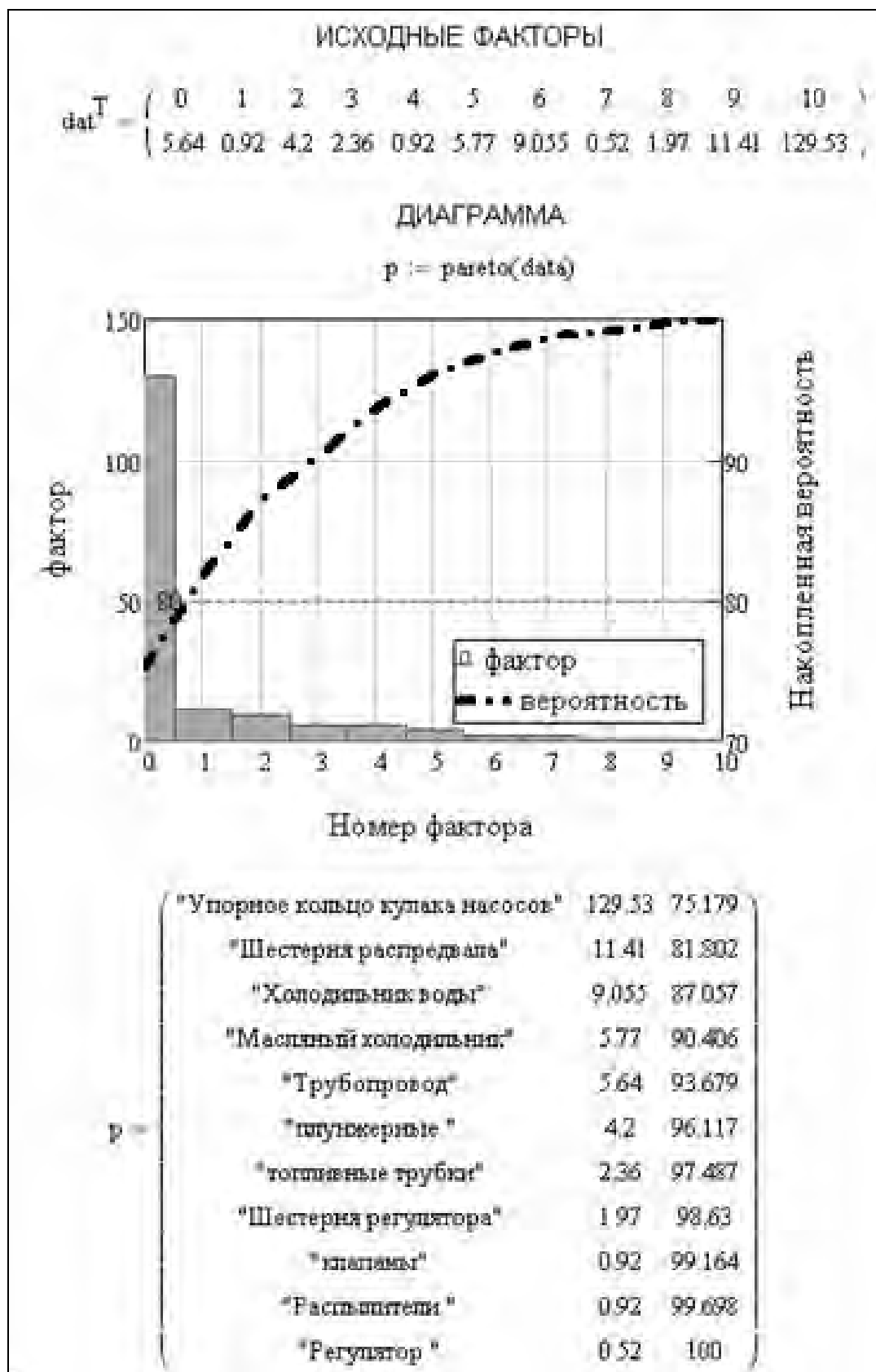


Рисунок 89 Фрагмент анализа по диаграмме Парето в редакторе MATHCAD

Для определения показателей надежности для изделия в целом или для какой-либо его составной части (например, топливной аппаратуры) необходимо предварительно сложить  $\tau$ ,  $n$  и  $w$  в соответствующих столбцах таблицы на рис.

88, а затем вычислить те же показатели для группы отказов. Результаты вычисления даны в нижней строке таблицы.

Оценка уровня безотказности при эксплуатации изделий и систем заключается в оценке коэффициента готовности. Располагая допустимым значением коэффициента готовности, можно оценить уровень надежности изделия. В рассматриваемом случае, например, надежность главных двигателей оказалась весьма низкой, поскольку  $K_z = 0,917 < K_{дон} = 0,997$ .

Рассмотрение табличных значений  $K_z$  для отказов разных видов позволяет установить, какие из них являются причиной снижения надежности изделия в целом. Для объективного решения этой задачи можно применить так называвшему диаграмму Парето (раздел 3.3.4). Такая диаграмма была построена в редакторе MATHCAD на рис. 89 по данным таблицы на рис. 88, из которой следует, что в данном случае надежность была понижена из-за отказов упорного кольца крепления кулачка топливных насосов, шестерни привода распределительного вала, регулятора, масляных холодильников и других деталей. Эти единичные отказы не повлияли на плановые сроки ТОР двигателя, что не требует корректировки назначенных ресурсов.

#### 4.3.6. Результаты ПИН

Рассмотренный пример оценки срока службы подшипников имеет принципиальное значение для развития концепции управления НОТЭ, поскольку позволяет корректно объяснить возможность безопасной корректировки сроков ТОР в пределах 20 и более процентов.

Такая проблема неизбежно возникает при использовании машин одного типа в разных отраслях народного хозяйства или ОКН. Поэтому, предложенная методика может быть принята на вооружение в методологии РСМ.

Возникновение единичных недопустимых повреждений и отказов (аварий) при эксплуатации не влияет на плановые сроки ремонта, но требуют специального анализа причин и разработку мер по их устранению. Подробные исследования аварийного случая одного из судовых двигателей будет показан в следующей главе.

### 4.4. Анализ причин аварии машины

#### 4.4.1. Предисловие

Отказы, возникающие при эксплуатации машин, могут иметь последствия разной степени тяжести в зависимости от затрат времени и средств на восстановление работоспособности машины и ОКН. Наиболее тяжелые последствия характерны для отказов, которые называются авариями.

Эта новела, приведена, как пример того, что на стадии проектирования объекта трудно даже представить какие отказы могут возникать на практике. Для этого рассмотрим исследования, которые пришлось выполнять для решения вопроса о выплате страхового возмещения от аварии конкретного судового двигателя. Этот случай имел место в действительности и отражен в документах,

но конкретные имена участников этой истории здесь не приводятся, поскольку это не имеет принципиального значения с методической точки зрения. Отметим лишь, что прямое отношение к изучению причин и виновников аварии имели следующие субъекты:

Судовладелец (страхователь, истец), который в первую очередь заинтересован в определении истинных причин аварии и возмещении убытков;

Страховщик (страховая компания, ответчик), который формально заинтересован в определении истинных причин аварии, но не заинтересован в возмещении убытков;

Дилер – сервисная служба завода изготовителя двигателя, которая имеет лицензионное право выполнять и выполняет ТОР двигателя (в том числе и аварийный ремонт) и заинтересован в определении причин аварии;

Сюрвейер – организация, который уполномочена выполнять исследование и оформлять заключение о причинах аварии для страховщика;

Судовые механики, инспекторы Регистра и др., которые принимают участие в дефектации машины и получении информации об аварии;

Арбитражный суд – орган, к которому обращаются стороны (страховщик - ответчик и страхователь - истец) для решения спорных вопросов о причинах аварии;

Эксперт - независимая сторонняя организация, которая привлекается по необходимости для анализа причин аварии при подготовке судебного разбирательства. Эту роль исполнил институт РАН в лице автора данной книги.

Действия перечисленных субъектов имеют своей целью определить причины аварии и решить все юридические вопросы по возмещению убытков, а также наметить рекомендации по предотвращению таких случаев в будущем.

#### 4.4.2. Характеристика аварийного объекта и описание аварии

Авария главного двигателя правого борта портового буксира типа «Трувор» произошла во время его перехода от места проведения швартовых операций к причалу нефтяного терминала порта.

Двигатель судна имеет следующие характеристики: марка дизеля «Caterpillar», модель 3516, мощность 1865 кВт, частота вращения от 450 до 1600 об/мин, V-образный дизель, диаметр цилиндра 170 мм, ход поршня 215 мм, с газотурбинным наддувом (рис. 90).

Важно отметить, что движителем этого судна служат винто-рулевые колонки, необходимые для швартовки крупнотоннажных судов в порту.

В сюрвейерском отчёте о причинах поломки двигателя подробно описаны участники и результаты оценки его состояния после аварии. Если говорить кратко, то блок цилиндров была полностью разрушен. Основные поломки зафиксированы у деталей (поршень, втулка, шатун и др.) первого цилиндра.

Уже на первом этапе осмотра разобранного двигателя особое внимание было уделено состоянию и поломкам всех элементов головки первого цилиндра, которые имели признаки сильного нагарообразования на тарелках и што-

ках клапанов. Ключевое значение имеет обнаружение поломанной пополам пружины выхлопного клапана (рис. 91).

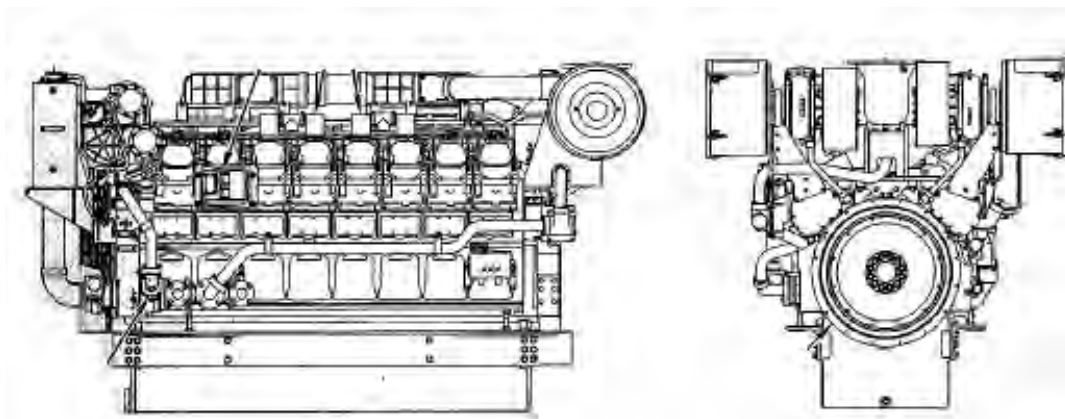


Рисунок 90 Двигатель «Caterpillar» 2516

Эта пружина была отдана в специализированную лабораторию для анализа, по результатам которого Сюрвейер дал заключение о том, что наиболее вероятной причиной поломки главного двигателя правого борта буксира стала поломка пружины на выхлопном клапане цилиндровой головки цилиндра №1, что произошло вследствие усталостного разрушения металла. Такое заключение было положено в основу отказа в признании поломки страховым случаем и выплаты страхового возмещения.



Рисунок 91 Разрушенная пружина выхлопного клапана

И тут следует пояснить некоторые юридические причины такого решения, связанные с договором страхования судовладельца (страхователя) со страховщиком. В соответствии с Правилами страхования к страховым рискам может относиться скрытый дефект судовых двигателей и их элементов, а также повреждение судна в результате ненадлежащего выполнения ремонтных работ службами Страхователя. Вместе с тем, согласно Правил страхования, не при-

знаётся страховым случаем, повреждение, возникшее по причине «ветхости судна, его принадлежностей, их изношенности, включая эффект усталости металла». Именно этот пункт и был использован страховщиком по заключению Сюрвейера, хотя тот же пункт имеет следующее дополнение от юриста страхователя: «Ветхим не может признаваться изделие, не выработавшее свой назначенный ресурс».

Естественно, что страхователь (судовладелец) не согласился с таким решением суда и обратился к независимой научной организации (институту Российской академии наук) исследовать проблему и дать заключение специалиста о причинах аварии. Поскольку эта роль была поручена автору данной монографии, то имеется возможность изложить сущность анализа этой спорной проблемы из первых рук. Необходимые материалы для такого анализа были предоставлены судовладельцем.

В конечном счете, цель нашего исследования свелась к решению следующих вопросов:

1. Была ли сломанная пружина ветхой по причине усталости металла.
2. Каковы факторы и причина поломки пружины
3. Была ли поломка пружины основной причиной разрушения двигателя
4. Какие другие факторы и состояния могли привести к поломкам первого цилиндра, но не были учтены Сюрвейером.
5. Обосновать причины и виновников возникновения таких факторов, которые привели к аварии.

#### 4.4.3. Анализ причин и виновников аварии

Для ответа на первый вопрос целесообразно вспомнить мудрое добавление страхователя в Правила страхования о том, что ветхим не может признаваться изделие, не выработавшее свой назначенный ресурс. Согласно инструкции по эксплуатации назначенный ресурс до капитального ремонта двигателя составляет  $Tr = 18000$  часов, а до аварии он отработал около  $T = 14000$  часов. Но дело не только в этом. Важно оценить наработку пружины в циклах сжатия, которые в четырехтактном двигателе происходят один раз за два оборота коленчатого вала. Тогда, число циклов  $N(T, n)$  за время  $T$  часов при частоте вращения  $n$  об/мин и тактности  $t = 4$  соответствует формуле (54)

$$N(n, t) = \frac{2}{t} \cdot 60 \cdot n \cdot T = 30 n T \quad (54)$$

Поэтому, максимальное число циклов, которое должна выдержать (не сломаться) пружина составляет  $30 \cdot 1600 \cdot 18000 = 864000000 = 8.64 \cdot 10^8$  циклов.

Для определения фактического числа циклов до поломки необходимо знать среднюю частоту вращения, которую удалось рассчитать по гистограмме, построенной по данным компьютера дизеля (фрагмент рис. 92) в математическом редакторе MATHCAD.

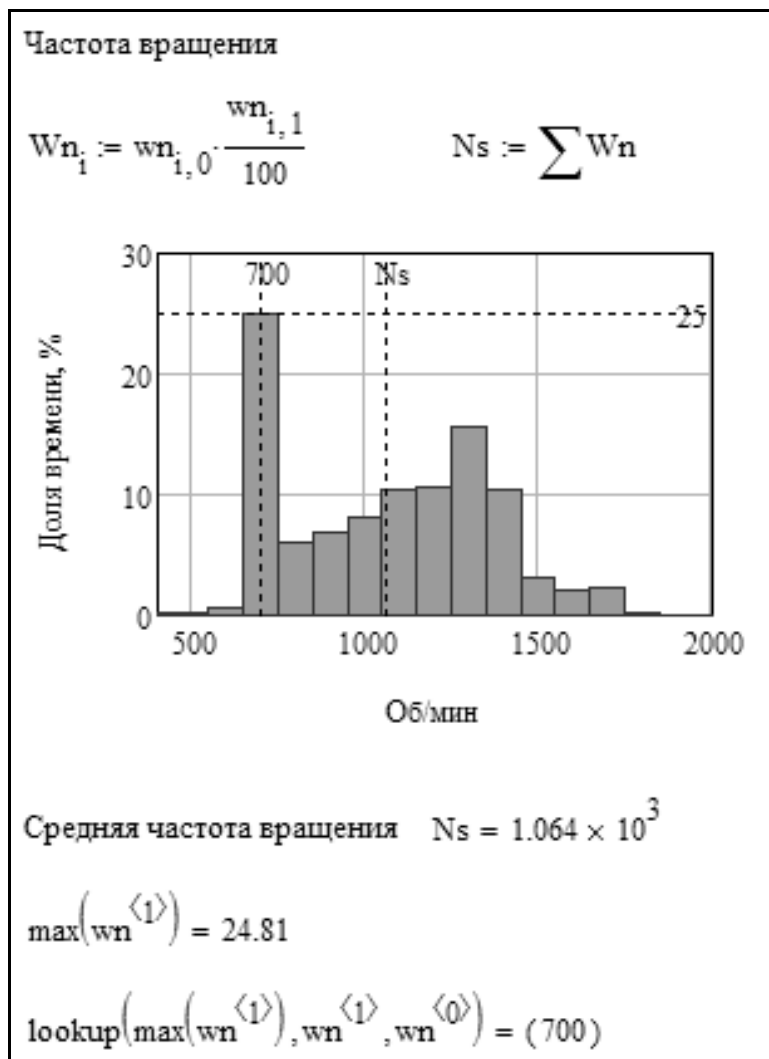


Рисунок 92 Гистограмма частоты вращения

Поскольку эта величина составила 1064 об/мин (при этом 25% времени частота вращения была 700 об/мин), то на основании формулы (53) при  $T = 14000$  часов получаем наработку  $30 \cdot 1064 \cdot 14000 = 446880000 = 4.47 \cdot 10^8$  циклов, что вдвое меньше назначенного ресурса. Таким образом, пружина при обнаружении поломки не являлась «ветхой», хотя с позиций теории сопромата это есть усталостное разрушение. Поэтому заключение об усталостном разрушении, выгодное для страховщика, связано с неправомерным применением термина «ветхость» в данном случае, что следует из фразы страхователя о том, что ветхим не может признаваться изделие, не выработавшее свой назначенный ресурс. Это значит, что причину аварии надо искать или в скрытом дефекте или в нарушениях правил технического обслуживания.

Рассмотрим второй вопрос о причинах поломки пружины, с учетом того, что при ремонте через 12000 часов было обнаружено еще две поломанные пружины, которые не вызвали разрушения других элементов дизеля. Для начала отметим, что в акте специализированной лаборатории не дано полной оценки свойства материала пружины, хотя указывается на некоторое обезуглероживание поверхности, что снижает стойкость пружин к разрушению (циклическую



прочность пружин) и повышает склонность к усталостному разрушению. Твердость металла сломавшейся пружины по результатам измерения составляет 46 HRC, что соответствует нижней границе допустимых значений. Поэтому нельзя исключать некоторое снижение предела выносливости, при изготовлении партии пружины рассматриваемого двигателя.

Применив для анализа известную степенную кривую Велера (см. формулу (55)), было установлено, что для снижения ресурса пружина в два раза достаточно уменьшения предела выносливости металла всего лишь на 7% - 15%.

$$L_G = L_B \left( \frac{C_B}{G} \right)^m \exp(-Z \sigma_{\ln L}) \quad (55)$$

где  $C_r$  – предел выносливости при базовой наработке  $L_B$  (например 10 миллионов),  $G$  - эквивалентная эксплуатационная нагрузка,  $m$  – показатель степени (зависит от типа детали и может составлять от 3 до 10 по данным [8]),  $L_G$  - наработка при заданной нагрузке  $G$ ,  $Z$  -квантиль распределения,  $\sigma_{\ln L}$  - СКО логарифма наработки.

Для обоснования этой величины можно предположить, что причиной снижения долговечности изделия являются только скрытые дефекты материала пружины. Тогда коэффициент снижения предела выносливости  $C_B$  по этой причине можно оценить по соотношению

$$\frac{L_{Gn}}{L_{Gf}} = \left( \frac{C_{Bn}}{C_{Bf}} \right)^m, \text{ откуда } \Rightarrow K = \left( \frac{C_{Bn}}{C_{Bf}} \right) = \left( \frac{L_{Gn}}{L_{Gf}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (56)$$

Где  $L_{Gn}$  - расчетный ресурс,  $L_{Gf}$  - фактический ресурс,  $C_{Bn}$  - предел выносливости при расчетном ресурсе,  $C_{Bf}$  - предел выносливости при фактическом ресурсе.

При  $m = 5$ ,  $L_{Gn} = 8.64 \cdot 10^8$  и  $L_{Gf} = 4.5 \cdot 10^8$  коэффициент снижения предела выносливости составит  $K = \left( \frac{8.64}{4.5} \right)^{\frac{1}{5}} = 1.13$ , т.е. для снижения ресурса вдвое предел выносливости может быть снижен всего на 13%, а при  $m = 10$  и того меньше – на 6%.

Учитывая вероятностную природу усталостных разрушений и то, что поломки наблюдались и у других пружин, наличие скрытого дефекта не исключается. Однако, сокращение срока службы пружины может вызвано и увеличением фактических амплитуд напряжений, причины рассмотрим позже.

Теперь наступила очередь ответить на третий и четвертый вопрос о других и основных факторах и причинах аварии, которые «не заметил» Сюрвейер.

В нашем анализе наибольшие подозрения падают на режимы работы двигателя на переменных и малых долевых нагрузках при эксплуатации винто – рулевых колонок буксира. Для проверки этой гипотезы по записям бортового

компьютера были построены и проанализированы гистограммы нагрузок и температур выхлопных газов двигателя (рис. 93)

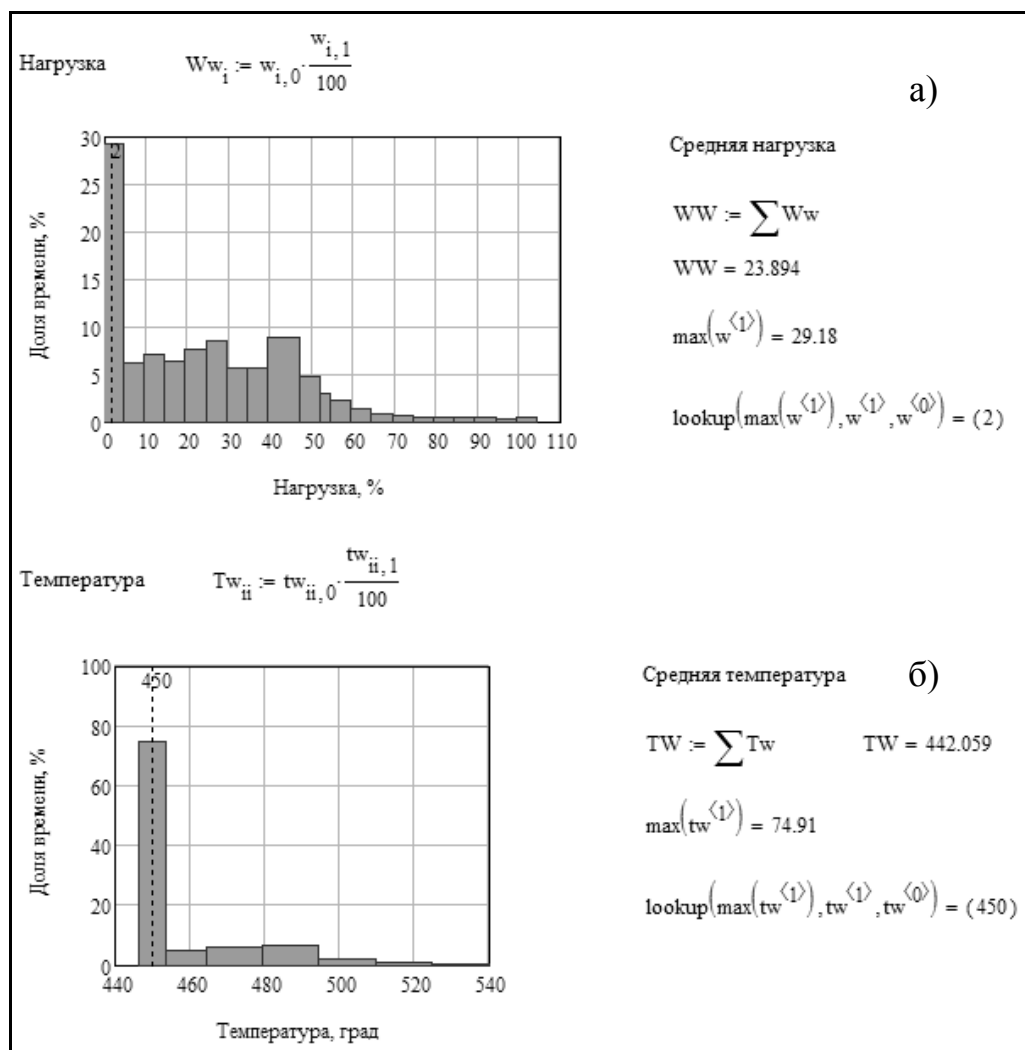


Рисунок 93 Гистограммы нагрузки (а) и температуры (б)

Эти данные показывают, что двигатель длительное время работал на режиме холостого хода (25% - при 2 Квт) при самых низких температурах выхлопных газов (75% времени при 450°C).

Большой практический опыт работы на флоте рыбной промышленности (что видно из предыдущих разделов книги) позволил нам разгадать основную причину аварии. Дело в том, что работа на указанных малых долевых нагрузках и температурах приводит к плохому качеству сгорания топлива и образованию слоя нагарообразования выпускного тракта. Об этом упоминается в отчете Сюрвейера, что подтверждается актом внеочередного освидетельствования Регистра, где отмечено следующее состояние этих узлов.

«Крышки цилиндров №№ 3-16 (которые даже не были разрушены) имеют сильное нагарообразование на тарелках и штоках клапанов. Заклинивание клапанов в направляющих. Обрывы нижних частей направляющих. Продольные риски на штоках клапанов. Заклинивание «ротокапов».

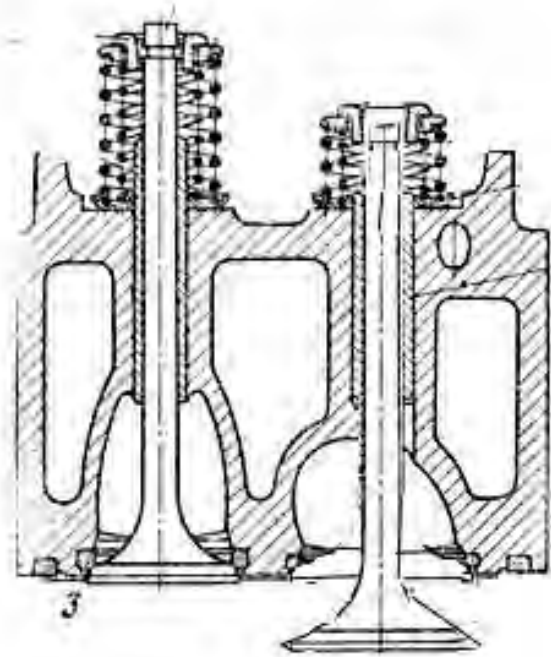


Рисунок 94 Принцип заклинивания штока клапана

Такое состояние выхлопного тракта должно приводить к увеличению трения при возвратно-поступательном движении штока клапана и увеличению амплитуды напряжений в пружине, что может ускорить процесс образование трещин в период эксплуатации при наработке меньше 14000 часов. Ведь поломка возникла у трех пружин. Особенно опасная ситуация возникла у первого цилиндра из-за неблагоприятного сочетания случайных факторов с учетом возможного сцепления обломков лопнувшей внешней пружины. Не исключено, что у этой пружины волосяная трещина уже была при ТО для наработки 12000 час. Однако ее видимо не заметили по причине отсутствия дефектоскопии на трещинообразование.

В итоге авария произошла из-за заклинивания штока при сжатой и поврежденной пружине (рис. 94), удара поршня по клапану и так далее, как описано в сюрвейерском отчёте. Такая случайная ситуация рано или поздно могла произойти при поломке любой пружины.

Образование нагарообразования из-за работы на малых нагрузках и явилась главной причиной аварии. Для предотвращения этого явления на флоте рыбной промышленности было принято после работы на малых нагрузках запускать двигатель на полные обороты для выжигания нагара, что и было учтено при составлении нашего заключения.

Интересно отметить, что при подготовке заключительного варианта иска в суд страховщик (судовладелец) вспомнил, что еще за два года до аварии подобные рекомендации для судов, работающих на портовых буксировках, давались циркуляром судовой ремонтной службе. Было предписано для устранения нагара один раз в две недели, в течение 15-20 минут, включать двигатель на работу с максимальной нагрузкой (прожог двигателя). Это соответствует предупреждению в инструкции по эксплуатации о том, что «возможно повреждение

деталей клапанного механизма из-за скопления нагара, если двигатель часто пускают и останавливают при очень низкой температуре». Однако на рассматриваемом судне судовая ремонтная служба это правило регулярно не соблюдала. По крайней мере, известно, что последняя запись о прожоге двигателя была сделана восемь месяцев назад до аварии.

По мнению Истца, страховое возмещение должно быть выплачено Страховщиком в случае подтверждения судом любой из двух указанных причин (ненадлежащий ремонт в совокупности со скрытым дефектом). Не вдаваясь далее в юридические тонкости можно лишь сообщить, что решение Арбитражного суда о выплате истцу страхового возмещения более 9 млн. руб. в связи с рассматриваемой аварией, в конечном счете, вступило в силу. Основанием для такого решения послужило объективное доказательство того, что причиной аварии послужило нагарообразование выхлопного тракта из-за длительной работы на малых нагрузках в сочетании с поломкой пружины, а не ветхость последней из-за усталости металла.

#### 4.4.4. Выводы и рекомендации

Рассмотренный пример разбора причин аварии имеет как юридическое, так и техническое значение. Если посмотреть на этот случай с юридической точки зрения, то можно понять роль толкования одних и тех же терминов при оценке причин аварийных ситуаций. Любой грамотный инженер знает, что число циклов до усталостного разрушения зависит не от календарного времени эксплуатации, а от амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки и свойств материала детали, а также от качества ее изготовления. Поэтому трудно понять, почему усталостное разрушение отнесено к понятию «ветхость». С тем же успехом к этому понятию можно отнести интенсивный износ подшипника из-за недоброкачественного ремонта или повреждения корпуса судна при работе во льдах и прочее. И тогда страховщик по наводке Сюрвейера всегда может отказать в выплате страхового возмещения, поскольку за причину аварии принимается следствие (поломка) влияющих факторов, которые в действительности являются причиной аварии (плохой ремонт, нарушения режима работы, скрытый дефект и т.п.). В этих условиях решающую адвокатскую роль для победы страхователя играет квалификация его юристов и привлекаемых сторонних экспертов. В данном примере в страховое соглашение юристом очень удачно было добавлено уточнение понятия о ветхости, а в качестве стороннего эксперта был приглашен специалист, обладающий теоретическим и практическим опытом исследований подобных событий.

Этот пример позволяет еще раз вспомнить о явной условности предварительного анализа и учета потенциальных отказов на этапе FMEA/FMECA в рамках системы RCM.

## 4.5. Пример диагностики демпфера судового двигателя

### 4.5.1. Предисловие

Представленная в этом разделе информация иллюстрирует роль квалификации исполнителей и уровня приборно-методического обеспечения при выполнении специализированного контроля технического состояния элемента судового оборудования. Рассмотренный здесь пример относится к силиконовым демпферам крутильных колебаний судовых двигателей (рис. 95), которые должны периодически проходить диагностику на работоспособность путем торсиографирования по правилам Российского морского регистра судоходства в виде требований «Методики по диагностированию и определению остаточного ресурса силиконовых демпферов судовых ДВС» (далее «Методика Регистра»). Этот документ был разработан при участии автора книги и включен нормативный документ «Приложения к руководству по техническому надзору за судами в эксплуатации НД 5-030101-009 (Санкт-Петербург, 2004) [52].

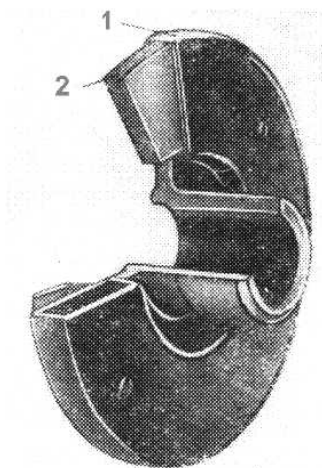


Рисунок 95 Силиконовый демпфер. 1 – корпус, 2 – маховик

Следует отметить, что у нас в стране такие исследования на приемлемом уровне способны выполнять ограниченное число лабораторией и специалистов. Головной организацией в области исследования крутильных колебаний судовых валопроводов являлась лаборатория из ЦНИИ им. Крылова. Такие исследования проводили также лаборатории: института ГИРОРЫБФЛОТ в Ленинграде, ООО «ДИАМАНТ» в Мурманске, ООО «ТОРСИО» в Санкт-Петербурге, ООО «СТАПЕЛЬ» в Ростове – на Дону, ООО "Тест Инжиниринг" во Владивостоке и некоторых других организаций.

Специфика этих исследований заключается в необходимости предварительного расчетного моделирования развития крутильных колебаний системы и применения современного приборного оборудования. Рассмотрим эти условия на примере крутильных колебаний водопровода траулера проекта 502 с двигателем 8NVD48AU.

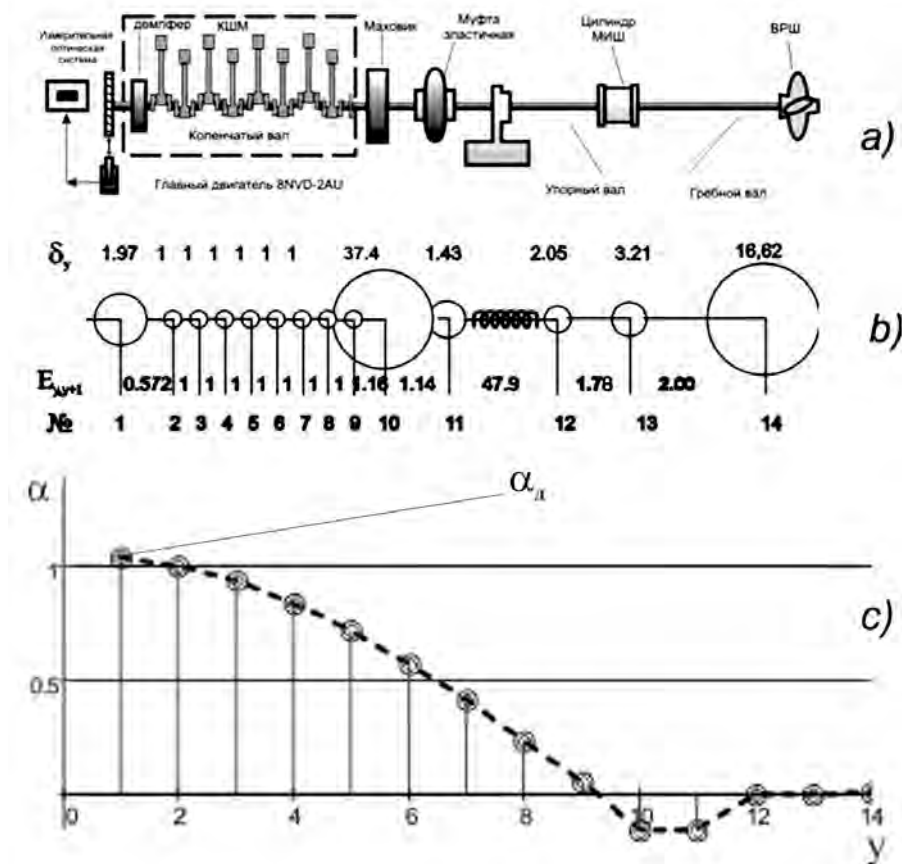


Рисунок 96. Эскиз системы вращающихся масс главной силовой установки судна - а), безразмерная схема системы вращающихся масс – б) и моторная форма свободных колебаний – в). Обозначения: КШМ – кривошипо – шатунный механизм, МИШ – механизм изменения шага, ВРШ – винт регулируемого шага,  $\delta_y$  – относительный момент инерции  $y$  – й массы,  $E_{y,y+1}$  – относительная податливость участка между  $y$  и  $(y+1)$  – й массами,  $\alpha$  – относительная амплитуда,  $\alpha_d$  – относительная амплитуда демпфера.

Исходными данными для такого моделирования служат конструктивные характеристики вращающихся элементов (рис. 96а). С их помощью рассчитывается крутильная схема системы вращающихся масс, состоящая из моментов инерции сосредоточенных масс, податливостей участков валов между массами, демпфирующих моментов и др. (рис. 96б). Это позволяет рассчитать эталонные значения частот свободных колебаний  $N$  и наиболее опасные резонансные частоты вращения вала  $n_v$  от возмущающих моментов  $\nu$ -го порядка и их амплитуды (перемещений  $A_\nu$  и напряжений  $\tau_\nu$ ), а также допускаемые напряжения  $\tau_{доп}$  по правилам Регистра. Указанные величины для так называемой моторной формы колебаний (рис. 96в) являются основными диагностическими параметрами для оценки степени исправности и остаточного ресурса  $R_{ост}$  демпфера. Расчеты выполняются по методике монографии [37], где, в частности, приводится метод расчета так называемой теоретической торсиограммы и спектрограммы (рис. 97).

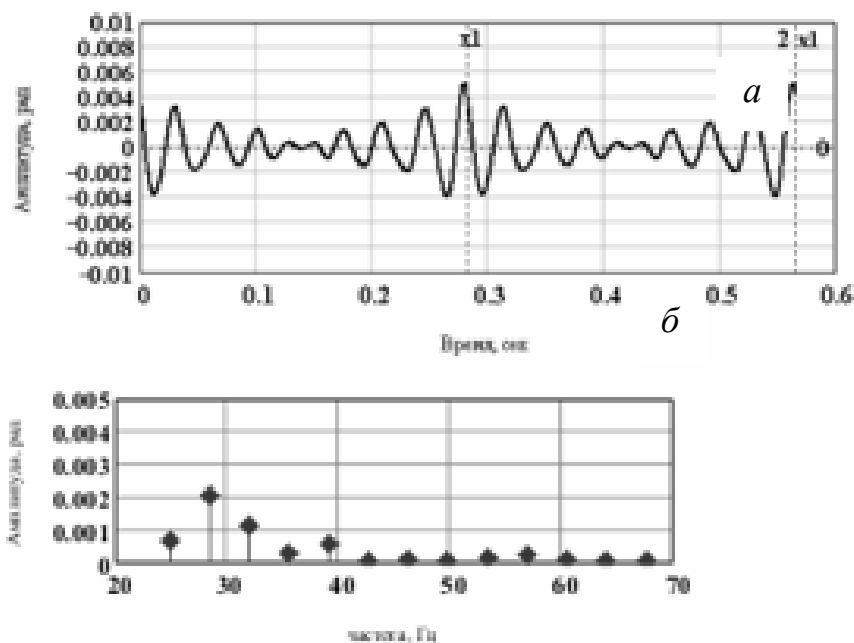


Рисунок 97 Теоретическая торсионная диаграмма (а) и спектрограмма (б) при номинальной частоте вращения

#### 4.5.2. Организация работ по диагностированию демпфера

Причина проведения испытаний заключается в выработке демпфером ресурса, назначенного Регистром при выполнении предыдущего торсионного диагностирования с учетом требований изготовителя демпфера или РС.

Работа по диагностированию демпфера выполняется по заявке судовладельца лабораторией, имеющей свидетельство о признании РС. Лаборатория разрабатывает и согласовывает с РС программу диагностирования демпфера, включающую сведения об эталонных значениях диагностических параметров. Затем лаборатория выполняет диагностирование демпфера в соответствии с одобренной программой, составляет и направляет судовладельцу отчет о диагностировании после его согласования с инспекцией Регистра.

Программа диагностирования демпферов разрабатывается применительно к рассматриваемому типу судна по форме шестого раздела методики и должна быть одобрена Регистром до начала диагностирования. Программа должна содержать сведения об эталонных и допустимых диагностических параметрах, установленных по рекомендациям третьего раздела методики.

#### 4.5.3. Обоснование допустимых диагностических параметров

В методике ключевое значение имеют методические указания обоснования эталонных и допустимых значений диагностических параметров. В качестве диагностических параметров следует принимать частоты и амплитуды крутильных колебаний тех форм, для гашения которых настроен демпфер. У среднеоборотных дизелей к ним относятся колебания моторной формы (рис. 84с), которую можно установить по следующим признакам.

У главных силовых установок, имеющих за маховиком двигателя валопровод и (или) упругую муфту большой податливости (когда их податливость в 10 и более раз больше податливости колена коленчатого вала), моторная форма практически совпадает с одноузловой формой колебаний для участка системы вращающихся масс «демпфер - коленчатый вал - маховик».

К эталонным относятся значения следующих диагностических параметров колебаний моторной формы, определенные при условии исправного демпфера: частота свободных колебаний и резонансная частота вращения коленчатого вала, которая попадают в диапазон оборотов от минимально-устойчивых до  $1,2 n_{ном}$  (где  $n_{ном}$  - номинальная частота вращения двигателя, об/мин) и возбуждаются наиболее существенным возмущающим моментом  $\nu$ -го порядка; амплитуда этой гармоника крутильных колебаний и напряжений от них при резонансной частоте вращения; суммарная амплитуда от вынужденных (околорезонансных) крутильных колебаний при номинальной частоте вращения или напряжений от них.

Значения эталонных диагностических параметров могут определяться для исследуемых двигателей с исправным и оптимально настроенным демпфером одним из следующих способов.

- По данным ранее выполненного (для головного или модернизированного судна проекта) расчета крутильных колебаний для рассматриваемой системы вращающихся масс;
- На основании расчета моторной формы колебаний для участка системы вращающихся масс «демпфер – двигатель – маховик»;
- По результатам торсиографирования валопровода головного (или однотипного) судна, имеющего исправный демпфер;
- По положительным результатам ранее выполненного торсиографирования валопровода данного судна при исправном состоянии демпфера;
- На основании статистического анализа результатов торсиографирования валопроводов установок однотипных судов при различных наработках двигателей с исправными демпферами.

К допустимым диагностическим параметрам относятся допускаемые напряжения при резонансной и номинальной частоте вращения, определяемой по правилам РС, или соответствующие им допускаемые амплитуды. Последние определяются путем деления допускаемых напряжений на масштаб напряжений для коленчатого вала. Кроме того, в методике установлены допустимое отклонение фактической амплитуды и частоты от их эталонных значений, характеризующие естественное рассеивание этих параметров, не связанного с ухудшением технического состояния демпфера.

При обосновании диагностических параметров рекомендуются использовать следующие значения допустимых отклонений:

для частоты свободных колебаний моторной формы  $\pm 3\%$  и для амплитуд резонансных колебаний  $\pm 5\%$ . Отметим, что указанное отклонение амплитуды относится к измерениям на одном и том же судне. Для выборки судов этот показатель может достигать до  $\pm 25\%$ .



#### 4.5.4. Проведение торсиографирования на судне

В четвертом разделе методики РС даются подробные указания о проведении работ по диагностированию на судне методом торсиографирования.

Торсиографированием называется способ записи и спектрального анализа крутильных колебаний выбранного сечения валопровода на схеме рис.84а, где устанавливается датчик прибора, который называется торсиографом. В данном случае в качестве измеряемого сечения выбирается носовой торец коленчатого вала (у демпфера), где наблюдается максимальная относительная амплитуда колебаний (рис. 96с).

Существуют различные конструкции торсиографов. Здесь рассматривается применение современной аппаратуры, описанной в докладе наиболее квалифицированного специалиста в рассматриваемой области – Попова А.А. (ООО "Тест Инжиниринг") [48]. Он использовал для измерения крутильных колебаний специализированные конвертеры (демодуляторы "частота-напряжение") с оптическими и электромагнитными датчиками (Рис. 98).

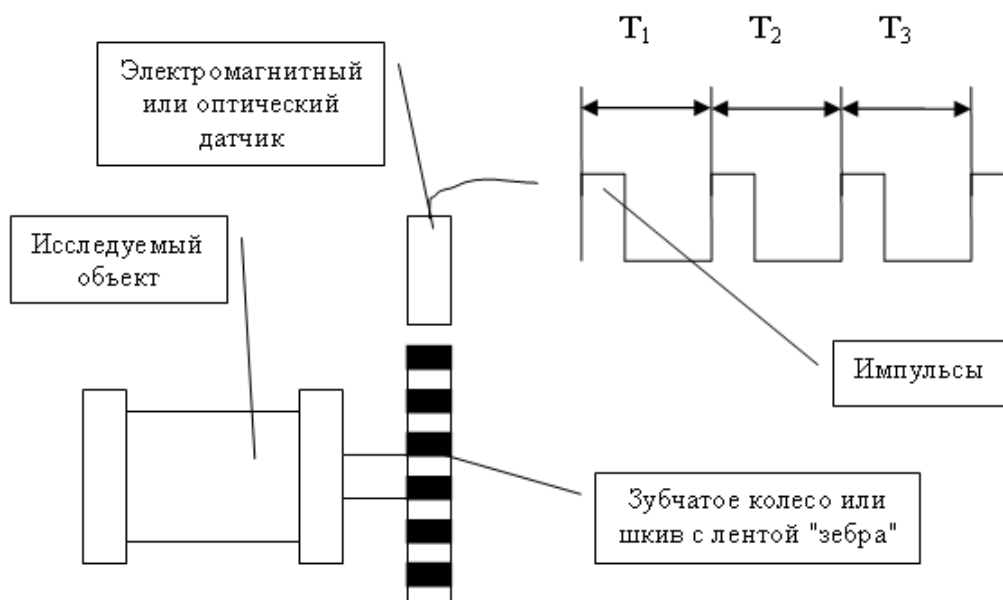


Рисунок 98 Принцип измерения крутильных колебаний.

Применение индуктивных или фотоэлектрических датчиков позволяет выполнять измерения бесконтактным способом, что значительно упрощает процедуру измерений. На этом принципе работает и измерительный комплекс, который используется в организации ООО "Тест Инжиниринг". В состав измерительного комплекса входят:

1. Измерительные датчики: электромагнитный датчик 5N9292, изготовитель - CATERPILLAR (США); оптический энкодер H20DB-254-SS-100-A, изготовитель - BEI (США); лазерный тахометр LT-850, изготовитель - Terahertz Technologies Inc. (США);

2. Преобразователь сигнала: конвертер крутильных колебаний 4C9022, изготовитель - CATERPILLAR (США);

3. Отметчик оборотов: фотоэлектрический датчик 4С6918, изготовитель - CATERPILLAR (США);

4. Устройство регистрации и записи сигнала: аналого-цифровой преобразователь HandyScore4, TIE PIE (Нидерланды), ноутбук.

Оптический энкодер жестко соединяется с торцом коленчатого вала двигателя при помощи валика и муфты. Регистрация и запись сигнала от конвертера крутильных колебаний осуществляется при помощи 4-х канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) HandyScore 4, который подключается к компьютеру через высокоскоростной USB порт. Поставляемая вместе с АЦП HandyScore 4 программа позволяет превратить компьютер в записывающий осциллограф, вольтметр, частотомер и анализатор спектра. Это позволяет одновременно отслеживать запись сигнала во временной области (а), выполнять его спектральный анализ (б) и контролировать частоту вращения вала. (Рис. 100).



Рисунок 99 Устройство и внешний вид оптического энкодера.

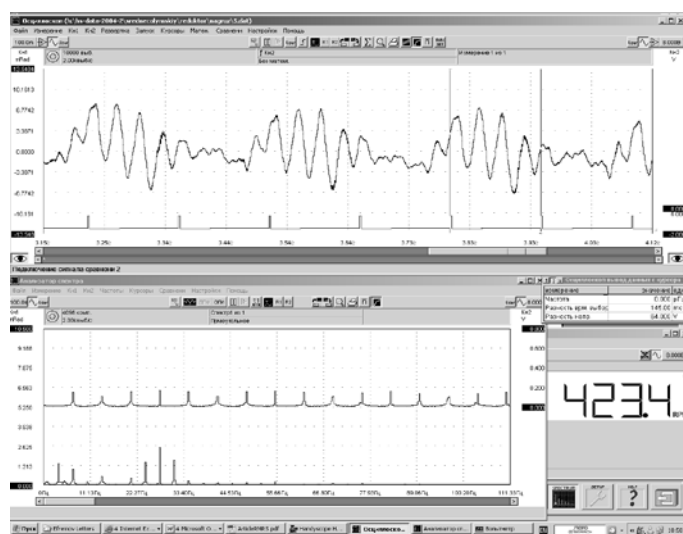


Рисунок 100 Вид экрана компьютера в процессе выполнения измерений.

Запись сигнала, выполненная при использовании энкодера, получается практически без каких-либо искажений.

Наибольшее число измерений на валопроводе было выполнено с применением лазерного датчика LT-850 и ленты типа "зебра" (Рис. 101).

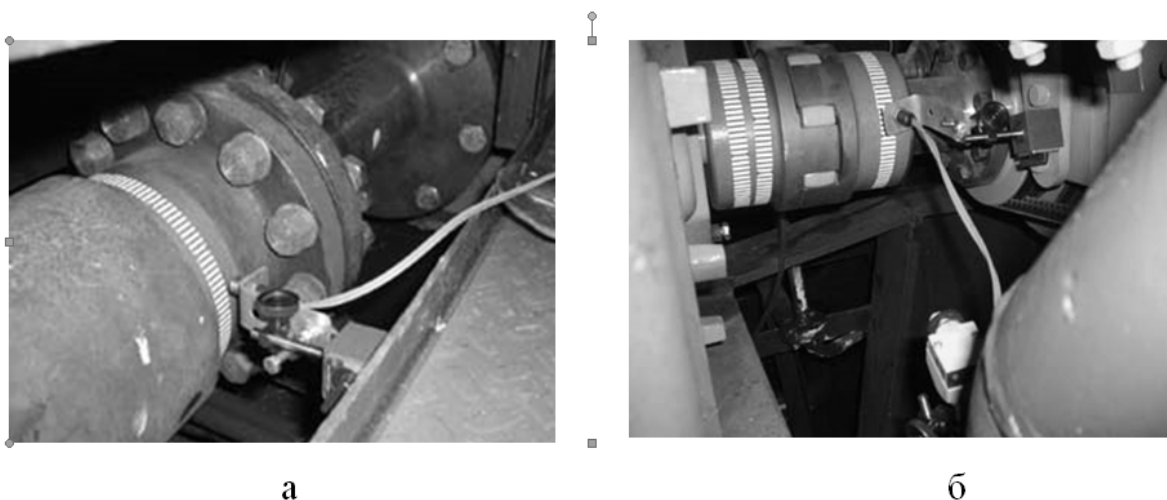


Рисунок 101 Примеры установки лазерного датчика. а) на валопроводе за редуктором; б) перед носовым устройством отбора мощности.

Результаты измерений фиксируются на экране компьютера в виде двух основных картинок (диаграмм) – собственно торсиограммы (см. рис. 100а) и спектрограммы (рис. 100б). Отметим хорошее согласие этих записей с теоретической торсиограммой на рис. 97.

Наибольшее практическое значение имеет запись и анализ амплитуд спектральный гармоник на спектрограмме. В частности, эта процедура необходима при диагностировании демпферов крутильных колебаний, когда в качестве диагностического параметра используется частота и амплитуда наиболее сильного резонанса моторной формы крутильных колебаний.

Эти измерения выполняются на работающем двигателе при плавном изменении частоты вращения во всем рабочем диапазоне оборотов.

#### 4.5.5. Методика оценки остаточного ресурса демпфера

Важнейшим в методике является пятый раздел «Оценка технического состояния и остаточного ресурса демпфера», где описываются все процедуры расчета остаточного ресурса с целью принятия решения о возможности допуска демпфера в эксплуатацию с указанием срока следующего диагностирования. Для этого были разработаны программы в электронных таблицах EXCEL и в среде программирования MATHCAD.

Исходная версия программы с инструкцией для пользователя была разработана в электронных таблицах EXCEL для инспекций Регистра. Она показана на рис. 102. В основу методики оценки остаточного ресурса  $R_{ост}$  был положен принцип, который сводится к умножению назначенного ресурса  $R_n$  (например 30 тыс. ч.) на некоторый коэффициент  $K < 1$ .

17									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1									
2		<b>Оценка остаточного ресурса</b>							
3		<b>и технического состояния демфера</b>							
4									
5	<b>Постоянные исходные данные</b>								
6									
7	Заданный ресурс (если не известен, то 0)			час					
8	назначенный ресурс Rзад=		30000	час					
9	Допускаемые напряжения		217	кПа·с·м <sup>2</sup>					
10	Эталонные напряжения		150	кПа·с·м <sup>2</sup>					
11	Эталонная моторная частота		3103	коп/мин					
12	уровень надежности демфера		1						
13	наработка за год		5200	час					
14	наработка за рейс		2800	час					
15	Допустимое отклонение амплитуды		0,1						
16	Допустимое отклонение частоты		0,05						
17									
18	<b>Результаты династирования</b>								
19									
20	фактические напряжения		185	кПа·с·м <sup>2</sup>					
21	фактическая частота		3100	коп/мин					
22									
23	<b>Определение коэффициентов</b>						k 1=		
24							k 2=		
25	Отклонение частоты от нормы		0,999				k 3=		
26	Коэффициент учета надежности		2						
27	Коэффициент учета амплитуды		0,3						
28	Коэффициент учета частоты		1						
29									
30		<b>Заключение</b>							
31									
32	Расчет сделан для	нормального		уровня надежности					
33	Демфер имеет	удовлетворительное		техническое состояние					
34	Остаточный ресурс	3735		часов					
35	Число лет	0,7		лет					
36	Число рейсов	1,4		рейсов					
37	Момент инерции								
38	демпфера	не изменился		при такой его состоянии -					
39				можно проверить масло					
40									
41									

Рисунок 102. Программа оценки остаточного ресурса демфера

$$R_{ост} = K \cdot R_n \quad (57)$$

Например, рекомендуемый Регистром остаточный ресурс соответствует  $K = 1/3$ . Некоторые фирмы для той же цели применяют  $K = 1/2$ .

Остаточный ресурс определяется по формуле (57) после проведения успешных измерений крутильных колебаний, когда фактические напряжения не превышают допускаемых значений. В противном случае демфер не может быть допущен в эксплуатацию.

Однако у измерительных лабораторий возникал вопрос о том, что делать, если напряжения и частоты явно изменяются в худшую сторону, хотя и не превышают норм РС. В таких случаях создавалась угроза аварии после некоторой наработки дизеля. Получение ответа на этот вопрос являлся основной целью разработки новой методики диагностирования демпферов.

Оригинальность разработанной методики заключается в более корректном определении коэффициента  $K$  по формуле (58):

$$K = K_{над} K_{напр} K_{мид}, \quad (58)$$

где  $K_{над}$ ,  $K_{напр}$  и  $K_{мид}$  - коэффициенты, учитывающие соответственно: уровень надежности демпфера, фактический уровень напряжений и фактор изменения эффективного момента инерции демпфера.

Рассмотрим рекомендации по определению этих коэффициентов.

Для определения  $K_{над}$  было введено понятия о категории надежности демпфера при трех уровнях надежности: нормальный, низкий и высокий. Для нормального уровня применяется  $K_{над} = 1/2$ , для низкого  $K_{над} = 1/4$  и для высокого  $K_{над} = 1$ . В методике уровень надежности определяется по следующим признакам (по мере накопления информации об отказах, уровень надежности демпфера может быть пересмотрен). Низкий уровень надежности относится к двигателям, демпферы которых имели отказы при наработках, не превышающих назначенного ресурса.

Нормальный уровень надежности относится к двигателям, демпферы которых не имели отказов при наработках, превышающих назначенный ресурс.

Высокий уровень надежности относится к двигателям, демпферы которых не имели отказов в течение всего срока службы, и/или, напряжения от крутильных колебаний в коленчатом вале двигателя во всем диапазоне частот вращения не превышают половину допускаемых значений, даже в случае частичной потери демпфирующих свойств.

В большинстве случаев демпферы имеют нормальный уровень надежности и для них поправочный коэффициент равен  $1/2$ . Низкий уровень надежности встречается редко. Еще реже (в исключительных случаях) удается присвоить демпферу высокий уровень надежности. Обычно это связано с тем, что на данный дизель вообще не следовало устанавливать демпфер, как это было с главными двигателями 6 L 525 чешской постройки на судах типа «Баренцево море».

Таким образом, по умолчанию принимается  $K = 1/2$  и лишь в случае получения информации об отказах демпферов следует провести работу по исследованию их надежности по рекомендациям монографии [37] и обосновать переход на коэффициент  $1/4$ .

Ключевым вопросом данной методики является определение коэффициента учета фактических напряжений  $K_{напр}$  с помощью которого и определяется остаточный ресурс.

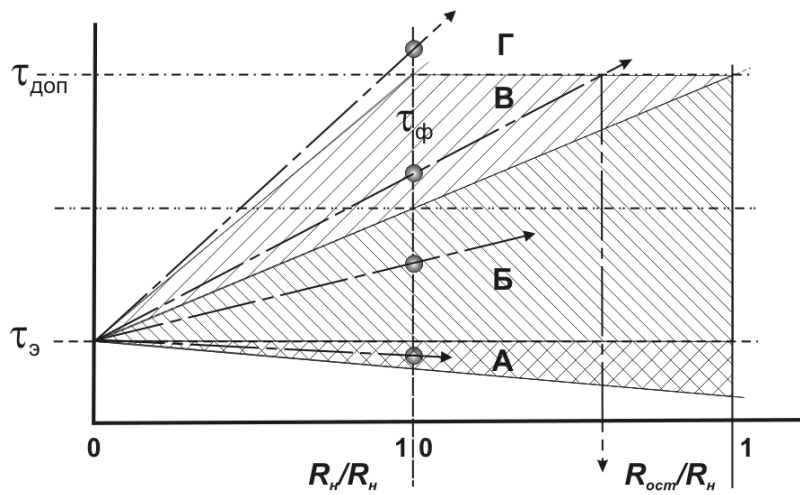


Рисунок 103 Принцип оценки остаточного ресурса демпфера

Принцип определения этого коэффициента поясняется схемой на рис. 103. Рисунок разбит на две части. Левая часть изображает работу демпфера в течение первого периода отработки назначенного ресурса до проведения торсиографирования. Правая часть изображает период отработки остаточного ресурса идеального демпфера (до корректировки с учетом уровня надежности) после проведения торсиографирования.

$$K_{напр} = \frac{\tau_{доп} - \tau_{ф}}{\tau_{ф} - \tau_{э}} \quad (59)$$

где  $\tau_{э}$  – эталонные напряжения,  $\tau_{ф}$  – фактические напряжения, откорректированные с учетом коэффициента допустимых отклонений,  $\tau_{доп}$  – допускаемые напряжения.

$K_{напр} = 0$  при фактических напряжениях  $\tau_{ф} \geq \tau_{доп}$  (зона Г).

Еще один коэффициент предложено учитывать при определении остаточного ресурса. Этот коэффициент назван коэффициентом изменения момента инерции демпфера  $K_{мид}$ , который оценивается по величине отклонения резонансной частоты от его эталонного значения.

Если окажется, что абсолютное отклонение частот превысило 5% (что обычно соответствует изменению момента инерции массы демпфера более чем на 20%), то следует принимать  $K_{мид} = 0.5$ , в противном благоприятном случае  $K_{мид} = 1$ .

Общую оценку технического состояния демпфера предложено выполнять с помощью коэффициентов соответствия остаточного ресурса наработкам за рейс и за периоды между ежегодными и очередными освидетельствованиями.

Тип судна - СРТМ пр. 502 Судовладелец - Мурманский тралфлот  
 Название судна - "ИНТА" Дата испытаний - 12.10.2006  
 Исполнитель - АНО "Стандарт-Морепродукт"

### 1. Исходные данные

#### Характеристика объекта

Двигатель - главный 8NVD48AU Демпфер типа В-790  
 Суммарная наработка, тыс. ч.  $H_{\Sigma} := 56$   
 От последнего торсиографирования  $H_{\text{торс}} := 20$   
 Назначенный ресурс, если он не известен, то поставить  $R_{\phi} := 0$   
 Принятый назначенный ресурс  $R_n := \text{if}(R_{\phi} = 0, 30, R_{\phi})$   $R_n = 30$   
 Нарботка за рейс  $H_{\text{рейс}} := 3$   
 наработка за календарный год  $H_g := 5.1$

#### Эталонные диагностические параметры моторной формы

Эталонная частота, кол/мин  $N_{\text{ЭТ}} := 2270$   
 Масштаб напряжений, МПа/рад  $m_n := 3.574 \times 10^3$   
 Порядок исследуемого резонанса  $\nu := 8$   
 Эталонная амплитуда, рад  $A_{V_{\text{Э}}} := 0.0037$   
 Эталонные напряжения МПа  $\tau_{\text{Э}} := A_{V_{\text{Э}}} \cdot m_n$   $\tau_{\text{Э}} = 13.224$   
 Допускаемые напряжения, МПа  $\tau_{\text{доп}} := 32$   
 Эталонная суммарная амплитуда при номинальных оборотах, рад  $A_{\Sigma_{\text{Э}}} := 0.0055$   
 Допускаемые напряжения при номинальных оборотах, МПа  $\tau_{\text{ДНМ}} := 23$   
 Условная допускаемая амплитуда при номинальных оборотах, рад  $A_{\Sigma_{\text{Д}}} := 1.3 \cdot \frac{\tau_{\text{ДНМ}}}{m_n}$   $A_{\Sigma_{\text{Д}}} = 0.008$   
 Коэффициент доверительных границ для оценки напряжений  $\alpha := 0.1$   
 Коэффициент доверительных границ для оценки частоты  $\beta := 0.05$

#### Результаты внешней дефектации демпфера

При наличии внешних повреждений: вытекание масла, деформация корпуса, обрывы крепежных болтов и других (поставить галочку, если демпфер следует признать неисправным)  
 повр :=  Да                      повр = 0

Рисунок 104 Первый фрагмент оценки исправности демпфера

### Результаты торсиографирования

Фактические резонансные обороты, об/мин	$n_v := 277$	
Фактическая резонансная амплитуда, рад	$A_{v\phi} := 0.0062$	
Фактические резонансные напряжения МПа	$\tau_{\phi} := A_{v\phi} \cdot (1 + \alpha) \cdot m_n$	$\tau_{\phi} = 24.375$
Фактическая резонансная частота, кол/мин	$N_{\phi} := n_v \cdot v$	$N_{\phi} = 2216$
Фактическая суммарная амплитуда при номинальной частоте 375 об/мин	$A_{\Sigma\phi} := 0.0075$	



УНД :=

Нормальный  
Высокий  
Низкий

**Обязательно установить требуемый УНД!**

УНД = 1



### 3. Оценка остаточного ресурса

Перевод диагностических параметров в безразмерную систему

$$D_{\text{э}} := \frac{\tau_{\text{э}}}{\tau_{\text{доп}}} \quad D_{\text{доп}} := \frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{доп}}} \quad D_{\phi} := \frac{\tau_{\phi}}{\tau_{\text{доп}}} \quad K_N := \frac{N_{\phi}}{N_{\text{эт}}}$$

$$D_{\text{э}} = 0.413 \quad D_{\text{доп}} = 1 \quad D_{\phi} = 0.762 \quad K_N = 0.976 \quad \text{xx} := \frac{D_{\text{э}} + 1}{2}$$

Определение коэффициента технического состояния

$$k_{\tau} := \text{if} \left( D_{\phi} - D_{\text{э}} = 0, 100, \frac{D_{\text{доп}} - D_{\phi}}{D_{\phi} - D_{\text{э}}} \right) \quad k_{\tau} = 0.684 \quad \text{xx} = 0.707$$

$$k_{\tau} := \text{if} (D_{\phi} \leq \text{xx}, 1, \text{if} (k_{\tau} \leq 0, 0, k_{\tau}))$$

Принятый коэффициент технического состояния демпфера  $k_{\tau} = 0.684$

$$Y_{\text{над}} := \text{if} \left( k_{\tau} \geq 1, Y_{\text{Н}}, \text{if} \left( Y_{\text{Н}} = 1, \frac{1}{2}, Y_{\text{Н}} \right) \right) \quad Y_{\text{над}} = 0.5$$

Оценка технического состояния демпфера по изменению частоты свободных колебаний

$$K_N := \begin{cases} \text{"uvelich"} & \text{if } (1 - \beta) \geq K_N \\ \text{"umench"} & \text{if } K_N \geq (1 + \beta) \\ \text{"neizmen"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_{\text{mid}} := \text{if} \left[ (1 - \beta) \leq K_N \leq (1 + \beta), 1, 0.5 \right]$$

Рисунок 105 Второй фрагмент оценки исправности демпфера



Отклонение частоты относительно доверительных границ соответствует оценке изменения момента инерции демпфера  $KN = \text{"neizmen"}$  и коэффициенту учета повреждения демпфера  $K_{mid} = 1$

Оценка остаточного ресурса демпфера

Максимально-возможный остаточный ресурс

$$R_{стmax} := R_n \cdot Y_{над} \quad R_{стmax} = 15$$

Остаточный ресурс

$$R_{ост} := R_{стmax} \cdot k_t \cdot K_{mid} \quad R_{ост} = 10.26$$

Оценка долговечности по коэффициентам соответствия остаточного ресурса наработкам за рейс, до ежегодного и до очередного освидетельствований

$$K_{рейс} := \frac{R_{ост}}{H_{рейс}} \quad K_{год} := \frac{R_{ост}}{H_g} \quad K_{оч} := \frac{R_{ост}}{4 \cdot H_g}$$

$$K_{рейс} = 3.419 \quad K_{год} = 2.011 \quad K_{оч} = 0.503$$

Оценка :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"neispravn"} \text{ if } R_{ост} = 0 \\ \text{"ploho"} \text{ if } 0 < K_{рейс} < 1 \\ \text{"udovletv"} \text{ if } 1 < K_{год} < 2 \\ \text{"good"} \text{ if } 0.5 < K_{оч} < 1 \\ \text{"verygood"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$

$$Оценка = \text{"good"} \quad \text{рейсов} := \text{round}(K_{рейс}, 1)$$

$$\text{лет} := \text{round}(K_{год}, 1) \quad \text{рейсов} = 3.4 \quad \text{лет} = 2$$

уровню :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"niskomu"} \text{ if } Y_{над} = \frac{1}{4} \\ \text{"normalno"} \text{ if } Y_{над} = \frac{1}{2} \\ \text{"visokomu"} \text{ if } Y_{над} = 1 \quad D_{\phi} = 0.762 \\ \text{"nedopustimomu"} \text{ otherwise} \quad xx = 0.707 \end{array} \right.$

Максимальный остаточный ресурс  $R_{стmax} := R_{стmax} \cdot K_{mid}$

с учетом изменения массы  
 $R_{стmax} = 15$

Рисунок 106 Третий фрагмент оценки исправности демпфера

### Заклучение

- Надежность демпфера соответствует уровню = "normalno" , отношение фактических напряжений к допускаемым  $D_{\phi} = 0.762$  и отношение фактической частоты к эталонной  $K_N = 0.976$  .
- На этом основании демпферу дана Оценка = "good" и он может быть допущен в эксплуатацию на срок не более чем  $R_{ост} = 10.26$  тыс. часов, что соответствует числу рейсов = 3.4 и лет = 2 .
- Состояние системы "корпус демпфера - маховик"
- $K_N = "neizmen"$

### График

Диапазон изменения ресурса  $r := 0, 0.1 \cdot (R_{остмак}) .. (R_{остмак})$

Основная функция

$$T(r) := \text{if } D_{\phi} \leq xx, \tau_{\phi} + \frac{(\tau_{\text{доп}} - \tau_{\phi}) \cdot r}{R_{остмак}}, \tau_{\phi} + \frac{(\tau_{\phi} - \tau_{\text{э}}) \cdot r}{R_{остмак}}$$

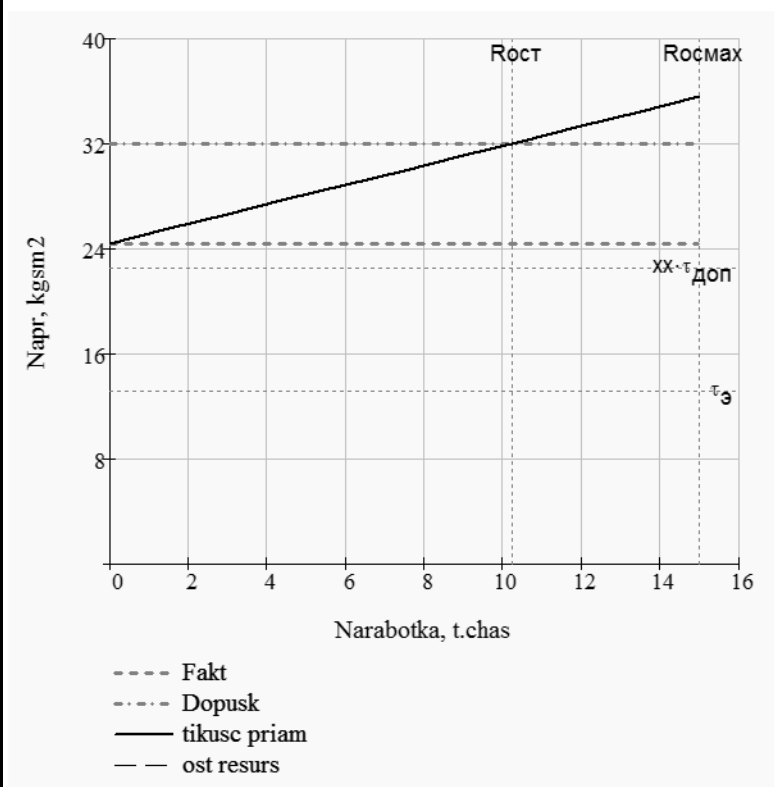


Рисунок 107 Заклучительный фрагмент оценки исправности демпфера

Поле отработки остаточного ресурса разделено на четыре зоны А, Б, В и Г. Если решающая прямая будет проходить ниже или выше эталонных напряжений в зонах А и Б, то коэффициент  $K_{напр} = 1$ .

В случае прохождения решающей кривой через зону В коэффициент

Эти коэффициенты получаются путем деления остаточного наработку двигателя за рейс, за год и за 4 года. Округление полученных значений до ближайшего целого числа дает количество рейсов и лет, которые может отработать двигатель до следующего диагностирования демпфера. Величины коэффициентов соответствия остаточного ресурса позволяют формулировать заключение об общем техническом состоянии демпфера с помощью специальных тестов.

Фрагменты программы оценки технического состояния и остаточного ресурса силиконового демпфера в редакторе MATHCAD показаны на рис. 104...107, где обозначения величин не всегда совпадают с обозначениями в тексте этого параграфа. В рассматриваемом примере установлено, что остаточный ресурс может быть принят равным 10000 час, что соответствует 2 годам эксплуатации.

Отчет о диагностировании демпфера составляется по результатам диагностирования на конкретном судне в соответствии с программой и должен быть одобрен РС.

## **5. Общее заключение**

Завершая этот труд, представляется целесообразным, во-первых, напомнить о его основных результатах и, во – вторых, наметить актуальные проблемы, которые надо бы решать в будущем.

### **5.1. О системе RCM**

Говоря о системе RCM, как о методологии управления техническим обслуживанием, ориентированным на надежность, рекомендуется различать два направления ее рекламирования. Первое направление в общих чертах описывает преимущества и методологические основы этой системы, связанные с теорией вероятности и математической статистикой. Они особо глубоко и конкретно показаны на сайтах корпорации KConsult C.I.S., WQS и ReliaSoft. При этом основная концепция методологии RCM базируется на методах расчета структурной надежности (точнее – безотказности) электронных систем. В основу анализа FMEA/FMECA по ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) также положено изучение безотказности систем с использованием стандартов серии «Менеджмент риска» об анализе дерева неисправностей, структурной схеме надежности булевых и Марковских методах и т.п. [28]. Нельзя отрицать целесообразность широкого изучения показателей безотказности для изделий, ремонтируемых по потребности с целью повышения качества их элементов, как это показано на примере ремонта электронного планшетного компьютера в программном комплексе WQS. В этом случае используются все компоненты RCM, начиная с FMEA и кончая FRACAS.

Однако, оборудование ответственного назначения многих предприятий промышленности и транспорта обслуживается по предупредительным системам TOP - по плану или по состоянию. Обоснование и контроль нормативов межремонтных периодов такого оборудования требует применения показателей

долговечности и ремонтпригодности с учетом вероятностной природы деграционных процессов элементов машин. Теоретические методы решения этой задачи подробно изложены на американском портале ReliaSoft, но примеров их применения в рассмотренных источниках найти не удалось.

Практическая направленность характерна для второго направления рекламы об автоматизированных системах управления активами и ТОР предприятий на сайтах ряда компаний, например, НПП «СпецТек». Но, здесь даже нет упоминаний о столь высоких материях, как сложный математический аппарат портала ReliaSoft. В качестве показателей, имеющих некоторое отношение к оценке надежности, там применены только средняя наработка на дефект MTBF и среднее времени устранения дефекта MTTR, что не имеет прямого отношения к оценке не только долговечности, но и безотказности объектов. Для машин и механизмов, проходящих ТОР по плану или по состоянию, такой подход не приемлем, поскольку события обнаружения повреждений (например, достижения допустимых износов) при ремонте нельзя смешивать с отказами в межремонтный период. Четкого различия в управлении активами при разных стратегиях ТОР в руководствах TRIM не приводится.

Сделанные замечания не означают отрицательного отношения к программным модулям управления основными фондами и ТОР предприятий. Безусловно системы, подобные TRIM, позволяет повысить культуру планирования, контроля, и анализа деятельности предприятия и тем самым оптимизировать затраты на ремонты механического и энергетического оборудования, что положительно влияет на их качество. Не исключена возможность выявления конструктивных недостатков изделий. Но системы, подобные TRIM, не содержит прямых методов и программ по управлению техническим обслуживанием путем прогнозирования показателей долговечности, безотказности и ремонтпригодности оборудования, что является целью RCM.

Таким образом, рекламируемые компоненты RCM, начиная с FMEA и кончая FRACAS, в основном направлены на изучение и улучшение показателей безотказности на предприятиях изготовителей техники без четкой ориентации на управление техническим обслуживанием при эксплуатации. С другой стороны, на сайтах об АСУ активами подробно описывается организация ТОР, но управление надежностью при этом практически не рассматривается. Это и привело к идее разработки концепции НОТЭ.

## **5.2. О концепции НОТЭ**

Научный и практический опыт исследования эксплуатационной надежности судовой техники позволил нам предложить модернизированную концепцию системы управления, названной НОТЭ, т.е. «надежностно - ориентированной технической эксплуатацией», которая направлена на практическое решение всех проблем, заявленных в методологии RCM. Замена термина «техническое обслуживание» на термин «техническая эксплуатация» связано с тем, что последний термин является более общим понятием, которое включает в себя все компоненты ТОР.

При изложении сущности концепции НОТЭ в первую очередь были сформулированы и уточнены два вида производственных процесса.

К первому виду производственного процесса отнесена техническая эксплуатация с входящей в нее системой ТОР. При этом к объектам (предметам труда) отнесены не только машины, но и системы более высокого уровня – объекты конечного назначения (ОКН). Была показана известная терминология и классификация ТОР, показана роль служб ОКН и документации в организации технической эксплуатации.

Затем был рассмотрен второй вид производственного процесса – процесс изучения надежности (ПИН), где уместно было дать классификацию субъектов этого процесса - заказчиков и исполнителей ПИН разного уровня. К объектам (предметам труда) ПИН второго вида отнесены исследуемые показатели надежности и отчетная документация с результатами исследования надежности. Роль средств труда в этом ПИН исполняют правила эксплуатации машин, информация с мест выполнения ТОР или эксплуатации, и конечно - методы расчета надежности. Обращено внимание на применение цензурированных и параметрических вероятностных моделей при оценке гамма – процентных ресурсов.

Особо рассмотрены средства и методы технической диагностики, которые имеют прямое отношение к системе ремонтов по состоянию. Особое внимание уделено изучению износов узлов машин с целью корректировки межремонтных периодов и объема ТОР.

### **5.3. О примерах управления НОТЭ**

Наибольший интерес для практики имеет последняя глава книги с конкретными примерами управления НОТЭ при разных уровнях организации технической эксплуатации и процесса изучения надежности.

В первую очередь рекомендуется обратить внимание на подход к эффективному управлению надежностью малых холодильных машин на отраслевом уровне с применением оригинальной методологии получения и обработки информации об отказах машин при участии служб ТОР отрасли. Интересно была решена проблема мониторинга интенсивности отказов в гарантийный период специальным матричным методом, который нам удалось снабдить простым программным обеспечением. Результатом этой комплексной работы явилось оперативное обнаружение и устранение конструктивно технологических дефектов, разработка и совершенствование стандартов, а также отраслевой системы ТОР холодильной техники. Основным показателем надежности здесь была использована интенсивность отказов при  $\lambda = \text{const}$ . Хотя приведенная информация [39] относится к истории СССР в период 1950 – 1970 годов, этот опыт вполне может быть рекомендован для любой типовой техники при ее массовом производстве. Затраты на создание такой системы будут оправданы повышением качества и конкурентоспособностью продукции.

Следующий пример относится к управлению показателями долговечности (ресурсом до ремонта) конкретной машины - судового дизеля. Благодаря применению нормативного LA и допустимого LB уровня предельных износов рассматриваемой детали (поршневого кольца) и предварительной дефектации небольшой части этих деталей удастся корректировать плановые сроки машины в пределах 25% от назначенного ресурса и тем самым экономить средства на

TOP. Этот раздел добавлены алгоритмы программ прогнозирования ресурсов на основе параметрических моделей веерного и трендового типа.

Еще один отраслевой подход к обеспечению надежности типовых машин показан на примере другого судового двигателя. Была отмечена огромная работа по созданию системы непрерывного технического обслуживания и ремонта (СНТОР) на флоте рыбной промышленности Союза ССР. Рассматривается проблема, возникшая в связи с изменением сроков очередного освидетельствования судов по правилам морского регистра.

Применение указанных выше параметрических моделей с учетом уровней предельных состояний LA и LB позволили подтвердить возможность корректировки ресурсов машин не менее чем на 20-25%.

Любопытный и поучительный случай при технической эксплуатации машины рассмотрен в разделе 4.4 книги о разборе причин аварии главного двигателя судна. Интрига этой детективной новеллы заключалась в рассмотрении Арбитражном судом спора между судовладельцем (истец, страхователь) и страховой компании (ответчик, страховщик) о том, в какой мере относится к страховому случаю поломка двигателя из-за усталостного разрушение пружины клапана. На эту причину указал Сюрвейер на том основании, что в договоре страхования к страховому случаю запрещено относить «ветхость судна, его принадлежностей, их изношенности, включая эффект усталости металла». Страхователь (судовладелец) не мог согласиться с таким решением суда, поскольку в тот же пункт договора страхователь внес следующее дополнение: «Ветхим не может признаваться изделие, не выработавшее свой назначенный ресурс». К решению этого спорного вопроса была привлечена независимая научная организации в лице автора настоящей книги, что позволило найти более вероятную причину аварии. Сначала было доказано, что усталостная поломка трех пружин двигателя никакого отношения к понятию о ветхости не имеет, поскольку информация с компьютера позволила рассчитать фактическую наработку в циклах сжатия, которая оказалась вдвое меньше расчетного ресурса. Не исключено, что преждевременная поломка возникла из-за скрытого дефекта и увеличения нагрузки по причине сильного нагарообразования на клапанах. В итоге было корректно доказано, что основной причиной аварии послужило нагарообразование выхлопного тракта из-за длительной работы на малых нагрузках при низких температурах выхлопных газов в сочетании с поломкой пружины, а не ветхость последней из-за усталости металла.

В заключительном разделе книги рассмотрена методика диагностирования специальных средств защиты машин от вредных нагрузок с целью оценки их остаточного ресурса. К таким средствам относится силиконовый демпфер крутильных колебаний, который подлежит контролю после заданной наработки по методике правил регистра судоходства. Показана прогрессивная процедура измерения крутильных колебаний, и программа прогнозирования остаточного ресурса по результатам измерений.

#### **5.4. Рекомендации по совершенствованию НОТЭ**

Ограниченный круг рассмотренных примеров управления НОТЭ машин достаточен для того, чтобы подчеркнуть актуальность этой проблемы с одной

стороны и понять сложность, и высокую стоимость ее решения – с другой стороны. В этой связи целесообразно дать некоторые рекомендации по совершенствованию методологии НОТЭ для разных субъектов управления, которые можно условно разделить на изготовителей и потребителей (владельцев) продукции. В свою очередь каждый из них может иметь несколько уровней управления надёжностью с учётом количества подконтрольных объектов. Рассмотрим возможные варианты управления надёжностью.

Прежде всего, напомним, что самой сложной проблемой НОТЭ является получение исходных данных об отказах при эксплуатации и повреждениях, обнаруженных при ТОР. Наиболее эффективно эту работу выполняют изготовители массовой или крупносерийной продукции при наличии у фирм-поставщиков сервисных служб и дилеров по ТОР. Понятно, что тогда имеются все условия для выполнения ТОР с высоким качеством, благодаря квалифицированным специалистам, наличию запчастей и других факторов материально-технического и методического обеспечения. В тоже время они имеют возможность оперативно получать информацию о надёжности через сервисные службы и принимать меры по устранению обнаруженных дефектов.

Многие современные фирмы-изготовители, скорее всего, уже имеют указанные службы ТОР для исследования надёжности, как на этапе создания, так и при эксплуатации. Менее опытным изготовителям массовой продукции рекомендуется взять на вооружение информацию об обеспечении надёжности малых холодильных машин (глава 4.1) или о программном комплексе WQS компании РТС (глава 1.2.2).

К сожалению, еще имеются немало предприятий, которые начинают относиться серьезно к проблеме надёжности своей продукции лишь при возникновении крупных аварий и даже катастроф. Это приводит к большим экономическим убыткам, что было показано на примере расследования причин аварии судового двигателя в главе 4.4.

Владельцам ОКН можно также рекомендовать включать в структуру своих подразделений специализированную службу надёжности, обеспеченную высококвалифицированными кадрами. В состав этой службы желательно включать опытного юриста по страхованию продукции. Для повышения эффективности этой службы рекомендуется предусмотреть следующие условия:

1. Основной задачей службы считать регистрацию и статистическую обработку информации об отказах (особенно, аварий),
2. Для оперативного и своевременного определения причин крупных отказов иметь постоянную связь с поставщиками продукции и комплектующих изделий (если это возможно).
3. Для определения причин застрахованных аварийных случаев надо активно сотрудничать с авторитетными организациями и квалифицированными специалистами
4. При рассмотрении конкретных проблем НОТЭ, таких как корректировка нормативных сроков службы или диагностика машин, привлекать на договорных условиях творческие коллективы НИИ или ВУЗов.

Работа промышленных и транспортных предприятий в области надежности по указанным направлениям может быть совмещена с системой управления активами и ТОР, описанной в главе 1.3. Например, указания по исследованию надёжности конкретных машин могут быть добавлены в состав модулей программного комплекса TRIM.

Опыт показывает, что наибольшие трудности сбора первичной информации об отказах и повреждениях возникают у владельцев ОКН при исследовании надёжности типовых машин с целью корректировки нормативов ТОР или определение причин конструировано – технологических недочётов. В этом случае можно также привлекать на договорных условиях творческие коллективы НИИ или ВУЗов при участии поставщиков оборудования.

Особого рассмотрения требуют проблемы ресурсных испытаний как в порядке корректировки нормативных сроков типовой машины (глава 4.3), так и с целью диагностики состояний конкретной машины (глава 4.2) или ее элементов (глава 4.5). Эти проблемы связаны с переходом на систему ремонта машин по состоянию, но к такой стратегии следует подходить с большой осторожностью. Дело в том, что далеко не для всех деградиционных процессов имеются методы и средства диагностики без разборки машины. Поэтому оптимальной формой организации ТОР машин является сочетание системы ППР с предремонтной диагностикой.

К важнейшим вопросам ТОР относится выбор и приобретение необходимых средств и методов контроля и диагностики. Но здесь этот вопрос подробно не обсуждается ввиду большого разнообразия таких средств, хотя их создание и совершенствование остаётся актуальной задачей для всех отраслей промышленности и транспорта. Примеры некоторых способов технической диагностики приведены в главе 3.4 и 3.5.

Ещё одна из актуальных проблем относится к назначению допустимых и предельно – допустимых параметров при расчете показателей надёжности. Более или менее решенной можно считать проблему выбора вероятности не достижения предельного состояния  $\gamma$  и вероятности безотказной работы  $\beta$  в зависимости от последствия отказов (смотрите [33]).

Ряд вопросов возникает по поводу установления разработчиком допустимого уровня состояний элементов машин, например, износа подшипников. Этот сложный вопрос приходится решать изготовителю машины путём проведения специальных испытаний. На основании вероятностной сущности деградиционных процессов [32] в этой книге для оценки ресурса узлов машины предлагается применить запасной уровень износа LB, который выше нормативного уровня LA, но меньше критического уровня LR при соблюдении допустимой вероятности  $\gamma$ .

Такой подход позволил корректно объяснить возможность корректировки нормативных сроков службы в пределах 20 – 25% от назначенного ресурса, что имеет прямое отношение к основным задачам как RCM, так и НОТЭ.

Последний комментарий посвятим рациональному использованию аппарата теории вероятностной и математической статистики при исследовании надёжности и обосновании показателей долговечности машин. Из первой главы



видно, что указания в этой области колеблются от простейшего термина «наработка на дефект» на сайтах по управлению активами (раздел 1.3.3) до наукоёмкого изложения теоретических основ и практических методов расчета вероятностных показателей на сайте корпорации ReliaSoft (раздел 1.2.3). Оптимальным вариантом оценки ресурсов без избыточного наукообразия исследований предлагается считать вероятностные методы, которые описаны в этой книге и основаны на цензурированных и параметрических моделях формирования выборок отказов и повреждений.

В заключение следует выразить банальную, но важнейшую истину о решающем значении высокой квалификации исполнителей ПИН и экспертов, привлекаемых для разработки документации по управлению RCM и НОТЭ.

Автор выражает надежду, что этот труд будет способствовать повышению эффективности и надежности на всех этапах жизненного цикла машиностроительной продукции.

## Литература

1. *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*. Logistics Technology Support. CARDEROCKDIV, NSWC-11 May 2011
2. *PAS 55* - свод требований и рекомендаций по организации управления производственными активами, обобщающий лучшую мировую практику. Разработан Международным институтом Управления Активами (IAM) по заказу Британского Института Стандартов (BSI).
3. *SAE JA1011* - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes
4. *SAE JA1012 A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*
5. *Авария на СШ ГЭС* <http://www.astrokras.narod.ru/pub/5shges.htm>
6. *Анцевич А. В., Зуев А. В., и др.* Динамическая система технического обслуживания и ремонта судов. - Мурманск: Кн. изд-во, 1991.
7. *Восток-7*. Твердомер металлов ПОЛЬДИ-ХЮТТЕ. Паспорт и Руководство по эксплуатации. <http://vostok-7.ru/>
8. Гольд Б.В. и др. Прочность и долговечность автомобиля. М., Машиностроение, 1974. 328 с
9. *ГОСТ 15467-79 (СТ СЭВ 3519-81)* Управление качеством продукции. Основные понятия Термины и определения
10. *ГОСТ 18322-78* Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения
11. *ГОСТ 20911-89*. Техническая диагностика Термины и определения. М.: Госстандарт, 1989.
12. *ГОСТ 23.301-78* Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования
13. *ГОСТ 25866-83* Эксплуатация техники. Термины и определения
14. *ГОСТ 27.002-89*. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
15. *ГОСТ 27.003-90*. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
16. *ГОСТ 27.004-85*. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.
17. *ГОСТ 27.301-95*. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
18. *ГОСТ 27.310-95*. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
19. *ГОСТ 27.410-87*. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.
20. *ГОСТ 27860-88*. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа

21. *ГОСТ Р 27.606-2013* Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность
22. *ГОСТ Р 50779.10-2000* «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения»
23. *ГОСТ Р 51901.11-2005* Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство
24. *ГОСТ Р 51901.1-2002* Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
25. *ГОСТ Р 51901.12-2007* (МЭК 60812:2006) Менеджмент риска/ Метод анализа видов и последствий отказов (FMEA)
26. *ГОСТ Р 51901.13-2005* (МЭК 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей
27. *ГОСТ Р 51901.14-2007* Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы
28. *ГОСТ Р 51901.15-2005* Менеджмент риска Применение Марковских методов
29. *ГОСТ Р 51901.5-2005* Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
30. *ГОСТ Р 53863-2010* Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения.
31. *ГОСТ Р МЭК 60204-1-99*. Безопасность машин.
32. *Ефремов Л. В.* Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб: Наука, 2008.
33. *Ефремов Л. В.* Практика инженерного анализа надежности судовой техники. Л.: Судостроение, 1980.
34. *Ефремов Л. В., Черняховский Э. Р.* Надежность и вибрация дизельных установок промысловых судов. М.: Пищевая промышленность, 1980.
35. *Ефремов Л.В.* Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. — СПб. Нестор-История, 2011.
36. *Ефремов Л.В.* Вероятностные проблемы ресурсных испытаний. – СПб. Art-Xpress, 2014.
37. *Ефремов Л.В.* Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. — СПб. Наука, 2007.
38. *Иорш В. И., Крюков И. Э. и Антоненко И. Н.* Международные стандарты в области управления физическими активами. Вестник Качества. № 4. 2012
39. *Канторович В.И.* Надежность малых холодильных машин. М.: «Пищевая промышленность». 1972 г.
40. Компания «МАКСИМА». <http://max-i-ma.com/>
41. Компания Спец-Тек. <http://www.trim.ru/>
42. Корпорация KConsult c.i.s. <http://www.kconsult-cis.ru/>
43. Корпорация по надежности... ReliaSoft. <http://www.reliasoft.com/>
44. *МЭК 1025-90*. Анализ диагностического дерева отказов.

45. *МЭК 812-85*. Техника анализа надежности систем. Метод анализа вида и последствий отказов.
46. ООО «РСМ-системы» <http://www.rcm-systems.ru/about/>
47. *Положение о технической эксплуатации судов рыбной промышленности*. Утверждено Приказом Госкомрыболовства РФ от 5 мая 1999 г. № 107.
48. Попов А.А. Практика торсиографирования судовых установок импортными средствами измерений с оптическими и индуктивными датчиками. Электронное издание на 1 CD-R «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов: восьмая сессия международной научной школы, 22 октября -27 октября 2007 года, Санкт-Петербург» Издание зарегистрировано «26» декабря 2007 г.
49. *Программный продукт PTC Windchill Quality Solutions*.  
<http://ru.ptc.com/product/windchill>
50. Р 50-54-36-88 Обеспечение износостойкости изделий. Метод и приборы для измерений износа деталей из материалов на основе модифицированной древесины.
51. *Ремонт – Эксперт*. <http://www.remontexpert.ru/>
52. *Российский морской регистр судоходства*. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. НД № 2-020101-012. Санкт-Петербург. 2015.
53. *Технология ремонта тепловозов и дизель-поездов*: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / [В.И.Бахолдин, А.А. Воробьев, И. А. Воробьев, О. В. Зинченко]. — 2\_е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2013.
54. *Ушаков И.А.* Незванный ГОСТ. «Методы менеджмента качества», 5, 2011. <http://ria-stk.ru/mmqa/detail.php?ID=50010>
55. Хрущев М.М. и Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз - М.: Изд-во Академии наук, 1959.-217 с.
56. *Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И.* Таблицы для анализа и контроля надежности. М. : Советское радио, 1968.
57. *Эксплуатация и ремонт двигателей типа NVD-48, NVD-36 и NVD-24* М.: Пищевая промышленность, 1965.
58. *Яцура А. И.* Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник. -М.: Изд-во ИЦ ЭНАС, 2006.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
Основные обозначения и сокращения .....	5
1. Общие сведения о методологии RCM .....	6
1.1. Источники информации о RCM .....	6
1.2. Порталы о методологии RCM .....	8
1.3. Порталы управления активами и ТОП предприятий.....	21
1.4. Заключительный анализ информации о методологии RCM.....	31
2. Процессы технической эксплуатации машин .....	34
2.1. Общие положения .....	34
2.2. Процессы ТОП машин .....	38
2.3. Процессы ТОП объектов конечного назначения .....	43
3. Процессы изучения надежности машин .....	49
3.1. Общие положения .....	49
3.2. Термины и определения по надежности.....	53
3.3. Вероятностные методы оценки показателей надежности .....	57
3.4. Средства технической диагностики .....	69
3.5. Развитие метода искусственных баз для измерения износов.....	86
4. Примеры управления надежностью .....	108
4.1. Управление надежностью малых холодильных машин .....	108
4.2. Управление надежностью конкретной машины при системе ППР	133
4.3. Управление надежностью типовой машины при системе ППР .....	153
4.4. Анализ причин аварии машины .....	172
4.5. Пример диагностики демпфера судового двигателя.....	181
5. Общее заключение .....	195
5.1. О системе RCM .....	195
5.2. О концепции НОТЭ .....	196
5.3. О примерах управления НОТЭ.....	197
5.4. Рекомендации по совершенствованию НОТЭ .....	198
Литература .....	202

Леонид Владимирович Ефремов

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
НАДЕЖНОСТНО – ОРИЕНТИРОВАННОЙ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ МАШИН

Текст настоящего издания приводится в авторской редакции

Оригинал - макет Л. Ефремов  
Дизайн обложки Ю. Данилович

Подписано к печати 11.09. 2015. Формат 70x90/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 15.1 . Заказ № 69  
Тираж 80 экз.

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПМаш РАН)  
199178, Санкт-Петербург, В.О, Большой пр. 61

Отпечатано в типографии «Art-Xpress»  
199155, Санкт-Петербург, В.О., ул. Уральская, 17  
E-mail: [zakaz@art-xpress.ru](mailto:zakaz@art-xpress.ru)

<http://www.art-xpress.ru>

