

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Л.В. Ефремов, М.А. Скотникова

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ
ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Учебное пособие

ЧЕРНОВОЙ ВАРИАНТ

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2016

УДК 629.02:06-192

ББК 39.45

Е92

Техническая эксплуатация и надёжность промышленного оборудования: учебное пособие / Л.В. Ефремов, М.А. Скотникова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 128 с.

Учебное пособие, содержит структуру, сочетающую теорию и практику для решения инженерных задач при эксплуатации промышленного оборудования, путем выбора средств измерений, условий эксплуатации и методов исследования. Пособие позволяет научить студентов осуществлять и корректировать существующую систему технического обслуживания и ремонта (ТОР) на основе анализа надежности, планировать и проводить необходимые эксперименты, интерпретировать результаты и делать выводы.

Пособие предназначено для аудиторных занятий и самостоятельной работы по дисциплине «Техническая эксплуатация и надежность промышленного оборудования». Может быть использовано при выполнении научно-исследовательской работы бакалавров, магистров, аспирантов, слушателей программ дополнительного образования, обучающихся по направлению «Машиностроение».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

© Ефремов Л.В., Скотникова М.А., 2016

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016

ISBN

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ.....	7
1.1.	ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	7
1.2.	ПОНЯТИЕ О ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	10
1.3.	ПРОЦЕСС ТЕХНИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	16
1.4.	ПРОЦЕСС ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА	18
1.5.	ФОРМИРОВАНИЕ РЕМОНТНЫХ ЦИКЛОВ МАШИН	19
2.	ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ.....	26
2.1.	ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	26
2.2.	ИЗМЕРИТЕЛИ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....	30
2.3.	ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ.....	33
2.4.	ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ	43
2.5.	НОРМИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ МАШИНЫ	48
3.	РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ	54
3.1.	АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	54
3.2.	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ.....	57
3.3.	ЦИКЛИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ	61
3.4.	ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ УРИ.....	63
3.5.	ПРИМЕРЫ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	66
4.	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА.....	79
4.1.	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	79
4.2.	СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....	82
4.3.	ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ.....	86
4.4.	МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	90
4.5.	ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ	96
5.	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	98
6.	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	100
6.1.	ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПЗ – 1	100
6.2.	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПЗ – 2.....	104
6.3.	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПЗ – 3.....	108
6.4.	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПЗ – 4.....	115
7.	КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ	119

Список принятых сокращений

- ВБР – вероятность безотказной работы
- ВНПС – вероятность не достижения предельного состояния
- ГПР – гамма-процентный ресурс
- ГТУ – государственный технический университет
- ДП – диагностический параметр
- ЗМН – запас метрологической надежности
- КР – капитальный ремонт
- КУ – коэффициент ускорения
- МО – математическое ожидание
- МПИ – межповерочный интервал
- ОКН – объект конечного назначения
- ПД – процесс деградации
- ПО – промышленное оборудование
- ППО – планово-предупредительный осмотр
- ППР – планово-предупредительный ремонт
- РИ – ресурсные испытания
- РЦ – ремонтный цикл
- СИ – средство измерения
- СКО – среднеквадратическое отклонение
- СР – средний ремонт
- СТД – средство технической диагностики
- ТО – техническое обслуживание
- ТОР – техническое обслуживание и ремонт
- ТР – текущий ремонт
- ТЭ – техническая эксплуатация
- УРИ – ускоренные ресурсные испытания
- ХДП – характеристики деградационного процесса

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что примерно 80-90% отказов машин и механизмов происходит из-за износа узлов и деталей, а также рабочего инструмента. За полный цикл эксплуатации машин, эксплуатационные затраты связанные с их ремонтом в несколько раз превышают затраты на изготовление новых машин. Также значительные расходы обусловлены недооценкой значимости проблем износостойкости и долговечности машин, как ныне эксплуатируемых, так и намеченных к выпуску.

Важно проводить обучение студентов основам обеспечения надежности техники во время технической эксплуатации путем нормирования системы технического обслуживания и ремонта (ТОР) машин и выполнения мониторинга их технического состояния путем вероятностного моделирования процессов деградации эксплуатационных характеристик машин, включая процессы изнашивания узлов трения.

Поэтому целью обучения дисциплине «Техническая эксплуатация и надёжность промышленного оборудования» является - повышение надёжности работы подвижных соединений машин и механизмов при контактном взаимодействии, на основе изучения конструкторских, технологических, экономических и трибологических аспектов, охватывающих комплекс вопросов их трения, изнашивания, подбора трибоматериалов, смазок, расчёта и компьютерного моделирования.

Для достижения указанной цели студенты должны: изучить принципы планирования системы ТОР при разработке нормативной документации; освоить методы мониторинга технического состояния (диагностирования) машин в процессе эксплуатации; научиться решать задачи на основе специальных методов прогнозирования показателей надежности (и прежде всего - долговечности), учитывать как физическую, так и вероятностную природу процессов деградации со-

стояния элементов машин. К таким процессам в первую очередь относится изнашивание узлов трения, что имеет прямое отношение к науке о триботехнике.

Слушатель, освоивший программу, должен: обладать профессиональными компетенциями, включающими в себя способность: уметь сочетать теорию и практику для решения инженерных задач при эксплуатации промышленного оборудования; уметь осуществлять и корректировать существующую систему ТОР на основе анализа надежности; уметь использовать нормативно-правовые документы в своей профессиональной деятельности; уметь выбирать средства измерений в соответствии с требуемой точностью и условиями эксплуатации; уметь выбирать методы исследования, планировать и проводить необходимые эксперименты, интерпретировать результаты и делать выводы.

В курсе излагаются методы организации и нормирования систем технического обслуживания и ремонта (ТОР) машин, испытаний и диагностики состояния их узлов и деталей с учетом вероятностной природы деградационных процессов.

Содержание курса разбито на четыре разделов: 1. Основные понятия о технической эксплуатации промышленного оборудования; 2. Эксплуатационная надежность машин и оборудования; 3. Ресурсные испытания; 4. Диагностика состояния машин и оборудования при техническом обслуживании и ремонте.

С целью дистанционного преподавания дисциплины каждый ее раздел обеспечен презентациями аудио лекций и руководством по практическим занятиям (в редакторе PDF). Все вычисления выполняются в редакторе MATHCAD [1].

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

1.1. Характеристики промышленного оборудования

Работоспособность промышленного объекта конечного назначения (ОКН), например, судна, самолёта, тепловоза и др. по-разному зависит от надежности элементов его комплектующего оборудования (электростанции, радиостанции, холодильной установки и др.) [4].

Если, например, разрушение гребного винта или коленчатого вала приводит к аварийному ремонту рыболовецкого судна, то перегоревшая лампа светильника в машинном отделении является легко устраняемой неисправностью.

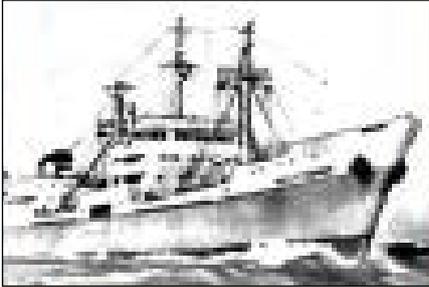
Имеются различия в видах ремонта ОКН. Одни виды изделий обслуживаются в рамках системы планово-предупредительного ремонта (ППР) и планово-предупредительного осмотра (ППО), а другие — по мере возникновения отказов. Поэтому не может быть одинакового подхода к нормированию и анализу надежности разных видов изделий. Этим вызвана необходимость их классификации таким образом, чтобы в каждую классификационную группу входили виды изделий, одинаково влияющие на надежность и эффективность работы промышленного объекта конечного назначения. Исходя из этого условия, сначала разделим всё оборудование ОКН, например судна, на две укрупненные функциональные группы.

В таблице 1 на примере промышленного объекта - рыболовецкого судна, представлена классификация, входящих в него разных видов промышленного оборудования и изделий, которые объединены по однотипности уровня технического обслуживания и ремонта.

\ К *первой группе* отнесено механическое оборудование, обеспечивающее основные функции судна как транспортного плавучего средства: судовые машины, электростанция, радиостанция и др.

Ко *второй группе* отнесено специальное оборудование, предназначенное для выполнения судном каких-либо специальных функций.

Таблица 1

Промышленный объект - судно			
			
2 группы промышленного оборудование судна			
1-ая группа механическое оборудование		2-ая группа специальное оборудование	
4 класса изделий, входящих в состав группы механического оборудования судна			
1 класс	2 класс	3 класс	4 класс
корпус, рулевое устройство, гребной винт, гребной вал, дейдвудные подшипники	главный двигатель, главный редуктор, подшипники валопровода, парогенератор	насосы, электромоторы и электродвигатели, сепараторы, компрессоры	лампы светильников в машинном отделении

После такого укрупненного разделения всего оборудования можно приступить к классификации изделий в рамках каждой группы оборудования. В частности, механическое оборудование делится на четыре класса, см. табл. 1.

К *первому классу* относятся изделия, техническое обслуживание и ремонт которых должны выполняться одновременно с работами по техническому обслуживанию и ремонту судна в целом. В этот класс попадают корпус, рулевое устройство, гребной винт, гребной вал, дейдвудные подшипники и другие элементы судна. Если произойдет отказ изделия первого класса, то для его восстановления потребуются выводить из эксплуатации все судно. С другой стороны, от надежности изделий первого класса, прежде всего, зависят сроки технического обслуживания (в частности, доковых работ) и ремонта судна в целом.

Ко второму классу относятся изделия, плановые ремонты которых должны совмещаться с плановыми ремонтами судна, а плановое техническое обслуживание выполняться в межремонтные периоды эксплуатации судна. К этому классу относятся не менее ответственные изделия — главный двигатель, главный редуктор, подшипники валопровода, парогенератор и т. п. Изделия второго класса отличаются от изделий первого класса тем, что во время эксплуатации плановые работы по их техническому обслуживанию выполняются силами экипажа. Это значит, что не всякий отказ изделия второго класса может повлечь за собой ремонт всего судна.

К третьему классу относятся изделия, которые также имеют плановую систему технического обслуживания и ремонтов, но эти работы могут выполняться в межремонтный период эксплуатации судна силами судового экипажа. К этому классу относится большинство вспомогательных механизмов небольших размеров — насосы, электромоторы и электродвигатели, сепараторы, компрессоры и т. п. Наличие плановой системы технического обслуживания и ремонтов свидетельствует о том, насколько ответственны эти изделия. В то же время возможность выполнения ремонтов на борту судна показывает, что даже серьезный отказ в принципе не приводит к аварийной ситуации для всего судна.

К четвертому классу относятся изделия, которые ремонтируются или заменяются только при возникновении отказов. Плановая система ремонтов и технического обслуживания для таких изделий не предусмотрена. К этому классу изделий можно отнести многие элементы судовой автоматики, дельные вещи или изделия бытового обихода. Для таких изделий плановая система не нужна именно потому, что выход их из строя в любой момент времени не скажется на выполнении судном его основных функций.

Изделия четвертого класса можно подразделить еще на две группы: невозстанавливаемые и восстанавливаемые. Невосстанавливаемые изделия — это изделия, которые должны заменяться в случае

первого отказа: например, электрическую лампочку, если перегорит нить накала, остается только заменить.

Ресурс (надежность) каждого элемента (изделия) промышленного оборудования соответствует определенному виду его технического обслуживания и ремонта (ТОР).

1.2. Понятие о технической эксплуатации

Техническая эксплуатация (ТЭ) является производственным процессом, который входит в состав более общего производственного процесса, названный коммерческой эксплуатацией ОКН, предназначенной для получения экономического результата (например, добычи, изготовления, хранения и транспортировки рыбной продукции промыслового судна). На оба эти процесса распространяются экономические законы любых процессов производства. В соответствии с этими законами для возникновения производственного процесса необходимо иметь три элемента (рис. 1)

труд как целесообразная деятельность человека;
предмет труда, на который направлен эта деятельность;
средства труда, с помощью которых человек воздействует на предмет труда.

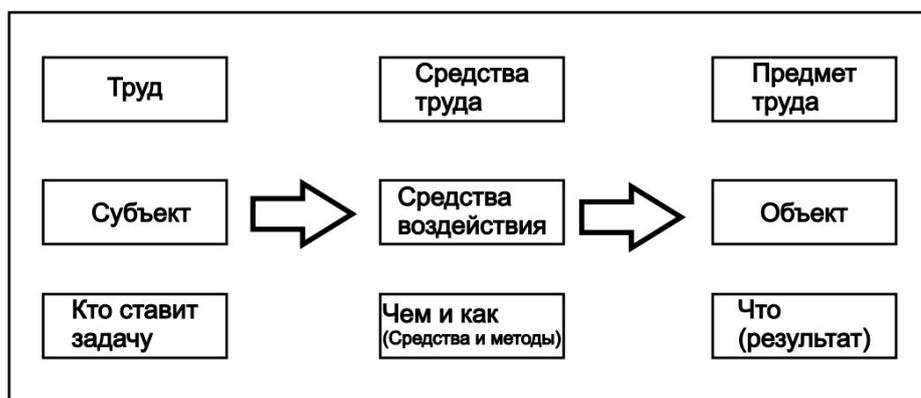


Рисунок 1 Элементы производственного процесса

Применительно к промысловому судну элементами коммерческой эксплуатации ОКН являются: труд экипажа, добываемое сырье, изготавливаемая из него и транспортируемая рыбная продукция (предметы труда) и собственно судно (средства труда).

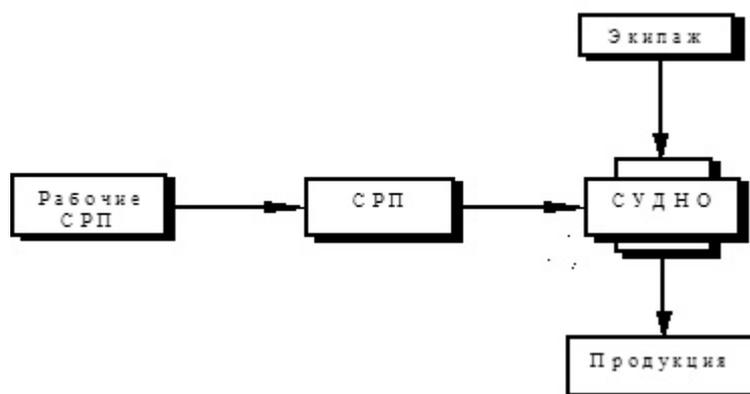


Рисунок 2 Взаимосвязь коммерческой и технической эксплуатации

При технической эксплуатации судно следует рассматривать как предмет труда, на которых направлена деятельность (труд) его экипажа и специалистов баз технического обслуживания и судоремонтных предприятия. При этом средствами труда в данном случае является комплекс документации, оборудования и оснастки судов и указанных береговых предприятия с помощью которых осуществляется техническая эксплуатация ОКН.

Таким образом, судно, являясь одновременно и средством труда и предметом труда, связывает между собой два производственных процесса - коммерческую эксплуатацию и техническую эксплуатацию (рис. 2).

Цель ТЭ - обеспечение экономичной и надежной работы судна при их коммерческой эксплуатации с минимальными затратами.

Основными задачами технической эксплуатации являются;
обеспечение высокой степени готовности ОКН к использованию по назначению;

обеспечение требуемого уровня надежности ОКН и технической безопасности использования ;

содержание ОКН в исправном состоянии;

рациональное использование комплектующего оборудования, , топлива и смазочных масел; увеличение эксплуатационного периода ОКН;

сокращение затрат на техническую эксплуатацию и повышение коэффициента технического использования K_{mi} , формула 1.

$$K_{mi} = \frac{T_э}{T_э + T_p + T_{mo}} \quad (1)$$

где, K_{mi} – коэффициент технического использования;

$T_э$ – эксплуатационный период промышленного оборудования;

T_p – период ремонта промышленного оборудования;

T_{mo} – период технического обслуживания.

Эта задача должна решаться на всех этапах “жизненного цикла судна”, который состоит из этапов создания и эксплуатации (рис. 3)..

Этап создания:

научно-технические исследования по перспективе развития флота на основе изучения рыбных запасов и др. Факторов,

разработка технического задания или контракта на проектирование и (или) покупку судна с требованиями;

технический проект судна;

рабочий проект судна;

постройка судна;

приемо-сдаточные испытания.

Этап создания завершается подписанием приемо-сдаточного акта Госкомиссией, например получением документов Морского Регистра судоходства и подъемом государственного флага на промысловом судне. С этого момента начинается техническая эксплуатация ОКН (судна).

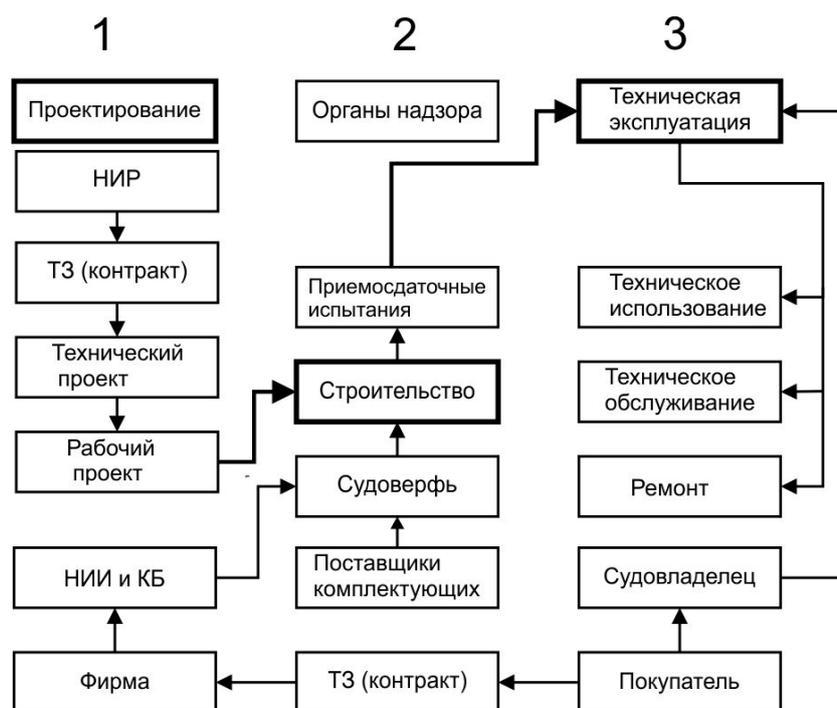


Рисунок 3. Место технической эксплуатации в жизненном цикле промышленного оборудования: 1 – проектирование, 2 – строительство и 3 - эксплуатация

Техническая эксплуатация в свою очередь состоит из трех элементов

- техническое использование,
- техническое обслуживание,
- ремонт.

При изучении данной дисциплины эти три элемента технической эксплуатации будут рассматриваться более подробно.

На рис. 4. показаны основные элементы технической эксплуатации и ТОР в общей структуре управления ОКН.

Из рис. 4 видно, что в состав каждого производственного процесса входят: такие объекты: как средства, документация, службы, персонал, органы надзора и системы управления.



Рисунок 4 Место ТЭ и ТОР в системе управления ОКН

Рассматриваемые процессы могут быть разбиты на отдельные операции, которые в общем случае подразделяются на следующие группы:

- подготовительные;
- контрольные;
- основные;
- заключительные.

В таблице 2. приводится содержание основных операций для рассматриваемых процессов технической эксплуатации рыболовного судна.

Таблица 2

	Процессы технической эксплуатации		
Операции	Техническое использование	Техническое обслуживание	Ремонт
Подготовительные	Подготовка техники к действию	Подготовка средств обслуживания	Подготовка судна и производства к ремонту
Контрольные	Функциональный контроль за рабочими параметрами	Техническая диагностика состояния техники	Пред ремонтная и узловая дефектация деталей и узлов
Основные	Управление техникой. Работы по оптимальному использованию энергии, топлива, масла, воды и других материалов	Техническое обслуживание по графику и после отказов судовым экипажем и ремонтные бригады.	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

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.

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 в соответствии с руководящей документацией 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.

Рассмотрим указанные операции для каждого этапа технической эксплуатации отдельно более подробно.

1.3. Процесс технического использования

При техническом использовании судна в целом выполняются такие *подготовительные операции* как составление рейсового задания и заявок, получения снабжения, горюче-смазочных материалов, воды, провианта и др.

Затем перед выходом судна в рейс производится проверка готовности техники судна к выполнению основной работы, санитарный, противопожарный и др. контроль.

Контрольные операции осуществляются и в процессе рейса путем постоянной радиосвязи с судовладельцем и периодических проверок групповыми специалистами и инспекторами.

Во время рейса *основная работа* по техническому использованию судна заключается в управлении техникой, обеспечивающей движение и маневрирование судна, добычу и обработку рыбы, выполнение швартовых и других операций с оптимальными затратами времени и средств.

При возвращении из рейса командный состав судна подводит *итоги деятельности*, готовит рейсовый технический отчет, обеспечивает уборку на судне и сдачу состояния судна соответствующим органам надзора.

Процесс *технического использования* отдельных видов машин можно показать на примере главного двигателя судна.

Перед запуском двигателя необходимо подготовить всего его системы, открыть соответствующие клапана, заполнить пусковые баллоны, продуть воздухом цилиндры через индикаторные клапана, провернуть маховик и др. Операции, которые завершаются запуском и прогреванием двигателя на заданных режимах.

В процессе работы механики ведут постоянный контроль за параметрами двигателя, периодически заносят результаты наблюдений в машинный журнал.

Основная работа по техническому использованию заключается в управлении режимами работы двигателя (пуски, реверсы, перевод на

долевые нагрузки и т.п.), выполнении регулировочных операций по результатам наблюдения, выполнении работ по техническому уходу согласно графикам (подтяжка резьбовых соединений, смазка узлов трения, смена масла в картере и др.

Во время рейса *техническая эксплуатация двигателей* осуществляются вахтенным методом при котором судовые механики в заданной последовательности выходят на дежурство (вахту), и по ее окончании передают дежурство сменной группе с соответствующей записью в машинном журнале.

Наибольший объем работ по заключительным операциям технического использования характерен для случаев перевода двигателя на режим длительного простоя, например, по причине отсутствия работы у судна или поступления его в ремонт. В таких случаях необходимо осушить все системы (топливную, масляную, водяную и др.) и консервировать основные детали и узлы.

Нарушение этих правил может привести к тяжелым последствиям (пожарам, разрыву труб и блоков из-за понижения температуры воздуха, коррозионным разрушениям и др.).

Свои особенности имеет *техническое использование* материалов и, в первую очередь, топлива, смазочного масла и пресной воды.

Этот процесс начинается с момента заказа и бункеровки этих материалов, которые должны удовлетворять требованиям к их качеству и количеству. Использование топлив и масел, не соответствующих требованиям руководства по эксплуатации может привести к прогрессирующему износу топливной аппаратуры и узлов трения двигателя, загрязнению и прогоранию выхлопных коллекторов, преждевременному выходу из строя других деталей.

Поэтому контроль качества необходимо начинать еще на стадии получения топлива и масла на предмет их соответствия сертификатам.

Периодический контроль качества топлива должен выполняться также в процессе эксплуатации двигателей и по окончании рейсов с целью уточнения сроков их замены и очистки.

К основным операциям по техническому использованию топлив относятся не только контрольные процедуры по оценке их качества, но и постоянный контроль уровня в танках и баках (картере), температуры, давления подачи и других параметров.

Важнейшей задачей технической использования топлива является экономия его расхода и прежде всего за счет снижения расхода энергии потребителями и выбора оптимальных режимов работы генераторов энергии (главных и вспомогательных двигателей, паровых котлов и др.).

С техническим использованием топлива, смазки, воды и других материалов тесно связана другая проблема - предотвращение загрязнения судами окружающей среды. В частности на ее решение направлено применения на судах специального оборудования по сбору и очистке сточных и льяльных вод, которое также включено в процесс технического использования судов.

1.4. Процесс технического обслуживания и ремонта

В основу управления процессом технической эксплуатации положена система технического обслуживания (ТО) и ремонта (ТОР) промышленного оборудования, которая представляет собой совокупность выполняемых в установленном порядке работ по поддержанию исправности (ТО) и восстановлению работоспособности (ремонт) судов и судовых технических средств.

Наиболее простой системой ТОР можно считать выполнение восстановительных работ по потребности (ремонт по состоянию), т.е. по мере выхода изделий из строя. Такая система применяется, например, при эксплуатации бытовой техники, которая ремонтируется только в случае каких либо неполадок.

Однако для объектов повышенного риска, к которым относятся все виды транспорта и, особенно, воздушного и морского транспорта, такая упрощенная система ТОР не пригодна. В случае выхода из строя судна или его элемента в случайный момент времени, как правило, не имеется возможности выполнить необходимый ремонт без риска понести большие коммерческие убытки, потерпеть крупную аварию, в том числе с гибелью судна и людей.

Предотвратить такие случаи и опасные последствия от них позволяет система *планово-предупредительных ремонтов (ППР)*, которая используется при технической эксплуатации судов и основных судовых технических средств.

Кроме системы ППР в производстве применяется система *планово-предупредительных осмотров (ППО)*, которая по своей целевой направленности близка к системе ежегодных и очередных освидетельствований Морского Регистра судоходства.

Можно сказать, что эти две системы взаимосвязаны и дополняют друг друга при решении основной задачи ТОР - обеспечение надежной работы судовой техники.

На практике возможны и смешанные системы ТОР, когда ремонты выполняются на основе системы ППР, а часть работ по ТО - по потребности.

В соответствии с ГОСТ система ППР представляет собой совокупность ремонтов нескольких видов, которые выполняются по графику с заданной последовательностью и периодичностью.

1.5. Формирование ремонтных циклов машин

В общем случае в систему ППР входят три вида ремонта:

- текущий, «т»;
- средний, «с»;
- капитальный, «к».

Основными характеристиками каждого вида «у» - ремонта являются:

- назначенный ресурс до ремонта R_y , тыс. час;
- номенклатура работ по маршрутному технологическому процессу (или типовая ремонтная ведомость);
- трудоемкость ремонта W_y , тыс. нормо-час.;
- продолжительность ремонта τ_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 (формула 2)

$$\begin{aligned} R_m < R_c < R_k \\ W_m < W_c < W_k \\ \tau_m < \tau_c < \tau_k \end{aligned} \quad (2)$$

При этом, как будет видно далее, *величины ресурсов* должны быть *кратны* друг другу, что позволяет составить схему (график) ремонтов (см. рис. 5).

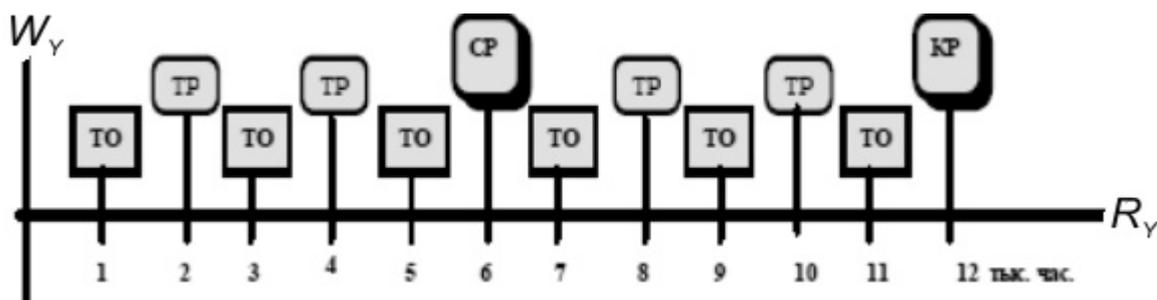


Рисунок 5 Формирование ремонтных циклов машин, где «ТР» - текущий; «СР» - средний, «КР» - капитальный ремонты.

Ремонтным циклом (РЦ) называется продолжительность эксплуатации оборудования от ее начала до капитального ремонта, который повторяется после каждого капитального ремонта.

Ремонтный цикл характеризуется следующими параметрами:

- продолжительностью ремонтного цикла, равной назначенному ресурсу до капитального ремонта R_k ;

- количеством ремонтов каждого вида в цикле n_y ;
- суммарным числом ремонтов в цикле $\sum n_y$.

Комплексным показателем ремонтного цикла можно считать коэффициент технического использования, формула 3, который может быть представлена в следующем виде.

$$K_{ТИ} = \frac{R_k}{R_k + \sum_1^m n_y \tau_y} \quad (3)$$

- где $K_{ти}$ – коэффициент технического использования;
 R_k – назначенный ресурс после капитального ремонта;
 τ_y – продолжительность ремонта;
 n_y – количество ремонтов каждого вида в цикле;
 m – число видов ремонта ($m=3$).

Ремонтный цикл характеризуется кодом РЦ, который, например, состоит из четырех однозначных чисел, например – 1124. Первая и вторая цифра 1 означает количество капитальных и средних ремонтов в цикле, третья цифра 2 – означает количество текущих ремонтов, а четвертая цифра 4 – количество технических обслуживаний (ТО с выводом из работы).

Система ППР основных судовых машин и механизмов и других судовых технических средств, включает в себя упомянутые виды ремонтов: текущий, средний и капитальный. Параметры этих ремонтов определяются по данным Руководств по эксплуатации, технических условий (ТУ) на ремонт или нормативам (графикам) ремонта, составленных применительно к рассматриваемому элементу судна при эксплуатации судов данного типа с учетом режима их эксплуатации.

Кроме того в систему ППР включаются плановые технические обслуживания, периодичность и объем работ у которых меньше, чем у текущего ремонта.

В зависимости от содержания и объема работ технические обслуживания (ТО) так же могут иметь несколько видов и обозначаться ТО-1, ТО-2, ТО-3 и т.д., или просто характеризоваться периодичностью их выполнения, например:

- через каждые 100 часов выполнить.....,
- через каждые 700 часов выполнить.....,
- через каждые 1500 часов выполнить..... и т.д.

Важно отметить, что параметры каждого вида ремонта и ТО определяются по перечню работ по обнаружению и устранению наиболее вероятных неисправностей соответствующих деталей и узлов. Иначе говоря, каждый виды ремонта и ТО, лимитируемые долговечностью конкретных элементов изделия.

Как правило, чем выше уровень ремонта (по возрастанию назначенного ресурса R_y), тем более массивные и дорогие детали лимитируют необходимость этих видов ремонта.

В дизелестроении принято, что капитальный ремонт лимитируется подъемом коленчатого вала и ремонтом блока цилиндров. При среднем ремонте ремонтируются цилиндрические крышки и цилиндрические втулки, при текущем ремонте - поршневые кольца, клапана и т.д.

Учитывая принцип кратности ремонтов, работы по ремонту или ТО меньшего ранга, как правило, входят в состав ремонта более высокого ранга.

Следует различать физический и моральный износ промышленного оборудования. Под *физическим изнашиванием* понимается постепенное изменение свойств и состояния материала изделий под влиянием различных внешних и внутренних воздействий, в результате чего наступает момент, когда это изделие перестает удовлетворять предъявляемых к нему требованиям. *Моральное изнашивание* связано с постепенным или скачкообразным изменением самих требований к потребительским свойствам данного типа изделий.

Неизбежное физическое изнашивание судна и его элементов как раз и приводит к необходимости выполнения их ТО и ремонта, в то

время как моральное изнашивание - к модернизации судов или отдельных видов оборудования, а так же их замене на более совершенные образцы.

Процессы ТО и ремонта представляют собой совокупность операций по поддержанию и восстановлению утрачиваемой со временем исправности или работоспособности судов и их элементов.

Общая цель ТО и ремонта состоит в предотвращении отказов и сохранении на заданном уровне в течении заданного времени технического состояния судов путем выполнения ремонтных - профилактических операций с минимальными затратами времени с средств.

Техническое обслуживание (ТО) - это комплекс операций по поддержанию исправного состояния объектов, выполняемых, как правило, силами судовладельцев без вывода их из эксплуатации.

Ремонт - это комплекс операций по восстановлению работоспособного состояния объектов, выполняемых, как правило, судоремонтными или другими специализированными предприятиями с выводом их из эксплуатации.

Различие между процессами технического обслуживания и ремонта заключается в том, что при плановой системе экономики ТО выполнялось за счет эксплуатационных расходов при определении себестоимости продукции, а ремонт - за счет амортизационных отчислений. При рыночной экономике оба этих процесса финансируются за счет эксплуатационных расходов.

Содержание ТО и ремонтов имеет одинаковую структуру и состоит из подготовительных, контрольных, основных и заключительных операций.

Подготовительные операции включают в себя в общем случае:

- разработку графика выполнения работ по видам ТО и ремонта;
- разработку конструкторской документации, технологических процессов и ремонтных ведомостей;
- заказа и получения необходимых запасных частей и материалов;

- подготовку производства к ремонту конкретных судов;
- подготовку судов и их элементов к ремонту.

К *основным операциям* по ремонту или ТО судовых машин относятся:

- демонтаж с судна и транспортировка в цех (необязательно);
- поузловая разборка;
- разборка сборочных единиц и очистка деталей;
- восстановление деталей и узлов;
- сборка сборочных единиц (узлов);
- сборка машины в целом с соответствующей регулировкой и центровкой;
- стендовые испытания;
- транспортировка на судно и монтаж машины с соответствующей центровкой.

По окончании этих операций выполняются приемо-сдаточные испытания с целью оценки качества ремонта судна и его элементов.

Контрольные операции необходимы для всех этапов ТО и ремонта и на них следует остановиться более подробно.

Прежде всего, к контрольным операциям следует отнести все работы судового экипажа по контролю технического состояния элементов судна в процессе его технического использования путем наблюдения за параметрами объектов и безразборной диагностики. На этом основании и составляются ремонтные ведомости или принимаются решения по внеплановому ТО или ремонту.

Непосредственно перед ремонтом (подготовительные операции) выполняется предремонтная диагностика, позволяющая уточнить объем предстоящего ремонта или ТО.

В процессе разборки машин и механизмов выполняется дефектация их деталей и узлов с целью решения вопроса о способе их восстановления или замене.

В процессе *восстановления и сборки деталей* и узлов осуществляется операционный и выходной контроль качества работы для предотвращения образования брака.

Заключительная оценка качества ремонта судна делается по результатам приемо-сдаточных испытаний.

Следует особо отметить, что ремонт многих судовых элементов и оборудования выполняется под контролем (надзором) Морской Регистр судоходства для подтверждения или восстановления им класса Морской Регистр судоходства.

На основании произведенного освидетельствования Морской Регистр судоходства выдает на судно соответствующие документы:

За рубежом разработана и стандартизирована система RCM (Reliability Centered Maintenance), названной системой технического обслуживания, ориентированная на надежность [4,6]. В эту систему входят подсистемы FMEA, FRACAS, и др., направленные на повышение надежности ПО за счет специальных методов технической эксплуатации, например на основе перехода TOP по состоянию. В основном эти методы предназначены для предприятий, которые сами изготавливают, обслуживают и ремонтируют свою технику (например, планшетные компьютеры), что позволяет накапливать информацию об интенсивности отказов и оперативно принимать меры по устранению причин отказов. Для сложных машин при системах ППР эти правила не всегда пригодны.

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ

2.1. Основные задачи изучения надежности.

Эта учебное пособие базируется на терминах и определениях ГОСТ 27.002 – 89 о надежности техники [17]. Далее будет показан основной перечень определений и показателей, необходимый и достаточный для обоснования методов и средств нормативов ТОР.

Задача повышения надёжности промышленного оборудования при эксплуатации, должна решаться на всех этапах его “жизненного цикла” (ЖЦ), который состоит из этапов - создания промышленного оборудования, его технической эксплуатации и ремонта.

Этап ЖЦ. Создание промышленного оборудования.

1. Разработка требований по надёжности судна и его элементов (номенклатура и величины).
2. Выбор наиболее надёжного комплектующего оборудования.
3. Обеспечение требуемых запасов надёжности при проектировании.
4. Совершенствование правил проектирования и технологий изготовления.

Этап ЖЦ. Техническая эксплуатация промышленного оборудования.

1. Сбор и обработка информации об эксплуатационных качествах и надёжности.
2. Разработка современных решений по устранению недостатков оборудования судов.
3. Совершенствование нормативов сроков и объемов ТО.
4. Разработка мер по повышению надёжности деталей и узлов с оценкой их эффективности (например, цилиндрических втулок, подшипников).
5. Обоснование норм расхода запасных частей.

Этап ЖЦ. Ремонт промышленного оборудования

1. Совершенствование нормативов ремонтов с учётом надёжности деталей и узлов (сроки и объёмы ремонта, нормы расхода).

2. Разработка новых технологий восстановления деталей и узлов.

При изучении надёжности рассматриваются следующие категории: свойства, состояния, события, процессы и другие. Надёжность - свойство объекта выполнять и сохранять во времени заданные ему функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Понятие о надёжности требует дополнительного разъяснения, поскольку с одной стороны это свойство входит в состав более общего свойства, которое называется качеством продукции. Одновременно надёжность представляет собой сложное понятие, включающее в себя показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и комплексные (рис. 6).

Важнейшее значение в категории «состояние» имеют понятия о исправном (не исправном) и работоспособном (не работоспособном) состоянии и об уровнях состояния объектов.



Рисунок 6 Классификация показателей качества и надёжности

Их можно пояснить на примере изменения характеристики деградационного процесса (ХДП) от времени на рис. 7. На этом рисунке приведена символическая схема, содержащая основные этапы формирования отказа и ресурса исследуемого объекта, например, зазора

подшипника машины. Траектория изменение его состояния по мере увеличения модуля диагностического параметра (ДП) от времени работы (наработки) представлена медианной характеристикой ХДП D_1 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).

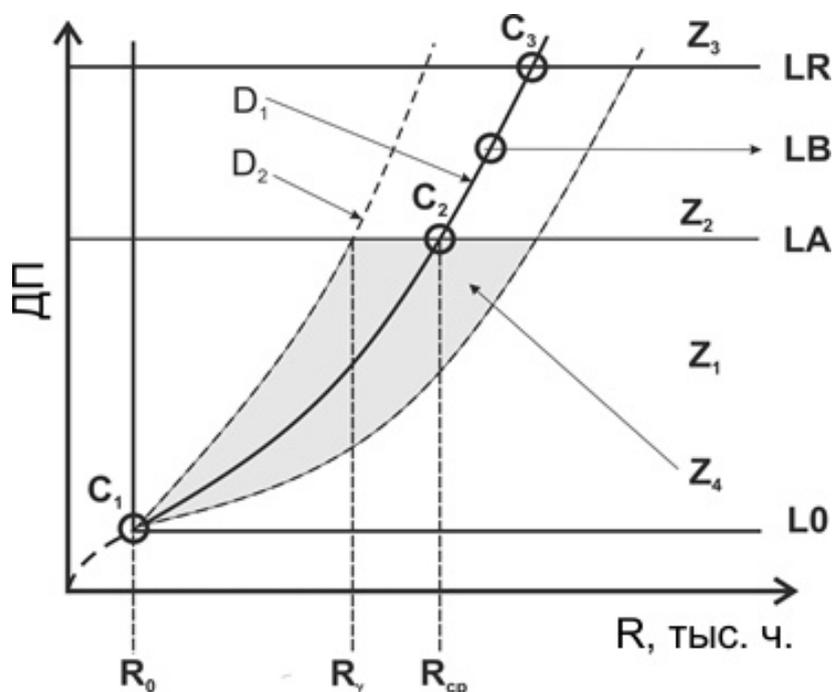


Рисунок 7 Символическая схема деградации состояния объекта

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 объ-

ект 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 характеризует 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. Поэтому при обосновании нормативов ТОР основной задачей является определение так – называемого гамма-процентного ресурса, который соответствует левой границе пересечения LA с линией неопределенности ХДП, что меньше среднего ресурса для точки C_2 .

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. В этой работе для оценки ресурса узла трения на основании измерении диагностического параметра использован новый метод, учитывающий возможность некоторого превышения LA за счет введения промежуточного, условно-допустимого уровня LB . Такая задача возникает при корректировке назначенного ресурса узла в пределах (20... 25)%, как это часто рекомендуется в инструкциях по эксплуатации машин.

Если предположить, что расчетная точка LB будет находиться между LA и LR и определяться по формуле (4b), то возникает вопрос о предварительном назначении критического уровня LR .

На основании анализа статистического материала, были предложены следующие формулы для оценки основных уровней предельного состояния, включая LR с явным запасом точности.

$$\begin{aligned} LR &= 2(LA - L0) + L0 = 2LA - L0, & a) \\ LB &= (LR + LA)/2 = (3LA - L0)/2 & b) \end{aligned} \tag{4}$$

2.2. Измерители и показатели надежности

Для перехода к методам расчета показателей ТОР рассмотрим основные термины и определения по надежности.

В теории надежности важнейшей категорией являются такие события, как повреждения и отказы, а также понятие о гамма-процентом ресурсе.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Повреждение — событие, заключавшееся в нарушении исправности объекта при сохранении его работоспособности.

Отказы, как правило, изучаются с целью оценки безотказности машин, а повреждения — для оценки их долговечности и ремонтно-пригодности. Различают отказ: конструкционный, производственный и эксплуатационный. Имеются другие схемы классификации отказов.

Деградационный процесс или **процесс деградации** – процесс постепенного ухудшения технического состояния объекта.

Наработка — продолжительность и объем работы объекта.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала его применения до наступления предельного состояния.

Срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которых сохраняются исправность.

Технический ресурс (ресурс) — наработка объекта от начала его применения до наступления предельного состояния.

Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Вероятность отказа — вероятность того, что в пределах заданной наработки возникнет отказ объекта.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности невосстанавливаемого объекта, определяемая по отношению к еще не отказавшим объектам для рассматриваемого момента времени $\lambda(t)$.

Наработка на отказ — отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки, определяемые его конструкцией и техническим состоянием.

Вероятность не достижения предельного состояния — вероятность того, что после наработки, равной назначенному ресурсу объекта до ремонта (технического обслуживания), элементом не будет достигнуто предельное состояние для ПД рассматриваемого вида.

Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок службы — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Медианный ресурс — наработка, в течении которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью $\gamma = 50 \%$.

Назначенный ресурс — установленная нормативно-технической документацией суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация машины должна быть прекращена для принятия решения о ее допуске к дальнейшей эксплуатации.

Например, **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.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса объекта.

Средний ресурс до ремонта — средний ресурс до первого текущего, среднего или капитального ремонта.

Средний срок службы — математическое ожидание срока службы.

Средний срок службы до ремонта — средний срок службы до первого текущего, среднего или капитального ремонта.

Средний срок службы до списания — математическое ожидание срока службы до списания.

Вероятность обнаружения дефекта — вероятность того, что после наработки, равной назначенному ресурсу объекта до ремонта (технического обслуживания), при дефектации объекта будет обнаружен дефект из-за повреждения рассматриваемого вида.

Среднее время восстановления — математическое ожидание времени восстановления работоспособности объекта, нарушенной в результате отказа.

Средняя оперативная продолжительность технического обслуживания или ремонта данного вида — математическое ожидание оперативной продолжительности одного технического обслуживания или ремонта данного вида за определенный период эксплуатации или наработки.

Средняя оперативная трудоемкость (объем) технического обслуживания или ремонта данного вида — математическое ожидание оперативной трудоемкости одного технического обслуживания или ремонта данного вида за определенный период эксплуатации или наработки.

Оперативная продолжительность восстановления — время проведения операций по восстановлению работоспособности объекта, определяемые его конструкцией и техническим состоянием, а также приспособленностью к одновременному выполнению работ несколькими исполнителями.

Оперативная **трудоемкость восстановления** — сумма затрат времени всех участвующих в восстановлении работоспособности объекта исполнителей при выполнении ими операций, определяемых конструкцией объекта и его техническим состоянием

Как было показано в разделе 2.1 первостепенное значение имеют понятия об отказе и повреждении, связанные с терминами об исправном (не исправном) и работоспособном (не работоспособном) состоянии и об уровнях состояния объектов. Они иллюстрируются схемой изменения характеристики деградационного процесса ХДП D_1 от времени на рис. 7.

Некоторые определения будут подробнее описаны в разделах об испытаниях и диагностике машин.

2.3. Элементы теории вероятностей

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

Достоверность результатов расчета надежности 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 λ 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. 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 исследований.

Выборка (выборочная совокупность), это совокупность величин X_1, X_2, \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) σ , 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 величина X_{cp} - приближенное значение математического ожидания μ случайной величины X .

$$\mu \approx X_{cp} = \sum_1^N X_i / N \quad (5)$$

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

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

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1)} \quad (6)$$

Коэффициент вариации - отношение СКО к средней величине варьирующего признака.

$$V = \sigma / X_{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1)} / X_{cp} \quad (7)$$

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 (8) путем оценки **доверительных границ**, в которые попадает исследуемая величина с доверительной двухсторонней вероятностью α_2 .

$$X_{\max, \min} = \mu \pm \delta. \quad (8)$$

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

$$\delta = st(\alpha_2, N) \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (9)$$

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 μ , 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.

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 .

$$P_i = 1 - \frac{i}{N} \quad (10)$$

В работе [5] предлагается универсальный метод оценки вероятности P_i по формуле (11a) с помощью безразмерной интенсивности отказов λ_i , которая определяется в зависимости от цензурированной модели, например, по формуле (11b)

$$P_i = \prod_{i=1}^i \frac{1}{1 + \lambda_i} \quad a)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N + N_c - \left(i + \sum_{i=1}^i n_{ci} \right)} \quad b) \quad (11)$$

Где N_c - объем выборки цензурированных.

Универсальная модель учитывает цензурированные интервалы, когда неполные наработки t_{ci} не равны между собой и могут располагаться между наработками до отказов. В этом случае при накоплении цензурированных n_{ci} в период до наступления каждого i - го отказа интенсивность λ_i определяется по формуле (11b).

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

Теория вероятностей предлагает много **законов распределений**, но лишь некоторые из них применяются для расчетов показателей качества и надежности техники. Двухпараметрические распределения зависят от двух параметров — масштаба a и формы b , которые связаны со средним значением выборки и коэффициентом вариации. Наибольшее распространение получили следующие законы двухпараметрических распределений: нормальный, логнормальный, равномерный и Вейбулла

У однопараметрических распределений имеется только один параметр — параметр масштаба a . К распространенным частным случаям этих распределений является закон Вейбулла при $b = const$. Тогда для распределения Релея $b = 2$, а для экспоненциального распределения $b = 1$.

При изучении теории вероятностей основное внимание уделяется нормальному закону распределения (законе Гаусса). Он необходим для оценки погрешности измерений. Однако, он не всегда пригоден для изучения временных показателей долговечности (ресурсов) ма-

шин, поскольку при больших коэффициентах вариации могут получаться отрицательные значения гамма – процентного ресурса..

$$f(t) = e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} / \sigma \sqrt{2\pi}, \quad a) \tag{12}$$

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

Его изучение принято начинать с рассмотрения функции плотности вероятности, которую можно рассчитать непосредственно по формуле (12a). Одновременно ниже приводится и интеграл вероятности для функции распределения, который вручную рассчитывать не удастся. У нормального закона параметр масштаба a равен математическому ожиданию μ , а параметр формы $b = \sigma$ – СКО. Для определения плотности вероятности в МATHCAD имеется специальный оператор $dnorm(x, a, \sigma)$, что не требует применения громоздкой формулы (12a). При расчете на калькуляторе приходится пользоваться специальными таблицами из математических справочников.

Ясно, что и функцию ВБР никто не определяет по интегралу (12б). Для этого имеется несколько других способов. Основной способ заключается в предварительном определении квантиля по формуле (13a) с последующим определением вероятности с помощью оператора $cnorm(Z)$ по формуле (13b) (в редакторе МATHCAD).

$$Z = \frac{\mu - X}{\sigma} \quad a) \tag{13}$$

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

На практике (как было уже сказано) при оценке гамма- процентного ресурса чаще рекомендуют применять закон распределения Вей-

булла, для которого справедливы следующие функции (14) для ВБР $P(t)$, интенсивности отказов $\lambda(t)$ и плотности распределения $f(t)$.

$$\begin{aligned}
 P(t) &= e^{-[t/a]^b}, & a) \\
 \lambda(t) &= (b/a)(t/a)^{b-1}, & b) \\
 f(t) &= (b/a)(t/a)^{b-1} e^{-[t/a]^b}. & c)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Гамма – процентный ресурс рассчитывается по формуле (15)

$$R(\gamma) = a \ln \left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{1}{b}}.
 \tag{15}$$

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

Если μ , σ 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 [2].

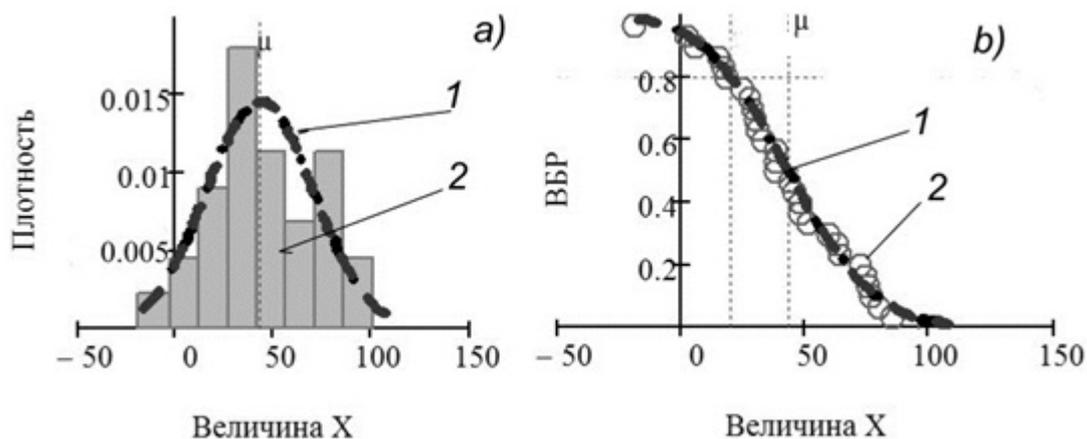


Рисунок 8 Графики плотности распределения (a) и ВБР (b), где 1 – теоретические функции и 2 – эмпирические функции

При использовании математических редакторов применяются соответствующие операторы. В случае редактора Mathcad параметр масштаба этого распределения, который несколько отличается от μ выборки за счет коэффициента $K(b)$ и зависит от гамма-функции, определяется по формуле (16).

$$a = \mu / K(b), \quad K(b) = \Gamma(1 + (1/b)) \quad (16)$$

Расчеты надежности завершаются построением совмещенных графиков эмпирических и теоретических распределений. (рис. 8)

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.

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 [2].

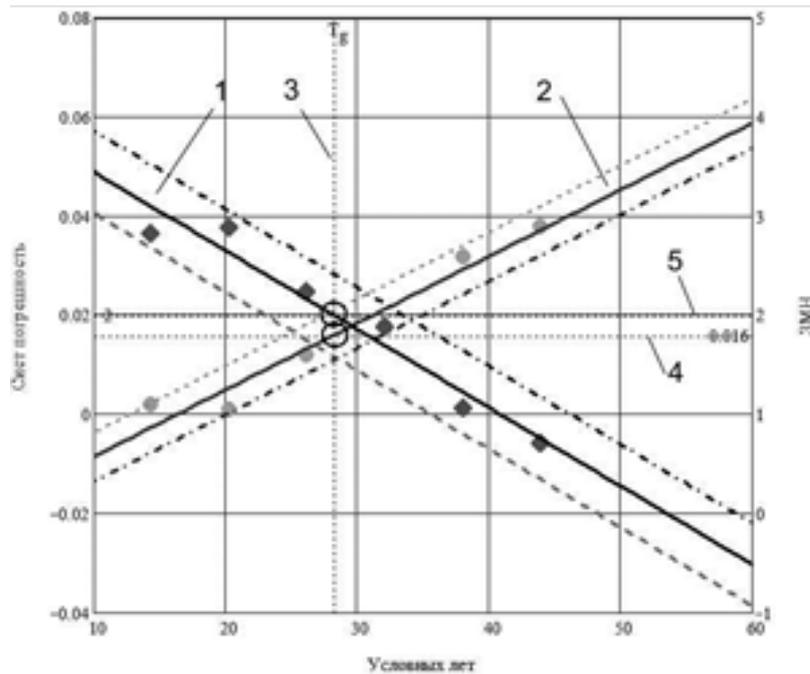


Рисунок 9. Тренды ЗМН (1) и систематической погрешности (2) в зависимости от условного срока службы. Средний срок службы – 3, допустимые уровни систематической погрешности – 4 и ЗМН – 5.

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. Символическая схема, содержащая основные этапы формирования отказа и ресурса исследуемого объекта, например, зазора подшипника машины, приведена на рис. 7.

В этом пособии для оценки ресурса узла трения на основании измерения диагностического параметра 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.

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.

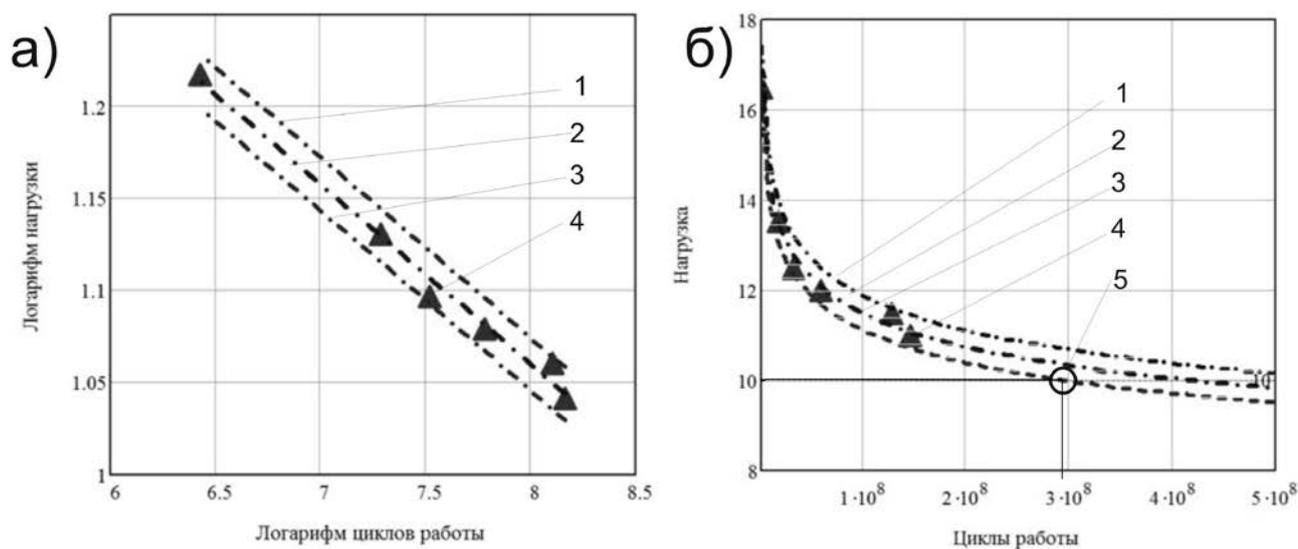


Рисунок 10. Графики усталостного типа в логарифмических (а) и декартовых (б) координатах, где 1, 2 и 3 – расчетные линии (верхняя, средняя и нижняя), 5 – точка предела усталости для $\alpha_l = 97.5\%$ -

Вероятностная модель типа «Веер» имеет широкое применение при ресурсных испытаниях узлов трения [5]. В ее основу положена линейная функция со случайным угловым коэффициентом C_i , который можно назвать износостойкостью, пропорциональной искомой выборке ресурса R_i (формула (17)). В этой формуле T_0 и h_0 – время и износ после окончания приработки, h_{np} – предельно допустимый износ.

$$C_i = \frac{T_i - T_0}{h_i - h_0}, \quad R_i = C_i (h_{np} - h_0). \quad (17)$$

Как показано в работе [5], 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 (п.3.5). Такой способ позволяет обеспечить высокую достоверность оценки СКО и ГПР при минимальных затратах времени и средств.

На рис 9 и 10 приведен пример трендовой параметрической модели линейного типа «Тренд» (18).

В этом случае применяются известные приемы корреляционного анализа с целью получения уравнения регрессии вида (18).

$$h(t, z) = A_h + B_h t \pm z \sigma_h. \quad (18)$$

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

$$\sigma_h = \sqrt{\text{Var}_h (1 - R_{xy}^2)} \quad (19)$$

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

На рис. 10 показана корреляционная зависимость медианного ресурса от уровня нагрузки, характеристики которой были рассчитаны путем применения логарифмической анаморфозы (рис. 10а) 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. 10б).

2.4. Оценка показатели безотказности

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).

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_2 и удельная трудоемкость восстановления w_o (таблица 3). Для оценки безотказности по конкретному виду отказов используется - вероятность безотказной работы $P(t)$.

Таблица 3 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	$K_2 = \sum_{i=1}^N t_i / \left(\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right)$
Удельная трудоемкость восстановления работоспособности, чел.-ч./тыс час.	$w = \sum_{i=1}^N W_i / \sum_{i=1}^N t_i$

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.

Расчет выполняется для числа изделий N . Расчет удобно вести в табличной форме, приведенной в таблице 4, 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. 3, нетрудно определить

$$t_o = 7620/10 = 762 \text{ ч.}$$

$$K_z = 7620/(7620 + 32) = 0.9958$$

$$P(t) = \exp[-(600/762)] = 0.455$$

$$w_o = 100 \cdot 33/7620 = 4.33 \text{ чел.} - \text{ч/тыс.ч}$$

Также вычисляются показатели по остальным видам отказов.

Для определения показателей надежности для изделия в целом или для какой-либо его составной части (например, топливной аппаратуры) необходимо предварительно сложить τ , n и w в соответствующих столбцах таблицы 4.

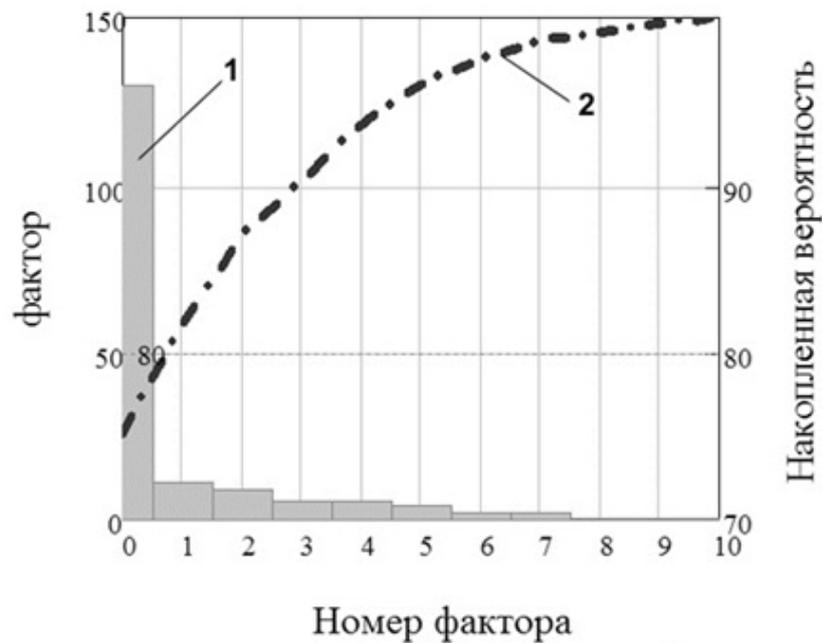
Затем вычислить те же показатели для группы отказов. Результаты вычисления даны в нижней строке таблицы 4.

Оценка уровня безотказности при эксплуатации изделий и систем заключается в оценке коэффициента готовности.

Таблица 4 Расчет показателей безотказности топливной аппаратуры

Элемент	Причина	Способ	n	τ , ч.	W, чел-ч	t_0 , ч.	P(t)	K _г	W ₀ , чел-ч/тыс. ч.
Трубопровод НВД	Трещина сварки	заварка	10	27	43	762	0.4550	0.996	5.64
Клапан НВД	обрыв	замена	3	8	7	2540	0.7896	0.999	0.92
Плунжер НВД	заклинивание	ремонт	10	32	32	762	0.4550	0.996	4.20
Трубки НВД	течь	замена	5	12	18	1524	0.6746	0.998	2.36
Форсунка	зависание	замена	3	6	7	2540	0.7896	0.999	0.92
Холодильник масла	течь	заглушенные	3	28	44	2540	0.7896	0.996	5.77
Холодильник воды	течь	заглушенные	3	38	69	2540	0.7896	0.995	9.06
Регулятор	отказ	замена	1	2	4	7620	0.9243	1.000	0.52
Шестерня регулятора	раковины	Ремонт в цеху	1	6	15	7620	0.9243	0.999	1.97
Шестерня распределительного вала	питтинг	Ремонт в цеху	1	30	87	7620	0.9243	0.996	11.42
Упорное кольцо топливного насоса	Разрушение	Ремонт в цеху	1	500	987	7620	0.9243	0.938	129.53
Итого (общая оценка)			41	689	1313	186	0.0396	0.917	172.31

Примечание. НВД – топливный насос высокого давления



3

Элемент	Фактор	Вероятность, %
Упорное кольцо кулака насосов	129.53	75.179
Шестерня распределительного вала	11.41	81.802
Холодильник воды	9.055	87.057
Масляный холодильник	5.77	90.406
Трубопровод	5.64	93.679
плунжерные	4.2	96.117
топливные трубки	2.36	97.487
Шестерня регулятора	1.97	98.63
клапаны	0.92	99.164
Распылители	0.92	99.698
Регулятор	0.52	100

Рисунок 11 Фрагмент анализа по диаграмме Парето в редакторе МАТНСАД. 1 – гистограмма фактора, 2 – накопленная вероятность, 3 – итоговая таблица

Располагая допустимым значением коэффициента готовности, можно оценить безотказность изделия. В рассматриваемом случае, например, надежность главных двигателей оказалась весьма низкой, поскольку $K_2 = 0,917 < K_{доп} = 0,997$.

Рассмотрение табличных значений K_2 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. Такая диаграмма была построена в редакторе MATHCAD на рис. 12 по данным таблицы 4.

Из таблицы 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 требуют корректировки назначенных ресурсов

2.5. Нормирование ресурсов машины

В данном разделе показан пример корректировки документации ОКН с учетом требований по надёжности к элементам машины. В качестве ОКН выбрано судно, где типовой машиной служит главный двигатель 8NVD48AU. Ремонтный цикл двигателя, согласно руководству по его эксплуатации, отражен в таблице 5, где даны сведения о назначенных ресурсах двигателя до технического обслуживания (ТО2) и ремонтов и соответствующие им установочные (h_0) и предельные износы и зазоры (hd) основных узлов машины [4].

Задача исследования заключается в корректировке ремонтного цикла этого двигателя в связи с изменением правил Регистра по освидетельствованию морских судов [4], так как ремонтный цикл с кодом «1 1 2 4» соответствует четырёхлетнему сроку очередного освидетельствования, а по новым правилам этот срок увеличен до 5 лет.

Таблица 5 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
1 Поршень - втулка цилиндров:									
	износ зеркала цилиндров, диаметр/эллипс,					0	2,1/0.7	0	2,1/0.7
	износ поверхности юбки поршня,					0	0,25	0	0,25
	зазор между втулкой и поршнем,					0,25	1,2	0,25	1,2
	зазор в головном подшипнике,					0,15	0,3	0,15	0,3
	зазор в замке первого кольца,	1,5	5,1	1,5	5,1	1,5	5,1	1,5	5,1
	зазор в кепе первого кольца,	0,06	0,6	0,06	0,6	0,06	0,6	0,06	0,6
	износ по высоте первого кольца.	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4
2 Коленчатый вал - подшипники									
	износ шеек коленчатого вала,							0	0,15
	зазор в шатунных подшипниках,			0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
	зазор в рамовых подшипниках.			0,1	0,25	0,1	0,25	0,1	0,25
3 Крышка цилиндров - клапана									
	зазор между штоком и втулкой			0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
	износ тарелки клапана.			4	2	4	2	4	2
4 Распределительный вал и привод газораспределения:									
	зазор в подшипниках вала					0,1	0,27	0,1	0,27
	зазор у коромысла клапанов,	0,07	0,25	0,07	0,25	0,07	0,25	0,07	0,25
	зазор в зубьях шестерен привода					0,2	0,8	0,2	0,8
	износ кулачков распредвала.					0	0,14	0	0,14

Задача рассматривается на примере подшипника скольжения рамового подшипника двигателя с ресурсом 12 тыс. ч. до текущего ремонта (рис. 13).

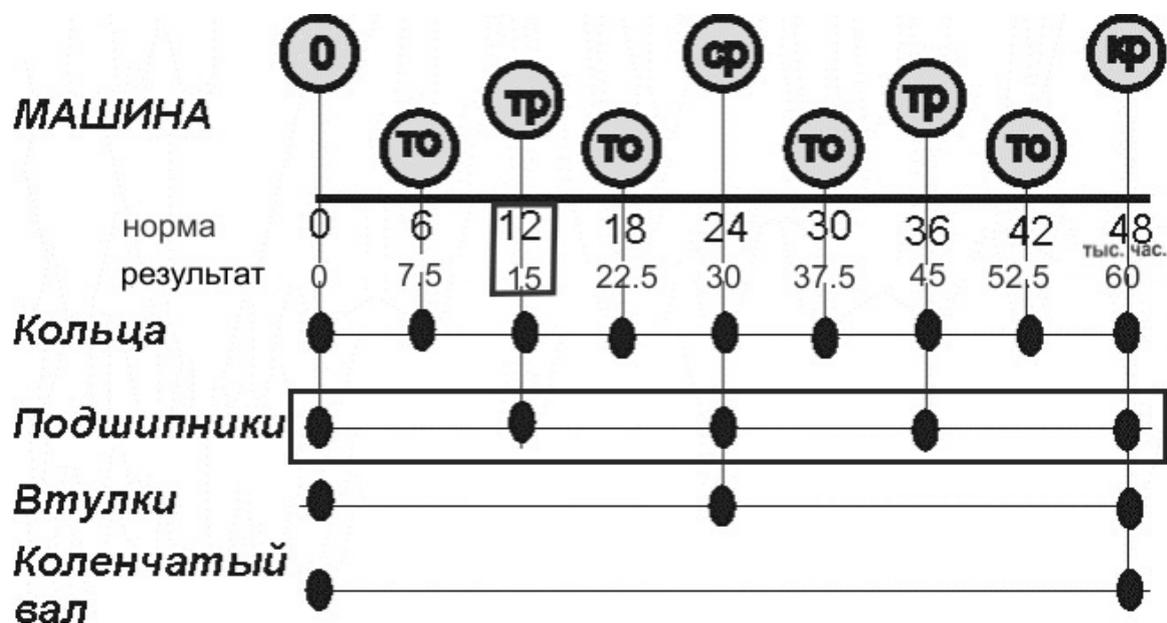


Рисунок 12 Ремонтный цикл с корректировкой

Исходя и отмеченной выше необходимости корректировки ремонтного цикла двигателя с учетом новых правил морского регистра, 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 2.1.). Очевидно, что в нашем случае имеем следующие параметры зазоров подшипника (по таблице 4):

$$L_0 = 0.1 \text{ мм}, L_A = 0.25 \text{ мм}, L_R = 2 L_A - L_0 = 0.4 \text{ мм}$$

$$\text{и } L_B = (L_R + L_A) / 2 = 0.325 \text{ мм}$$

В основу алгоритма расчета положим вариант вероятностной параметрической модели типа «Веер» по формуле (17).

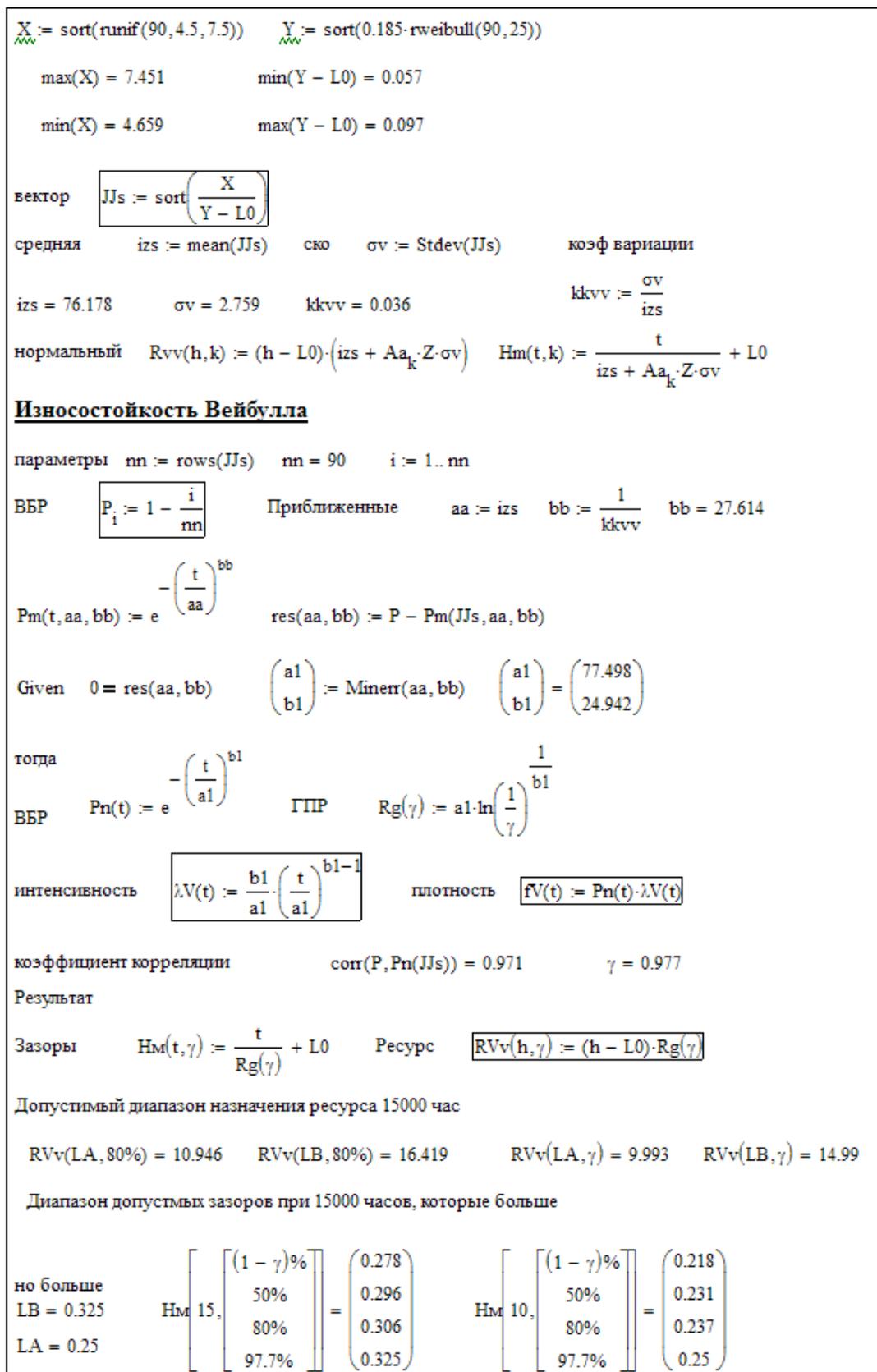


Рисунок 13 Фрагмент алгоритма корректировки ресурса

В качестве постоянных исходных данных используются параметры указанные выше уровни L0, LA, LR и LB, а также допустимые значения квантилей распределения, например, $Z=2$ ($\Phi^{-1} = 97.7\%$).
 лее следует получение переменных исходных данных в виде двух векторов наработок до измерений X и соответствующие им результаты измерений Y (рис. 14). В учебных целях эти вектора образованы с помощью генераторов случайных чисел для равномерного распределения (вектор Y) и распределения Вейбулла (вектор X).

В редакторе MATHCAD эти операторы имеют соответственный вид `runif(m,a,b)` и `rweibull(m,b)`. Оператор `sort(x)` применен для ранжировки векторов в возрастающем порядке. Сами вектора на фрагменте не показаны, хотя имеются в памяти. С их помощью вычислен вектор износостойкости по формуле

$$J_z = \text{sort}\left(\frac{X}{Y - L_0}\right) \quad (20)$$

Как показано на фрагменте рис. 14 для этого вектора можно определить среднюю износостойкость $its = 76.18$ тыс. час/мм, среднее квадратическое отклонение $\sigma_v = 2.76$ тыс. час/мм и коэффициент вариации $kk_{vv} = 0.036$. Это позволяет получить функции ресурса и износа для нормального распределения

$$\begin{aligned} R_{vv}(h,k) &= (h - L_0)(its + Aa_k Z \sigma) \quad a) \\ hm(t,k) &= \frac{t}{its + Aa_k Z \sigma} + L_0 \quad b) \\ Aa_k &= \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad c) \end{aligned} \quad (21)$$

Основной расчет выполнен для прогнозирования износостойкости и ресурса подшипника с применением закона Вейбулла по формулам (14) и (15) и оператора `Minerr` с учетом предварительного построения эмпирического распределения ВБР. В итоге были оценены

параметры масштаба $a1 = 77.5$ и формы $b1 = 24.94$ для распределения гамма-процентной износостойкости $Rg(\gamma)$ с высоким коэффициентом корреляции 0.975.

В результате была получена параметрическая вероятностная модель прогнозирования гамма-процентного ресурса от износа (21a) и износа от времени (21b).

$$RVv(h, \gamma) = (h - L0) Rg(\gamma) \quad a)$$

$$Hm(t, \gamma) = \frac{t}{Rg(\gamma)} + L0 \quad b) \quad (22)$$

Это позволило определить с высокой достоверной односторонней вероятностью 0.977 возможность повышения гамма-процентного ресурса до 15 тыс. час при повышенном уровне допустимого износа $LB = 0.325$ мм, в то время как при нормативном уровне $LA = 0.25$ мм ресурс составлял 10 тыс. час. Таким образом, было доказано право судовладельца проводить текущий ремонт подшипников не строго после 12 тыс. час, а в удобное для него время в диапазоне от 10 до 15 тыс. час. в зависимости от условий эксплуатации. Наглядный график рассмотренного анализа показан на рис. 15.

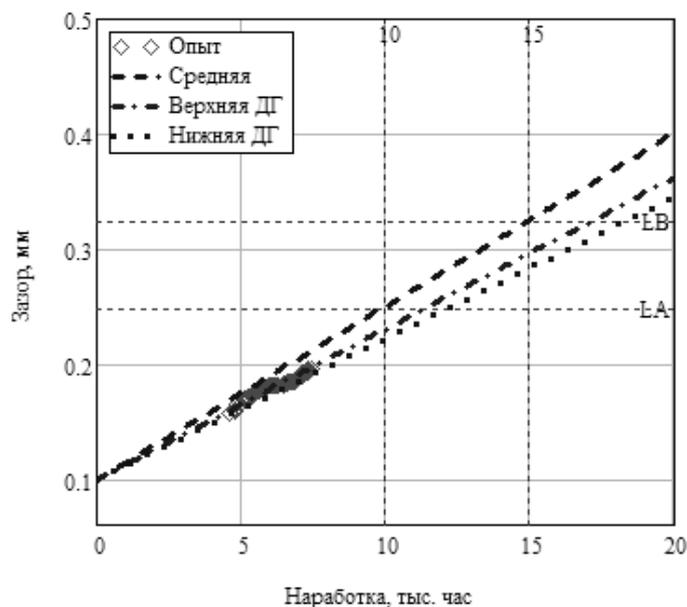


Рисунок 14 График зависимости зазора от времени

3. РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

3.1. Актуальность проведения ресурсных испытаний

Во многих отраслях промышленности и транспорта проводится большая работа по организации ресурсных (стендовых) испытаний продукции с целью обеспечения безопасности ее эксплуатации. Сложность изучения этой проблемы связана с вероятностной природой деградиционных процессов, которая учитывалась в предыдущей главе. В нашей дисциплине эта проблема в основном связана с обоснованием назначенных ресурсов и сроков службы до плановых сроков технического обслуживания и ремонтов машин, а также с определением причин опасных отказов при эксплуатации изделий.

Рассмотрим некоторые примеры выполнения ускоренных ресурсных испытаний (УРИ) различного промышленного оборудования.

Подшипники. Классическим примером результативности УРИ является создание методики расчета динамической грузоподъемности и ресурса подшипников качения. В основе лежит расчет 90 – процентного ресурса подшипника как числа циклов (оборотов) до появления первых признаков усталости металла колец или тел вращения с вероятностью 10%

Поскольку для расчета ресурса использована степенная функция с нулевой асимптотой типа (23), то, цель испытаний заключалась в определении ее параметров C_r и m .

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{G_E} \right)^m \quad (23)$$

где C_r – постоянная величина - базовая грузоподъемность при базе испытаний в один миллион циклов (оборотов), n – частота вращения вала, об/мин, G_E - эквивалентная динамическая нагрузка, $m = 3$ или 3.33 – показатель степени (зависит от типа подшипника).

Пробковый кран. Методика проведения УРИ трубопроводной арматуры на примере латунного пробкового крана изложена в ОСТ 26-07-2040-81. Для оценки ресурса испытывается только один образец изделия, но при многократных измерений в 42 точках конуса пробки. При этом задача испытаний заключалась в проверке назначенного ресурса 100000 циклов и срока службы 10 лет (п. 3.5).

Автомобили. В известном учебнике о прочности и долговечности автомобилей [4] приведен ряд инженерных методов расчета гамма – процентных ресурсов основных элементов машин по критерию усталостных разрушений с применением, например, логнормального распределения для степенной функции типа (23).

Авиация. Большой объём прочностных испытаний выполняется в лабораторных условиях с использованием специально строящихся планеров летательных аппаратов, а также отдельных отсеков, агрегатов, элементов конструкции, динамически-подобных и других моделей. Прочность конструкции летательного аппарата оценивается при статических испытаниях, во время которых нагрузки на неё последовательно увеличиваются вплоть до разрушающих нагрузок. Способность конструкции противостоять повторяющимся нагрузкам оценивается по результатам ресурсных испытаний.

В России имеются лаборатории, которые оснащены самым современным приборным и программным обеспечением для испытаний самолетов [4]. К ним относится ЦАГИ - Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского.

Газотурбинный двигатель. Согласно традиционной методологии обоснования ресурсов в единицах фиксированного времени и числа полетных циклов (ПЦ) между ремонтами газотурбинные двигатели (ГТД) передавались в эксплуатацию с невысоким значением подтвержденного начального ресурса, Затем в течение всего периода эксплуатации по мере проведения ресурсных испытаний ресурс периодически увеличивается. Такой подход известен как стратегия 1 управления ресурсом

Бытовая техника. Поучительным примером УРИ можно считать испытания стиральных машин на предприятии «Ростест-Москва» [4]. При испытаниях на ресурс стиральные машины работают с периодическим выполнением стиральных циклов, содержащие такие стандартные операции как загрузка белья, стирка, полоскание, отжим и выгрузка постиранного белья. Исходя из принятых норм трех-четырех стирок в неделю, для назначенного изготовителем срока службы 10 лет ресурс машины был принят равным **1840** стиральных циклов. Лабораторные испытания сводились к проверке фактического срока службы до отказа какого либо узла. При испытаниях этой машины и машины Candy GO 1460 после **520 - 752** стиральных циклов при выполнении отжима (при максимальных оборотах) взорвался барабан машины.

Электросчетчик. К успешному примеру использования группового принципа УРИ относится стандарт МИ 2307-94 [3] по обоснования межповерочных интервалов (МПИ) индукционных счётчиков электрической энергии с вероятностью 70 – 90%. В опытную группу включались образцы счетчика и образцы спутники – счетчика в количестве до 10 штук.

Применялось две схемы ускоренных испытаний параметрическая и цензурированная, Первая схема предусматривала исследование изменения погрешности прибора по мере изнашивания подшипников оси вращения диска. Вторая схема заключалась в подсчете числа отказов образцов-спутников при ускоренном вращении их дисков без тормозных магнитов. Под отказом понималось событие превышения погрешности прибора своей предельной величины из-за износа опор и оси счётного механизма

Штангенциркуль. В 2013 году творческим коллективом Мурманского ГТУ были проведены УРИ на износ штангенциркуля на специально созданном стенде СУИС, с целью обеспечения безопасности его эксплуатации, Результаты и подробное описание методики проведения этих испытаний приведены в примере 3.5.

3.2. Основные понятия о ресурсных испытаниях

Общая схема классификации ресурсных испытаний техники (РИ), принятая в этой книге, показана на рис. 16.

Для начала рассмотрим приведенные на этой схеме и регламентированные стандартами основные понятия об испытаниях/.

Испытание – экспериментально определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании или при моделировании объекта и (или) воздействий.

Испытания на надежность - испытания, проводимые для определения показателей надежности в заданных условиях. В ГОСТ [13] имеется добавление о том, что в зависимости от исследуемого свойства различают испытания на безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность (ресурсные испытания).

Таким образом, ресурсные испытания – это испытания, направленные на определение показатели долговечности. В частности, к ним относятся сроки службы и ресурсы, а для их обоснования необходимо определять гамма – процентные ресурсы элементов машин [32].

В зависимости от места и условий проведения испытаний они могут быть эксплуатационными или стендовыми (лабораторными).

Для обоснования нормативных показателей долговечности изделия рассматриваемого типа применяются определительные испытания.

Определительные испытания [17] – это испытания, проводимые с целью определения показателей надежности объектов с заданной точностью и достоверностью.

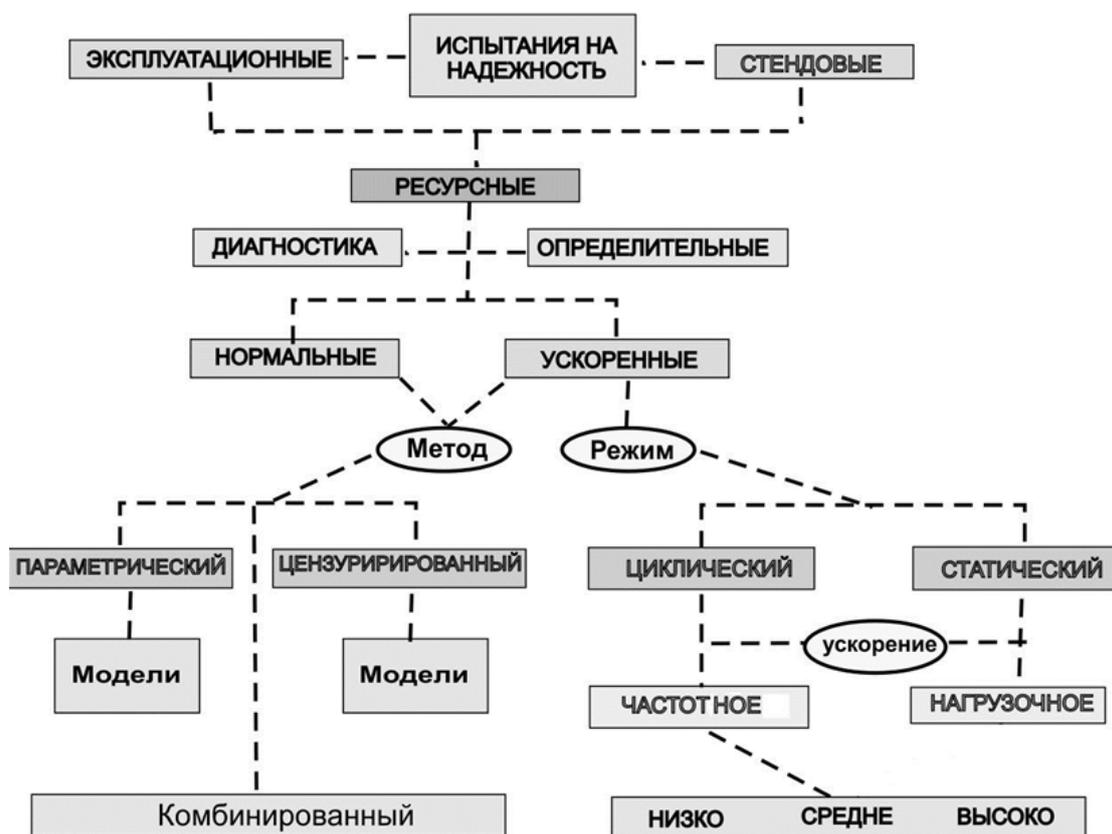


Рисунок 15 Краткая классификация испытаний на надежность

При эксплуатации конкретных машин и другой техники могут выполняться испытания с целью оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Такие испытания относятся к понятию о диагностике [17].

В зависимости от скорости получения результатов испытаний на надежность их можно подразделить на нормальные и ускоренные.

Нормальные – это лабораторные (стендовые) испытания, методы и условия, проведения которых максимально приближены к эксплуатационным режимам.

Ускоренные испытания - лабораторные (стендовые) испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надежности в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях

Ускоренные ресурсные испытания (УРИ) - ускоренные испытания объекта с целью оценки показателей его долговечности (ресурса, срока службы, срока годности и т.п.).

Коэффициент ускорения (КУ) – величина, показывающая, во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности при испытаниях относительно заданных значений показателей долговечности в эксплуатации. КУ можно определить как отношение времени испытаний в обычных условиях ко времени испытания в форсированных режимах при условии равенства значений вероятностей безотказной работы в обоих случаях.

Ускорение испытания достигают ужесточением (форсированием) воздействия испытательных факторов. К механическим факторам относятся такие, которые можно назвать нагрузкой.

Нагрузка – характеристика вида воздействия (давления, температура, уровня вибрации и др.) на изделие, влияющая на скорость деградации его состояния. Она зависит от режима работы объекта конечного применения.

Объект испытаний - продукция, подвергаемая испытаниям.

Образец для испытаний – продукция или ее часть, или проба, непосредственно подвергается измерениям при испытаниях.

Средство испытаний - техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения испытаний. При ускоренных испытаниях часто используются стенды, позволяющие моделировать различные режимы (включая форсированные) работы объекта.

Датчик, сенсор (от англ. Sensor - датчик) – термин, обозначающий элемент средства измерения, производящий наблюдение за физическим (физико-химическим) состоянием исследуемого объекта с целью получения информации в виде удобного для хранения, обработки, управления сигнала (формы). Термины сенсор и датчик равнозначны. В состав сенсора входят воспринимающий (чувствительный) орган и один или несколько промежуточных преобразователей. Часто сенсор состоит только из одного воспринимающего органа

(например, термопара, термометр сопротивления, тензодатчик и прочее).

Протокол испытаний - документ, содержащий необходимые сведения об объекте испытаний, применяемых методах, средствах и условиях испытаний, результаты испытаний, а также заключение по результатам испытаний, оформленный в установленном порядке

Программа испытаний - организационно-методический документ, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний.

Планы испытаний. Согласно ГОСТ 27.410-87 «Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность» имеются 16 планов испытаний, из которых более или менее доступными для реализации можно считать следующие планы.

План [NUT], согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, а испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T .

План [NUr], согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r . Важнейшим частным случаем этого плана является план [NUN] при $r = N$, когда все поставленные на испытания объекты откажут. Этот план самый простой для обработки, поскольку полученная полная выборка позволяет непосредственно рассчитать два ее первых момента (среднюю и дисперсию). Поэтому именно такая выборка (которая применима не только для временных величин) является объектом теоретических исследований математиков.

В ГОСТ 27.410-87 имеются еще три практических плана [NRT], [NRr] и [NR(T,r)] с буквой R, которая означает, что отказавшие во время испытаний объекты заменяют новыми.

Для УРИ наиболее популярными можно считать планы типа [NUT] и [NUr], когда образуются так называемые цензурированные выборки с усечением справа (усечённые выборки). Это значит, что при испытаниях отказывают не все, а только часть образцов. Тем не менее, мы имеем возможность решить задачу оценки ресурса с использованием специальной методики.

3.3. Циклические и временные испытания

УРИ целесообразно разбить на две группы – **циклические** и **временные** (или статические). Наиболее удобными для применения УРИ являются изделия, которые имеют циклический режим работы.

Циклические испытания.

Циклические УРИ можно условно разбить на три группы: низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные.

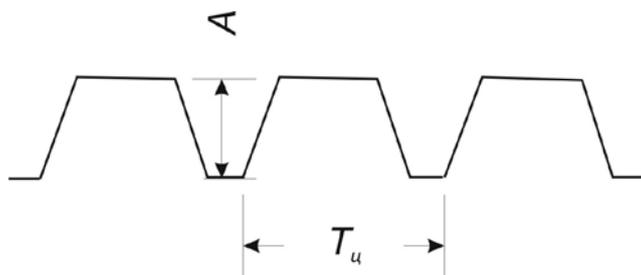


Рисунок 16 Фактический (a) и эквивалентный (b) цикл с периодом T и амплитудой A

У низкочастотных циклических УРИ под циклом понимается повторяющийся спектр изменения нагрузки или операций при работе изделий. (цикл летательных аппаратов, стиральные циклы стиральных машин или рабочий цикл дизеля «пуск-работа-остановка»). Сложность и неопределённость моделирования спектра нагрузки приводит к необходимости применять условный цикл с эквивалентной ампли-

тудой A (нормальной или форсированной) и частотой $f = 1/T$, где T - период изменения нагрузки.

У среднечастотных циклических испытаний цикл работы нагрузки соответствует одному замкнутому периоду возвратно-ступательного движения детали или обороту вала машины. Высоко-частотные циклы применяются при изучении резонансных и вынужденных колебаний (вибрации) элементов машин.

Важным преимуществом циклических УРИ является возможность значительного ускорения испытаний за счет повышения частоты нагрузки, как это было реализовано при испытаниях пробкового крана, штангенциркуля и электросчетчика (п. 3.5).

У других циклических УРИ увеличивать коэффициент ускорения доступнее за счет эквивалентной амплитуды нагрузки. Но для этого приходится проводить соответствующие научные исследования зависимости нагрузки от наработки в циклах. Такие методы созданы и применяются в автомобилестроении, авиационной и других отраслях промышленности. Обычно для этого используются степенные функции, подобные формуле (23) для подшипников качения. В этом случае имеется возможность увеличивать коэффициент ускорения по кубическому закону, когда, например, двойное увеличение нагрузки соответствует $K_u = 2^3 = 8$.

По данным [4] показатель m может изменяться от 2 до 10 для разных деталей (например, автомобиля).

Временные (статические) испытания

Они, в принципе так же являются циклическими с супер низкими частотами (сезонными, годовыми, космическими и т.п.), которые трудно ускорить при испытаниях. Поэтому, эту задачу можно решать только за счет увеличения нагрузки. В стандартах о методах ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость используется равноценный термин «**внешний воздействующий фактор**» (ВВФ). Зависимость среднего или гамма – процентного ресурса L от таких ВВФ как T – температура (К); η - относительная влажность (%) и C - кон-

центрация агрессивной среды, (г/м³) выражается степенными или логарифмическими функциями вида (5) с эмпирическими постоянными A, A', B, B', m, n , определяемыми экспериментально по методике рассматриваемого стандарта.

$$L = A e^{\frac{B}{T}} C^{-m} \eta^{-n} \quad \text{или}$$

$$\ln L = A' + \frac{B}{T} - m \ln C - n \ln \eta \quad (24)$$

Эти функции позволяют сокращать время испытаний за счет форсирования величин T, η и C путем испытаний образцов в специальных климатических испытательных камерах с последующим пересчетом результатов для нормальных параметров ВВФ при эксплуатации. Обширная неопределенность условий испытаний позволяет оправдать возможные погрешности указанных методов УРИ.

3.4. Вероятностные модели УРИ.

В руководящем документе РД 50-424-83 проблеме УРИ предлагается решать на основе цензурированных или параметрических моделей постепенных отказов для расчета гамма – процентного ресурса $R(\gamma)$ и коэффициента ускорения испытаний КУ.

Цензурированная модель не предусматривает прямого изучения тренда характеристики диагностического параметра (ДП). Исходные данные для оценки $R(\gamma)$ должны быть получены в виде выборки наработок до отказов и цензурирований по результатам испытаний группы однотипных образцов. Объем выборки - от 10 до 30 экз. По этим данным сначала надо построить эмпирическое распределение вероятности по формулам (10) и (11), а затем с его помощью выбирается закон распределения, и определяются его параметры: масштаба a и формы b . В данном пособии выше были показаны алгоритмы (14) и (15) для нормального распределения и закона Вейбулла соответственно. Можно применить несколько способов решения этой задачи,

например метод наименьших квадратов или по оператору Minner, на примере раздела 2.5.

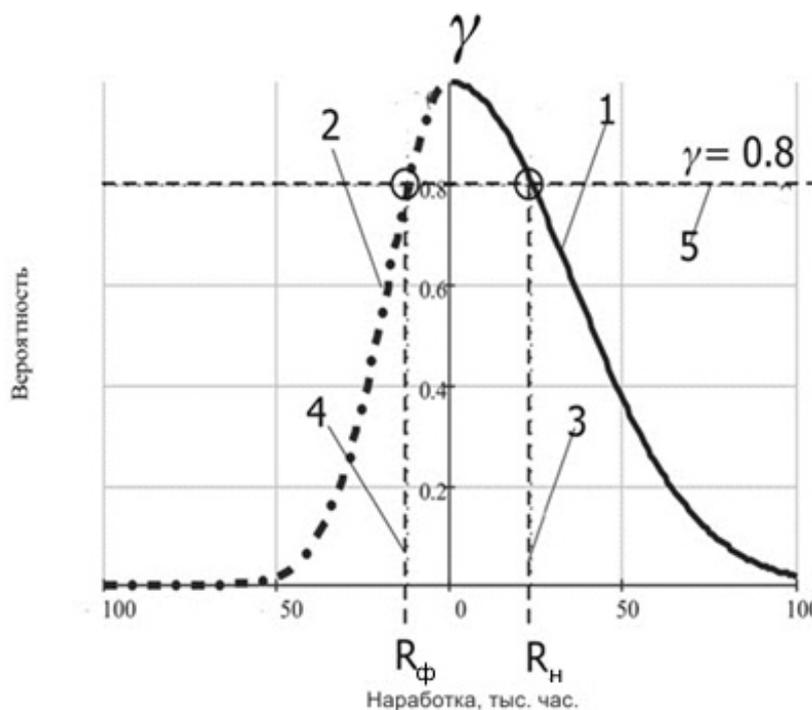


Рисунок 17 Метод равных вероятностей. 1 и 2 – распределения при нормальной и форсированной нагрузке соответственно, 3 и 4 – ресурсы R_n и R_ϕ при нормальной и форсированной нагрузке соответственно, 5 – линия исследуемой вероятности 80%.

Цензурированные модели можно использовать для оценки коэффициента ускорения испытаний методом равных вероятностей. В этом случае одновременно должны проходить испытания две группы однотипных образцов, состоящих из m_1 и m_2 образцов в каждой группе. Первая группа должна проходить РИ с максимальной нагрузкой, а вторая – при нормальных условиях с рабочей нагрузкой (рис. 18). Обе группы проходят испытания по рассмотренной выше методике с построением двух усеченных распределений по формуле (11). Тогда для оценки коэффициента ускорения по нагрузке K_2 можно применить метод равных вероятностей, рекомендуемый в РД 50-425-83. Как выше показано, для этого надо определить гамма-процентные

ресурсы для каждой группы образцов при одинаковых допустимых γ (например, $\gamma = 0.8$) с последующим расчетом вторичного коэффициента ускорения K_2 по формуле (25).

$$K_2 = \frac{R(\gamma)_2}{R(\gamma)_1} = \frac{a_1}{a_2} \ln \left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\left(\frac{1}{b_2} - \frac{1}{b_1} \right)}. \quad (25)$$

где индекс 2 относится к нормальному, а индекс 1 – к форсированному режиму РИ.

Этот способ можно применить к случаю, когда вторая группа испытывается при форсировании испытаний по частоте, а вторая – с добавленной нагрузкой, что позволяет повысить КУ. Вместе с тем этот метод следует применять осторожно. Он применим, если имеется фактор ускорения, явно зависящий от нагрузки на объект.

К **параметрическим моделям** относятся корреляционные зависимости ДП h от времени T веерного, трендового, усталостного или другого типа [1]. При этом допускается одновременно испытывать **от одного** до 5-6 образцов. Это позволяет прогнозировать гамма – процентный ресурс изделия еще до наступления предельного зазора на основе выбранного типа вероятностной модели. Весь период испытаний разбивается 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.

Простейшая вероятностная модель веерного типа применялась при УРИ пробкового крана или штангенциркуля с применением формулы (17), которая соответствует схеме на рис. 19.

Рис. 9 и формулы (18) и (19) соответствуют трендовой параметрической модели линейного вида, которая применялась при испытаниях штангенциркуля, где в качестве диагностического параметра использовались погрешность измерений и запас метрологической надежности (ЗМН).

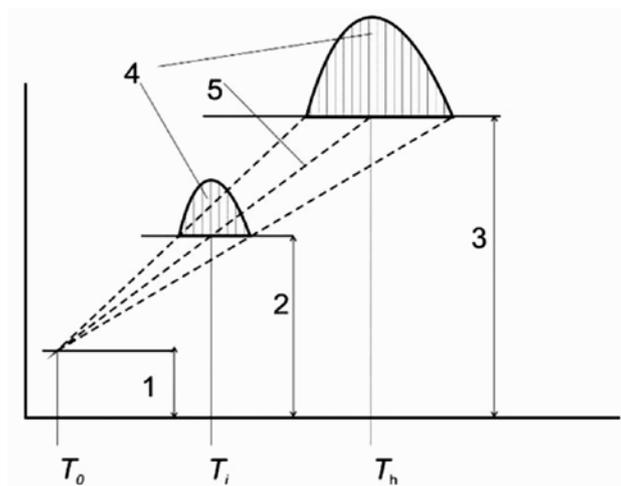


Рисунок 18 Процесс параметрических ресурсных испытаний по модели веерного типа. 1, 2 и 3 – начальный, текущий и завершающий уровень износа объекта, 4 – условное изображение графика плотности вероятности, 5 – тренд математического ожидания износа, T_o , T_i и T_h – приработочный, текущий и завершающий период испытаний соответственно

Аналогичная методика при испытаниях образцов на усталостную прочность для степенной функции с нулевой асимптотой. На рис. 10 показана корреляционная зависимость медианного ресурса от уровня нагрузки, характеристики которой были рассчитаны путем применения логарифмической анаморфозы и метода наименьших квадратов. Полученные уравнения позволили построить кривые зависимости амплитуды нагрузки от наработки в циклах (среднюю и граничные кривые) и рассчитать прогнозируемый ресурс при заданной нагрузке или предел усталости при заданном ресурсе.

3.5. Примеры ресурсных испытаний

В этом основном разделе пособия показаны 2 примера УРИ с применением параметрических моделей. Исходные данные для расчетов, как правило, формируется с помощью генераторов случайных чисел. Исключение составляют фактические результаты УРИ штан-

генциркуля, которые выполнялись творческим коллективом Мурманского ГТУ.

Все расчеты выполняются в математических редакторах EXCEL и MathCAD и демонстрируются на их фрагментах,

УРИ ПРОБКОВОГО КРАНА

Цель испытаний - ускоренная оценка ресурса серийного или модифицированного изделия в соответствие со стандартом .

Изделие: кран пробковый латунный черт. ЛЗ9061.020 (ГОСТ 16155-70).

Характеристика режима эксплуатации:

рабочая среда - топливный газ давлением до $0,1 \text{ кгс/см}^2$

герметичность затвора - по 1 классу герметичности (ГОСТ 9544-75).

средняя частота циклов работы $\omega_s \approx 0,1$ цикл/час;

скорость срабатывания - 1 цикл за сек.

Показатели долговечности:

Изделия относятся к классу невосстанавливаемых изделий;

Назначенный срок службы до списания не менее $T_s = 10$ лет.

Назначенный ресурс до списания не менее $T_{ц} = 10000$ циклов;

Вероятность безотказной работы - 0,8,

Предельно допустимый износ составляет 130 мк.

Исследуемый процесс деградации: изнашивание узла затвора.

диагностический параметр: диагональ отпечатка по методу искусственных баз (метод нарезания лунок) по ГОСТ 2999-59

Условия проведения испытаний

Испытание крана проводится на стенде «Фреон-12». Испытательная среда – воздух давлением $P = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Испытанию подвергается один, специально отобранный, образец изделия, но с периодическим многократным измерением механи-

ческого износа конической пробки затвора методом искусственных баз (методом нарезания лунок) по ГОСТ 2999-59.

Для этого после каждого сеанса с заданным числом циклов работы крана должно выполняться измерение лунок, которые были вырезаны в 42 точках на конусе пробки (см рис. 20).

Цикл представляет собой одну операцию «открыто - закрыто». Первый сеанс предназначенный для приработки выполняется через 100 циклов, а последующие четыре сеанса в диапазоне от 1100 до 4100 циклов – через каждые 1000 циклов. Предварительно установленная частота экспериментальных циклов составляет $\omega_{и} = 30$ цикл./час.

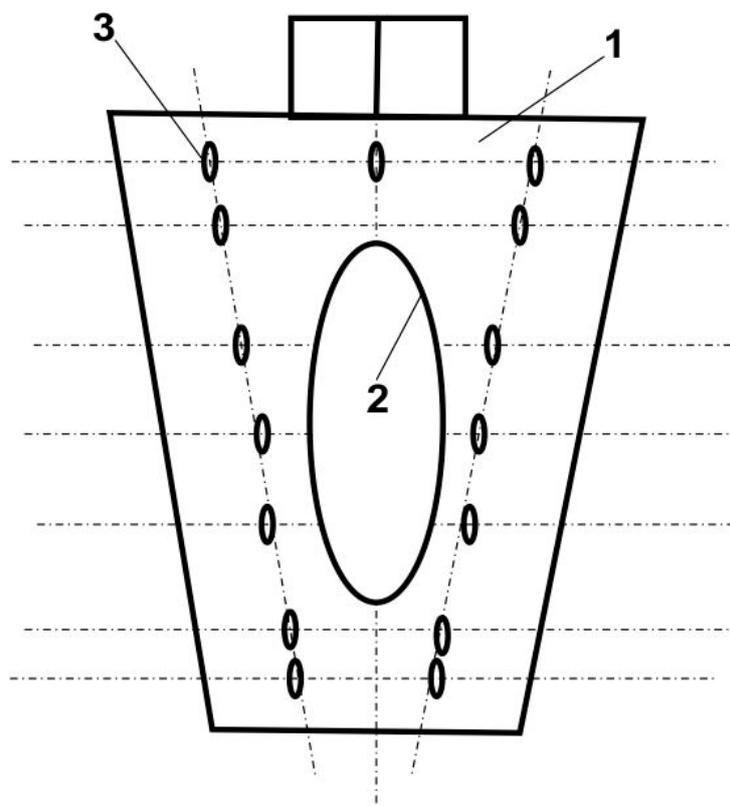


Рисунок 19 Схема расположения лунок

1 – поверхность пробки крана, 2 – проходное отверстие, 3 - лунки

В основу испытаний была положена линейная модель изнашивания после периода приработки. При этом планировалось производить измерения только в течение первых $q = 40\%$ от общего числа циклов 10000 циклов, т.е. до 4100 циклов за 4 сеанса, а затем ресурс до наступления предельного износа определяется методом экстраполяции результатов по времени (19).

Оценка коэффициентов ускорения и времени испытаний

Ускорение испытаний данного изделия может быть достигнуто как за счёт форсирования режима, так и за счёт ограничения испытаний указанным выше диапазоном на сокращённом участке зависимости «наработка-износ» с последующей экстраполяции по времени. Форсирование достигается за счёт учащения циклов «открыто-закрыто» до частоты 30 цикл/час.

Коэффициент ускорения при форсировании испытаний по частоте составит,

$$K_{\omega} = \omega_u / \omega_s = 30 / 0.1 = 300 \quad (26)$$

а для расчета времени испытаний применена формула (27)

$$t_u = T_u \cdot 0.4 / \omega_u = 10000 \cdot q / 300 = 133 \text{ час.} \quad (27)$$

Содержание испытаний

Перед началом испытаний кран подвергается первичной технической экспертизе на соответствие конструкторской документации. С этой целью производится его разборка, проверка основных размеров и качества поверхности пробки, проверяется комплектность, наличие смазки, качество уплотнительных поверхностей. При несоответствии требованиям конструкторской документации изделие заменяется с составлением акта. После технической экспертизы и микрометража производится сборка крана и установка на стенд.

Затем кран подвергается приработке в продолжение 100 циклов и переводится на стационарный режим выполнения сеансов с периодичностью измерения износа через каждые 1000 циклов наработки в диапазоне от 1100 до 4100 циклов (4 сеанса). Эти результаты испыта-

ний и измерений в 42 точках заносятся в журнал по установленной форме, который и образует базу исходных данных для расчета. Дальнейшие указания заключаются в описании построения и анализа нарисованного от руки графика (копия показана на рис. 19)

В основе рис. 19 лежит построение указанного там графика по линейной функции (17) прогнозируемого ресурса $N_{np,i}$ для i - го измерения. Далее будет показан расчет по алгоритмам этого труда в математическом редакторе MATHCAD.

Таблица 6

N_i	1100		2100		3100		4100	
№	износ	ресурс	износ	ресурс	износ	ресурс	износ	ресурс
1	7.247	21640	17.013	16381	22.7	18053.2	29.611	18183.8
2	7.281	21519	17.126	16264	22.8	17931.4	34.794	15369.8
3	8.707	17376	17.424	15963	25.6	15897.4	35.542	15034.2
4	8.968	16783	19.498	14144	26.66	15245.7	36.907	14457.9
5	9.101	16497	19.528	14121	27	15028.3	38.115	13983.3
6	9.127	16442	19.65	14027	27.5	14700.3	38.73	13753.7
...	
....	
38	14.00	10132	28.777	9367	40.35	9887.36	52.686	10018.1
39	14.00	10127	28.879	9333	41.07	9708.65	54.419	9691.42
40	14.126	10034	28.972	9301.889	43.74	9097.89	55.014	9584.11
41	14.17	9993	29.039	9279	43.84	9075.58	60.155	8746.94
42	14.85	9497.313	29.53	9118	44.293	8980.53	61.292	8581.08

Оценка гамма – процентных ресурсов крана

Целью данного исследования является расчет не только среднего, но и гамма – процентного ресурса изделия при $\gamma = 0.8$. Эту задачу можно решить несколькими способами с применением различных вероятностных моделей. Поскольку расчеты будут выполняться для заданной функции (17), то в данном случае проще принять алгоритмы модели типа «Веер» на основе закона распределения Вейбулла. В рассматриваемом примере исходные данные об условном измерении

износа в 42 точках при четырех сеансах были созданы генератором случайных чисел для распределения Вейбулла, В результате были получены выборки измерений износов и выборки соответствующих им ресурсов, рассчитанные по формуле (17) для каждого из четырех сеансов в 42 точках. Эти выборки показаны в таблице Задача сводиться к расчету параметров формы b и масштаба a распределения Вейбулла методом моментов по данным о среднем ресурсе N и СКО σ выборки. Поскольку в данном случае для всех $42 \cdot 4 = 168$ точек определялась одна и та же случайная величина N , то средний ресурс и СКО для нее определялся по элементарным формулам (5) и (6),. Расчеты показали, что средний ресурс составил $N = 12207$ циклов, СКО $\sigma = 2322$ и коэффициент вариации $= 0.19$. Эти величинам соответствуют параметры $b = 6.12$ и $a = 13143$ циклов. Теперь остается рассчитать 80 – процентный и медианный ресурсы по формуле (15) и построить распределения вероятности по формуле (14) на рис.21.

$$\begin{aligned}
 R(\gamma = 0.8) &= 13143 \ln\left(\frac{1}{0.8}\right)^{1/6.12} = 10287, \\
 R(\gamma = 0.5) &= 13143 \ln\left(\frac{1}{0.5}\right)^{1/6.12} = 12380.
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Таким образом, рассмотренный пример УРИ подтвердил высокую надёжность исследуемого пробкового крана, поскольку 80-процентный ресурс оказался несколько больше требуемого ресурса 10000 циклов.

Этот пример является наиболее простым, поскольку здесь не требовалось построение эмпирических распределений или выбора вида тренда деградационного процесса.

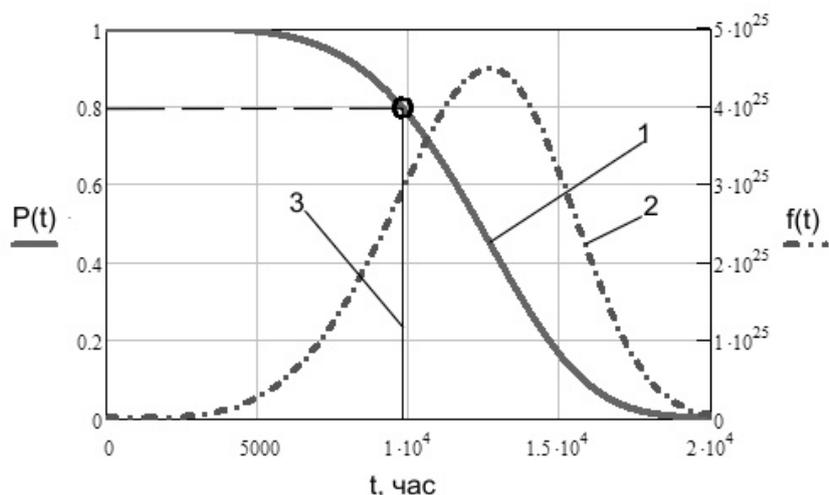


Рисунок 20 Распределение вероятности безотказной работы $P(t)$ – 1 и плотности распределения $f(t)$ – 2, 80 – процентный ресурс – 3

УРИ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ

Цель и объект испытаний

Работа выполнялась творческой группой кафедры «Технология металлов и судоремонта» Мурманского ГТУ в июне 2013 года с целью совершенствование методики прогнозирования ресурсов и сроков службы техники путем проведения ускоренных ресурсных испытаний.

В качестве основного объекта испытаний был выбран мерительный инструмент – штангенциркуль ШЦ-I-250-0,02 ГОСТ 166 (год выпуска 2013, класс 1, далее ШЦ), изготовленный из хромированной стали. ШЦ имел шкалу с ценой деления 0.02 мм по нониусу и предел погрешности $h_{no} = 0.05$ мм.

Кроме того были проведены испытания аналогичного инструмента из менее твердого материала.

Характеристика условий эксплуатации.

Инструмент рассматриваемого типа является изделием массового производства в нашей стране и за рубежом. Имеет простейшую

конструкцию, но требует высоких навыков использования, поскольку точность измерений зависит от ряда субъективных («Человеческих») факторов, оговоренных в инструкции по эксплуатации.

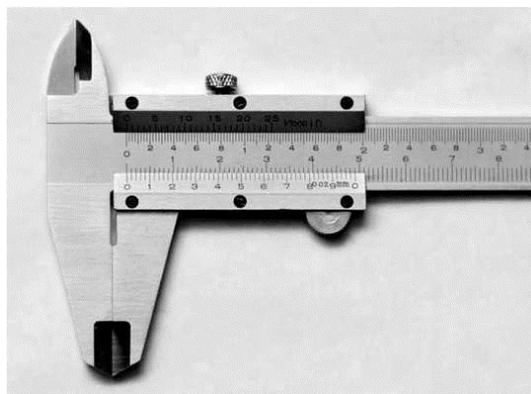


Рисунок 21 Объект исследования - штангенциркуль

Частота использования зависит от области применения (на производстве, в учебном процессе, в быту и прочее) и не может быть однозначно определена. Используя концепцию ВЛ и исходя из нагрузки, близкой к максимальной, эксплуатационная частота использования принята $\omega_3 = 10$ циклов/сутки.

Показатели долговечности.

Назначенный срок службы официально не установлен. Ориентируясь на опыт высоко квалифицированных мастеров принимаем срок службы $T_3 = 30$ лет.

Назначенный ресурс до списания так же не установлен, и он определен как условный норматив при испытаниях по формуле $T_p = 365 \cdot T_3 \cdot \omega_3 = 365 \cdot 30 \cdot 10 \approx 100000$ циклов. Готовая наработка составляла $365 \cdot \omega_3 = 3650$ циклов.

Межповерочный интервал (МПИ) условно принимаем один год, но он явно не связан с износом ШЦ и предназначен для формального контроля исправности для допуска к работе (научной и производственной).

Изучался процесс изнашивания губок и направляющих каретки ШЦ в зависимости от количества циклов упругих соприкосновении с

мишенью. Особенностью данного испытания является то, что средством измерения является сам объект исследования (штангенциркуль) с использованием нониуса.

Диагностическим параметром (ДП) служит погрешность измерений η относительно опорной величины по эталону (концевой мере). При испытаниях использовалась концевая мера 30 мм.

Предел погрешности по паспорту прибора составляет 0.05 мм.

Допустимая вероятность не достижения предела погрешности принята 0.975, исходя из $Z = 2$.

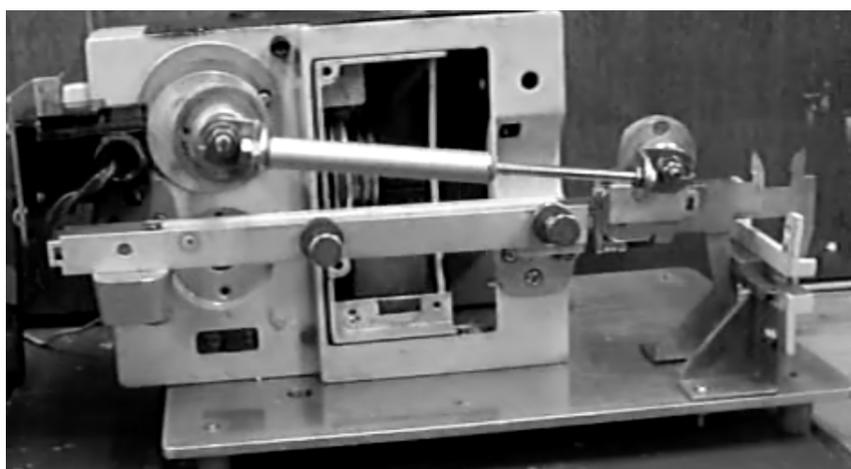


Рисунок 22 Стенд для УРИ штангенциркуля

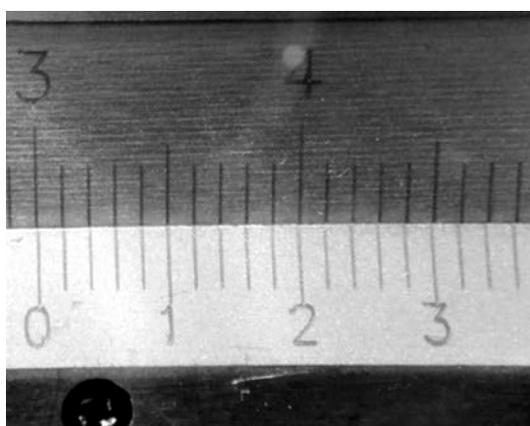


Рисунок 23 Увеличенная фотография нониуса при измерениях опорной величины

Условия проведения испытаний

Испытания проводились на особом стенде Мурманского ГТУ (рис. 23). Исследуемый инструмент крепился к кривошипно-шатунному механизму стенда. Принцип действия стенда заключается в циклическом возвратно - поступательном перемещении каретки ШЦ до упругого соприкосновения губки с эталоном.

Расчетное давление при упругом ударе губок составлял 10 Н, а частота ударов 1.5 Гц или $\omega_n = 90$ циклов/мин.

Испытанию подвергается один, специально отобранный, образец изделия, но с периодическими многократными измерениями погрешности инструмента после каждого сеанса испытаний. Источниками неопределённости (рассеяния) этих измерений является в основном неизбежный человеческий фактор, зависящий не только от опыта и добросовестности оператора, но и от явной субъективности снятия показаний с нониуса. Это видно из фотографии на рис. 24

Поэтому при подготовке к УРИ необходимо проводить обучение и аттестацию операторов, а так же оснащать стенд дополнительными средствами контроля. В частности для повышения достоверности снятия показаний с нониуса был внедрен метод его фотографирования с высоким разрешением и с обсуждением этого документа опытными экспертами. Эти и другие меры привели к повышению стабильности результатов испытаний.

Оценка коэффициента ускорения и времени испытаний

Ускорение испытаний данного изделия достигается за счёт форсирования режима по частоте нагрузки до $N = 90 \cdot 60 = 5400$ циклов/час. При принятой частоте использования инструмента 10 циклов сутки расчетная часовая частота в эксплуатации составит $f = 10/24 = 0.42$ циклов/час.

Тогда коэффициент ускорения при форсировании испытаний по частоте составит

$$K_\omega = \omega_u / \omega_s = 5400 / 0.42 = 12960 \quad (29)$$

Номер сеанса	Пр4		Пр5		Пр 6	
Оператор	Кумова		Кумова		Кумова	
Дата	27.06.2013		01.07.2013		02.07.2013	
Начало	15:02		14:05		14:15	
Окончание	19:02	240:00:00	18:05	240:00:00	18:15	240:00:00
Время, мин	240		240		240	
Циклов	21600	усл лет	21600	усл лет	21600	усл лет
Всего	95600	35.41	117200	43.41	138800	51.41
Измерения	Замер	Погрешн	Замер	Погрешн	Замер	Погрешн
1	30.02	-0.016	30.01	-0.026	30.02	-0.016
2	30.04	0.004	30.01	-0.026	30	-0.036
3	30.02	-0.016	30.01	-0.026	30.02	-0.016
4	30.04	0.004	30.02	-0.016	30	-0.036
5	30.02	-0.016	30.01	-0.026	30	-0.036
6	30.02	-0.016	30.01	-0.026	30.02	-0.016
7	30.02	-0.016	30.01	-0.026	30	-0.036
8	30.02	-0.016	30.03	-0.006	30	-0.036
9	30.02	-0.016	30.01	-0.026	29.98	-0.056
10	30.02	-0.016	30.06	0.024	30	-0.036
Статистика	Нулевая	Погрешн	Нулевая	Погрешн	Нулевая	Погрешн
Средняя		-0.012		-0.018		-0.032
СКО		0.0167		0.0167		0.0167
ЗМН	3.0000	2.2800	3.0000	1.9200	3.0000	1.0800
ВНПС	0.9987	0.9887	0.9987	0.9726	0.9987	0.8599
Измерения	Замер	Погрешн				
1	30.02	=F28-\$C\$10				
2	30.04	=F29-\$C\$10				
3	30.06	=F30-\$C\$10				
4	30.04	=F31-\$C\$10				
5	30.04	=F32-\$C\$10				
6	30.04	=F33-\$C\$10				
7	30.06	=F34-\$C\$10				
8	30.02	=F35-\$C\$10				
9	30.02	=F36-\$C\$10				
10	30.04	=F37-\$C\$10				
Статистика	Нулевая	Погрешн				
Средняя		=СРЗНАЧ(G28:G37)				
СКО		=ЕСЛИ(СТАНДОТКЛОН(G28:G37)<=\$C\$7/3;\$C\$7/3;СТАНДОТКЛОН(G28:G37))				
ЗМН		=ABS(\$C\$7)-(ABS(\$C\$7)-ABS(G39))/G40				
ВНПС		=НОРМСТ(=НОРМСТРАСП(G41)				

Рисунок 24 Протокол (a) и программа (b) УРИ штангенциркуля (фрагменты)

Для расчета времени испытаний применена формула (30)

$$t_u = T_u / \omega_u = 100000 / 5400 \approx 20 \quad (30)$$

При пятидневной рабочей неделѣ продолжительность сеанса испытаний составит $20/5 = 4$ часа или $4 \cdot 5400 = 21600$ циклов.

Программа испытаний базировалась на методологии работы [5] и содержала следующие этапы.

1. Перед началом испытаний с помощью другого цифрового ШЦ был проверен размер эталона, который составил 30 мм, а так же замерена твердость материала губок и эталона, которая составила соответственно 56 и 64 HRC. Отсюда следует вывод, о более вероятном износе материала ШЦ по отношению к эталону.
2. Затем была найдена начальная систематическая погрешность исследуемого ШЦ путем 10-кратного измерения эталона. Оказалось, что новый ШЦ уже имел систематическую погрешность +0.036 мм, что было учтено в программе основных испытаний путем введения поправки в размер опорной величины $D = D_0 + 0.036 = 30.036$ мм. Эта процедура равноценна корректировке нуля средства измерения.
3. Все измерения записывались в протокол установленной формы в редакторе EXCEL (см. рис. 25a), который одновременно являлся программой (см. рис. 25b), указанных ниже расчетов
4. Испытания проводились в течение одной недели, и весь период испытаний был разбит на сеансы.
5. По совершении каждого сеанса стенд выключали и производили 10 измерений размера эталона d_i и погрешности h_i как разность $h_i = D - d_i$.

Таким образом, по результатам каждого сеанса испытаний образовывался вектор погрешностей.

6. Под каждым вектором измерений погрешности h_i в нижней части таблицы вычислялась систематическая погрешность, равная сред-

ней погрешности h_c и среднеквадратическая погрешность σ (СКО) по формулам (5 и 6). Тогда автоматически рассчитывался запас метрологической надежности ЗМН Z_β и соответствующая ему вероятность не достижения предельного состояния (ВНПС) по формуле (31).

$$Z_\beta = \frac{|h_{nd}| - |h_c|}{\sigma}; \quad \beta(h) = \text{cnorm}\left(\frac{|h_{nd}| - |h_c|}{\sigma}\right) \quad (31)$$

где h_c – средняя погрешность, h_{nd} – предельно-допустимая погрешность, $\beta(h)$ - ВНПС.

7. С целью компенсации некоторой субъективности распознавания штрихов нониуса была применена логическая формула для расчета СКО, показанная на рис 25 и соответствующая условному алгоритму $\sigma = \text{если}(\sigma \leq h_p/3, h_p/3, \sigma)$. Такой прием позволил стабилизировать функцию для расчета ЗМН без снижения надежности результатов испытаний
8. Таким образом, образовалась зависимость систематической (средней) погрешности и ЗМН от наработки ШЦ в циклах или в условных годах эксплуатации инструмента. Отметим, что за все время испытаний стенд отработал 160400 циклов, что соответствует около 60 лет эксплуатации при 10 измерениях в рабочие сутки и 270 рабочих суток в году.

Теперь можно было бы перейти к анализу зависимости ЗМН и погрешности от наработки с целью оценки ресурса ШЦ исходя из достижения предельно – допустимого ЗМН.

Следующие вычисления для оценки ресурса ШЦ выполнялась в среде MathCAD, куда были перенесены через буфер обмена строка наработок (в циклах и условных годах) и блоки расчетов систематической погрешности и ЗМН по всем семи сеансам.

Не вдаваясь в подробности расчетных и методических процедур, рассмотрим результирующие графики зависимости средней погреш-

ности и ЗМН от условного срока службы ЩЦ (рис. 9). Для этого была использована линейная регрессия (18), для которой были рассчитаны характеристики, приведенные в таблице 7 .

Таблица 7 Постоянные уравнений регрессии (18)

Параметр	Коэффициент Корреляции	Задача					
		Прямая – Параметр от срока			Обратная – Срок от параметра		
		Ау	Ву	су	Ах	Вх	σх
ЗМН	0.974	4.326	0.0598	0.209	72.37	16.73	3.45
Средняя	0.988	0.0256	0.00107	0.00246	24	936.5	2.31

Эти результаты позволяют оценить условный срок службы ЩЦ при общепринятом ЗМН, равным двум (ВНПС = 0.975) и пределе погрешности 0.05 (который был учтен еще при расчете ЗМН в редакторе EXCEL) .

Итак, условный срок службы составил $72.37 - 16.73 \cdot 2 = 38.9$ лет, что соответствует $2700 \cdot 38.9 = 105030 \approx 100000$ циклам.

4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

4.1. Основные понятия

. В зависимости от этапа жизненного цикла методы контроля технического состояния машин 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. 26).

Выполнение функционального контроля входит в обязанности персонала, обслуживающего машину. Он обязан следить за измене-

нием всех рабочих параметров машины и поддерживать их значения в допустимых пределах путем регулировки рабочих органов или выполнения внеплановых ремонтов.

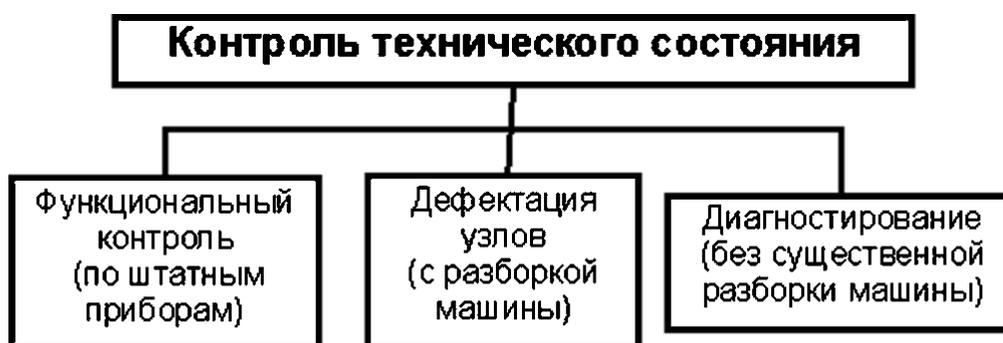


Рисунок 25 Классификация контроля технического состояния

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 γ . 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.

Техническая диагностика (ТД) - это комплекс измерительных операций по оценке технического состояния и выявлению дефектов деталей машин без разборки или с минимальной разборкой машины с целью прогнозирования их остаточного ресурса или уточнения перечня работ по предстоящему плановому ремонту.

При этом сам процесс определения технического состояния объекта принято обозначать термином техническое диагностирование (или просто — диагностирование), которое сводится 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.

Термины и определения в области контроля и диагностирования технического состояния техники регламентируются ГОСТ 20911-

89 [9]. Далее показаны понятия, которые имеют наибольшее значение для оценки надежности техники.

Контроль технического состояния (контроль) — проверка соответствия значений параметра объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

Диагностический (контролируемый) параметр — параметр объекта, используемый при его диагностировании (контроле).

Объект технического диагностирования — изделие и (или) его составные части, подлежащие (подвергаемые) диагностированию (контролю).

Прогнозирование технического состояния — определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Целью прогнозирования технического состояния может быть определение заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта и вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

Приспособленность объекта к диагностированию (контролепригодность) — свойство объекта, характеризующее его пригодность к проведению диагностирования (контроля) заданными средствами диагностирования (контроля)

Система диагностирования (контроля) — совокупность средств, объектов и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

4.2. Средства технической диагностики

Средство диагностирования (СТД) — аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль)

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.

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. 27). 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).

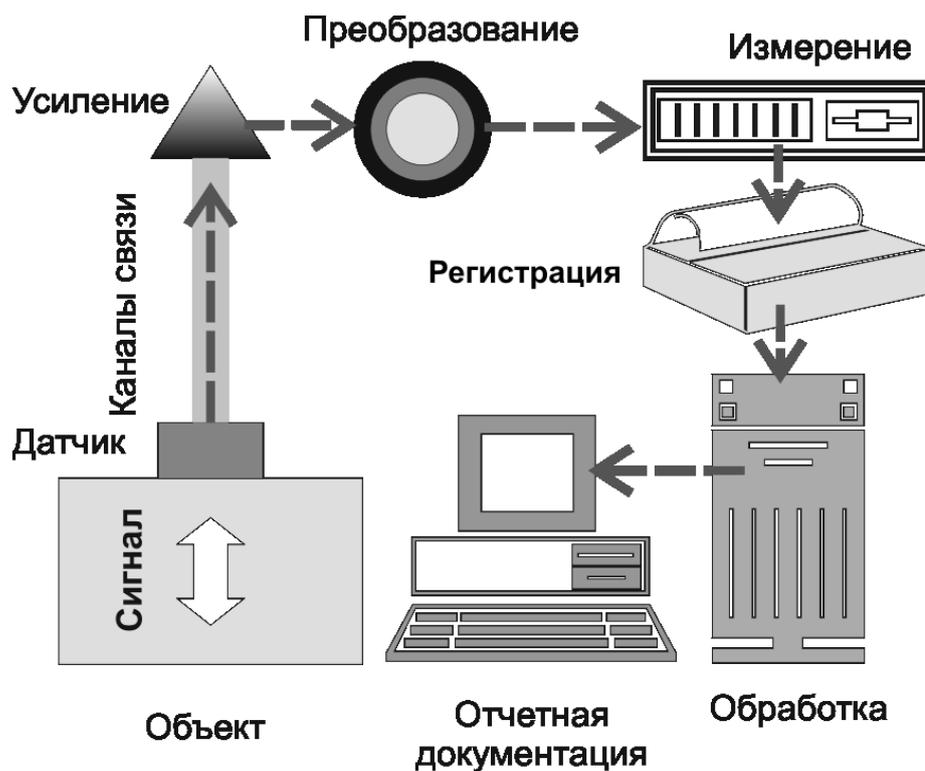


Рисунок 26 Основные блоки средств технической диагностики

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.

4.3. 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.

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 СТС 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. 28,

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 загорается красный свет и срабатывает звуковая сигнализация.

Для корректировки назначенного ресурса, как было показано в разделе 2.1, целесообразно установить запасной уровень диагностического параметра LB, который находится между уровнями LA и LR (Рис.28).

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 возрастать из-за увеличения дисбаланса по мере износа подшипников (рис. 29).

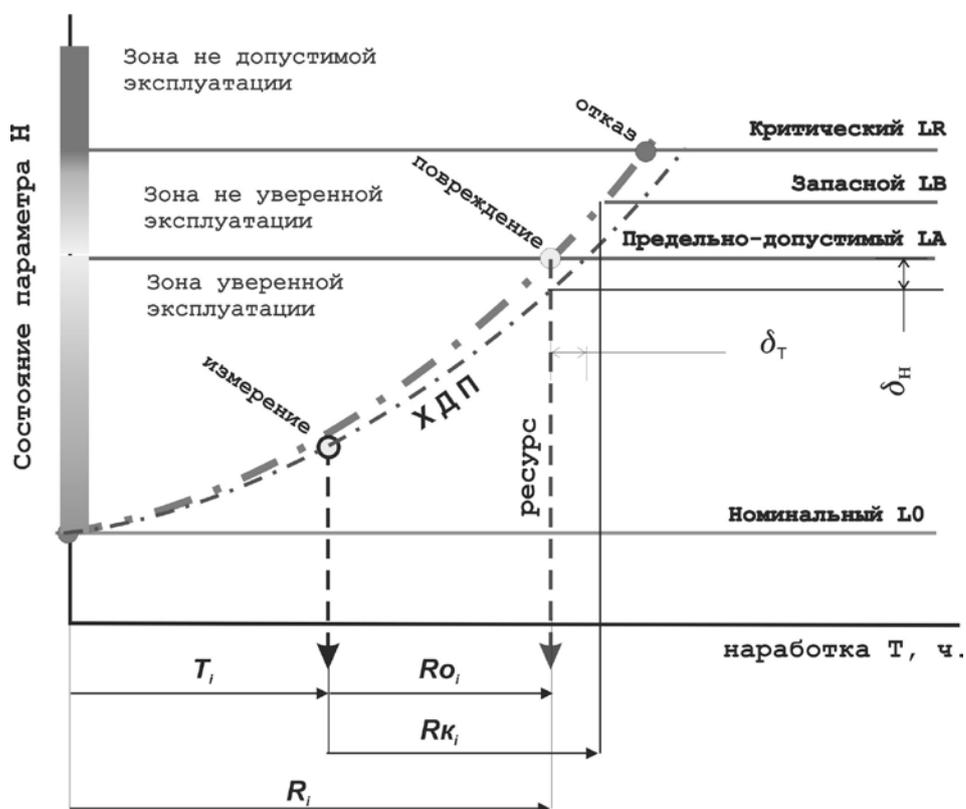


Рисунок 27. Принцип прогнозирования остаточного ресурса

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 сигналь-

ное 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.

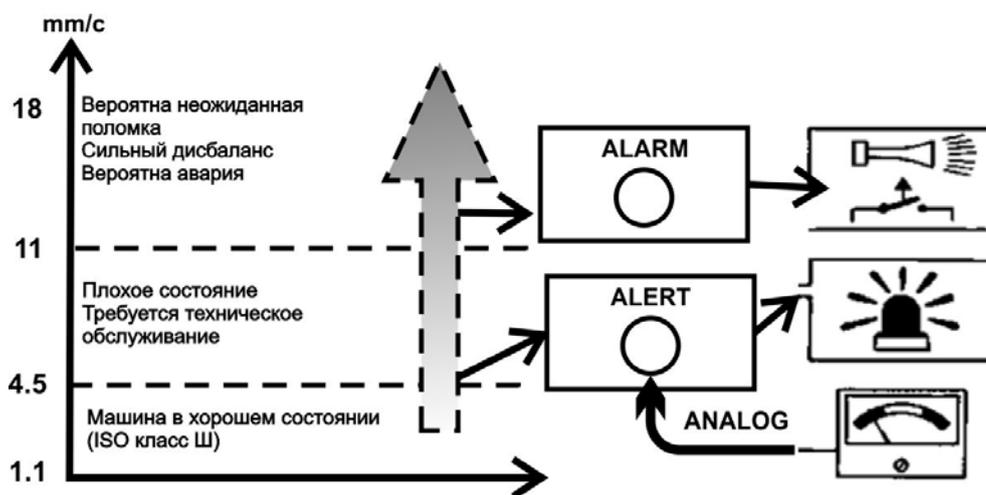


Рисунок 28. Схема сигнализации о достижении уровней диагностирования

К важной задаче диагностирования относится прогнозирование технического состояния техники.. 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. 28, для этого, кроме указанных выше критериев предельного состояния, необходимо располагать характеристикой диагностического параметра, т.е. зависимостью изменения ди-

агностического параметра H от времени T . Методика решение этой проблемы показано в разделе 2.1. Несколько примеров диагностирования рассматривается при проведении практических занятий в приложении.

В качестве критерия оценки предельного технического состояния может использоваться так называемые эталонные характеристика технического состояния (ЭХС) – качественное или графическое описание состояние объекта, соответствующее отличному состоянию и применяемое для сравнения с фактическим состоянием. Может быть получено экспериментальным или расчетным путем. Содержит образцы отклонений ЭХС или допустимые границы отклонения от нормы. На рис. 30 приведены образцы индикаторной диаграммы, которые применяются при диагностировании дизеля в качестве ЭХС.

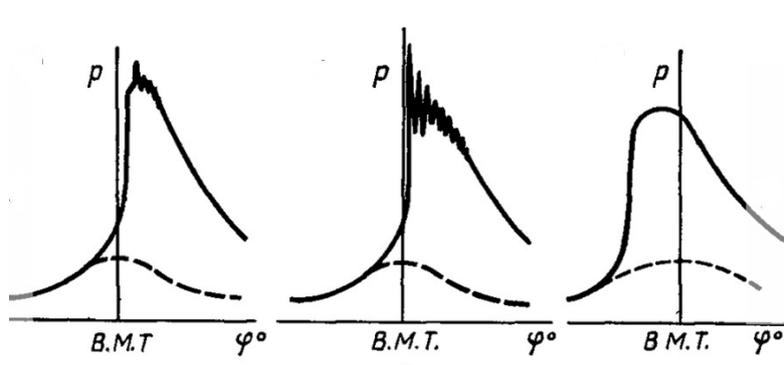


Рисунок 29 Образцы с разными дефектами индикаторной диаграммы, используемые как ЭХС

4.4. Методы технической диагностики

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 измере-

ний 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 наличие трещин в корпусе, какого-либо устройства можно судить по спектру звука при ударном воздействие.

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

- параметрические методы;
- инструментальные методы;
- методы 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) ..

Рассмотрим некоторые примеры диагностирования по принципу действия и назначению датчиков СТД с ссылкой на иллюстрации в таблице.

1. Инструментальный метод технической диагностики заключается в оценке технического состояния деталей и узлов с помощью универсальных или специализированных мерительных: инструментов, как правило, на неработающем и частично разобранном СТС. Этим методом, например, оценивают зазоры в подшипниках с помощью щупов или индикаторных головок путем перемещения сопряженных деталей. При инструментальных методах используются оптические приборы - эндоскопы, предназначенные для осмотра внутрен-

них полостей без разборки для обнаружения повреждений и отложений, например у втулок, поршней и клапанов дизелей. К инструментальным методам СТД можно отнести ручные тахометры для точного измерения частоты вращения, в том числе бесконтактным методом.

2. Параметрический метод технической диагностики заключается в периодическом или непрерывном наблюдении за рабочими параметрами СТС с помощью штатных методов технической диагностики, в сравнении их с допустимыми величинами и принятии решений по выполнению регулировочных или ремонтных операций.

При наличии соответствующих методик штатные СТД, а следовательно, и параметрический метод можно применять и для диагностики технического состояния деталей и узлов.

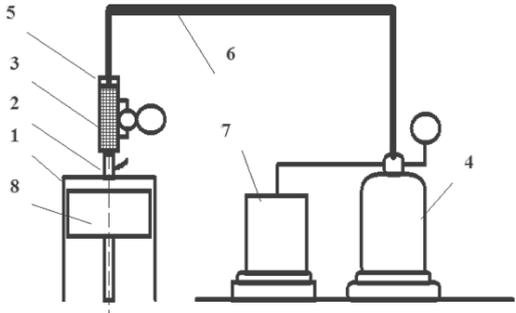
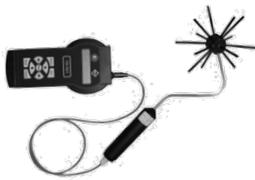
Например, об увеличении износа цилиндропоршневой группы можно судить по снижению давления сжатия, замеренного с помощью индикатора "Майгак" при работе на малых оборотах.

3. Диагностирование по герметичности замкнутых полостей. Он широко применяется при опрессовке сосудов и деталей, работающих под давлением. В качестве рабочей среды могут использоваться воздух, газы и жидкие вещества (вода, масло и др.). Суть метода состоит в контроле утечек из исследуемых полостей рабочей среды, которая нагнетается туда под определенным давлением.

Контроль утечек может выполняться разными методами с применением универсальных или специальных СТД. Один из них заключается в контроле скорости падения давления с помощью манометра. Полость считается полностью герметичной, если падения давления не наблюдается.

Метод диагностики по герметичности замкнутых полостей положен в основу специализированных приборов - пневмоиндикаторов, предназначенных для оценки технического состояния цилиндропоршневой группы поршневых машин.

Таблица 8

Индекс	Название	Пример
1	Инструментальные (выжимки для зазора подшипника)	
2	Параметрические (манометр)	
3	По герметичности замкнутых полостей (пневмоиндикатор)	
4	Термоизмерения (периметр, тепловизор)	
5	Виброизмерение (виброметр)	
6	Электроизмерение (вольтметр)	
7	Прочие (дефектоскоп)	

4. Теплоизмерительные методы относятся к традиционным способам оценки технического состояния узлов трения и других элементов, работа которых сопровождается выделением тепла и повышением температуры внешних деталей машин и устройств. Например, в практике широко используется субъективная оценка технического состояния опорных и упорных подшипников валов за счет прикосновения к поверхности ладонью руки. Однако объективно оценить температуру деталей можно только с помощью специальных приборов для измерения температуры выхлопных газов, воды, масла, воздуха и др. Широкое использование получили пирометры и тепловизоры для бесконтактной оценки состояния на расстоянии.

5. Виброакустические методы технической диагностики охватывают широкую область использования средств измерения низкочастотных и высокочастотных колебаний СТС и их элементов, возникающих при их работе или работе других машин промышленного оборудования. К средствам измерения колебаний относятся виброметры и вибрографы, торсиографы, приборы ударных импульсов, шумомеры с комплектом датчиков и фильтров, а также универсальная аппаратура для тензометрирования деталей машин, комплектуемая из датчиков-тензорезисторов, усилителей, осциллографов и другой аппаратуры.

6. Электрические и электромагнитные методы имеют большое распространение при контроле технического состояния электрооборудования, а также в качестве комплектующих элементов других СТД. К электронным контрольно-измерительным средствам относятся приборы для определения силы тока, напряжения, мощности, сопротивления изоляции материалов, емкости, индуктивности и прочих параметров электрического тока.

7. Прочие методы. Существует очень много других методов и средств технической диагностики. Среди них можно выделить методы неразрушающего контроля деталей и материалов, которые в основном используются при дефектации СТС по мере их разборки при

ремонтах. Вместе с тем, средства дефектации могут применяться для оценки технического состояния промышленного оборудования, трубопроводов, корпусов машин и других элементов СТС в случае хорошего доступа к ним без разборки. В частности к ним относятся методы магнитной дефектоскопии и капиллярные методы контроля для обнаружения трещин и других подобных повреждений. Так к капиллярным методам относятся керосино-меловый, цветной и люминесцентный способы обнаружения дефектов на поверхности деталей. Большое распространение при ремонте получили ультразвуковые методы дефектации и толщиномеры. С их помощью можно не только обнаружить внутренние дефекты, но измерить толщину листов и стенок. Поэтому ультразвуковые приборы позволяют контролировать износы корпусов, трубопроводов и других деталей.

8. Изучение износов по содержанию металла в масле и выхлопных газах. Эти методы предназначены в основном для интегрального диагностирования технического состояния цилиндропоршневой группы и подшипников двигателей внутреннего сгорания. Сущность метода заключается в том, что продукты изнашивания этих деталей в виде мелких частиц попадают в масло или выхлопные газы, количество которых и характеризует степень их износа. Контроль продуктов изнашивания в смазочном масле можно осуществлять различными способами: оценкой остатков после изоляции навески пробы масла, методом радиоактивных изотопов, спектральным анализом и с помощью электромагнитных индикаторов.

Метод спектрального анализа позволяет определять величину абсолютного износа сопрягаемых деталей и скорость их изнашивания. Сущность метода базируется на эмиссионной спектроскопии с помощью кварцевого спектрографа для фотографирования спектров, генератора для получения дуги переменного тока, спектропроектора для расшифровки спектрограмм и микрофотометра для фотометрирования спектральных линий исследуемых элементов.

Метод радиоактивных изотопов основан на повышении количества радиоактивного изотопа в масле из-за изнашивания активированных деталей. Активизация деталей может осуществляться введением радиоактивного изотопа при их отливке, облучением деталей нейтронами в атомном реакторе, нанесением на поверхность детали радиоактивного электролитического покрытия и введением вставок-свидетелей. Метод вставок получил наибольшее распространение. Радиоактивность измеряют счетчиками Гейгера-Мюллера или сцинтилляционными счетчиками. Последние обладают более высокой чувствительностью и позволяют снизить уровень радиоактивности. Перспективным методом оценки продуктов изнашивания в масле является применение специальных электромагнитных индикаторов,

Продукты износа цилиндрических: втулок и поршневых колец попадают не только в масло, но и в выхлопные газы. При этом на номинальной частоте вращения доля частиц износа в выпускных газах составляет до $2/3$ общего износа. Кроме того, анализ выпускных газов на содержание в них углекислого газа можно выполнить с помощью хроматографов. Очевидно, что описанные выше методы оценки износа по содержанию металла в масле или газах требуют создания хорошо оснащенных измерительной техникой лабораторий.

4.5. Перспективы развития методов и средств диагностики

Описать перспективы развития технической диагностики в общем виде практически невозможно, поскольку в любой отрасли науки и деятельности активно развиваются разнообразные методы и средства, основанные на достижениях науки и техники в сочетании с успехами в микропроцессорной технике. Это наглядно видно на примере развития клинической диагностики в медицине. Клиническая лабораторная диагностика (лабораторная диагностика) представляет собой медицинскую диагностическую специальность, основанная на использовании гематологических, общеклинических, паразитарных, биохимических, иммунологических, серологических, молекулярно-

биологических, бактериологических, генетических, цитологических, токсикологических, вирусологических методов, сопоставления результатов этих методов с клиническими данными и формулирования лабораторного заключения.

Аналогичные организационные меры должны приниматься во всех отраслях промышленности и транспорта. На железнодорожном, водном, автомобильном, авиационном транспортах продолжает развиваться бортовые диагностические системы, расширяющие возможности функциональных средств контроля за основными параметрами оборудования. Транспортные средства оснащаются аппаратными компьютерными блоками для накопления, обработки и анализа информации о повреждениях элементов с целью уточнения сроков и объёма плановых ТОР. Такое сочетание систем ППР и ППО с автоматизацией эксплуатационных диагностических процедур оптимизировать затраты на обеспечение надежности машин. Важно отметить, что в большинство машиностроительных отраслей промышленности не планирует отказываться от систем ППР, но, в тоже время, продолжают вести работы по разработке и внедрению средств и методов без разборной диагностики.

5. Библиографический список

1. *Ефремов Л.В., Скотникова М.А., Иванова Г.В.* Техническая эксплуатация и надёжность промышленного оборудования. <https://dl.spbstu.ru/course/view.php?id=3124>
2. *Ефремов Л.В.*, Практика вероятностного анализа надёжности техники с применением компьютерных технологий., Санкт-Петербург: Наука, 2008,
3. *Ефремов Л.В.*, Вероятностная оценка метрологической надёжности средств измерений: алгоритмы и программы., Санкт-Петербург: Нестор-История, 2011,
4. *Ефремов Л.В.* Проблемы управления надёжностью ориентированной технической эксплуатацией машин — СПб. Art-Xpress, 2015. – 206 с.
5. *Ефремов Л.В.*, Вероятностные проблемы ресурсных испытаний., Санкт-Петербург: АРТ-ХПРЕСС, 2014,
 6. RCM (Reliability Centered Maintenance), http://www.mainsaver.com/pdf/Reliability_Centered_Maintenance_White_Paper.pdf
 7. FMEA/FMECA Анализ видов, последствий и критичности отказов, <URL:<http://maintex.ru/methods/fmeca/>
 8. *Марк Л.Р.*, Диаграмма Парето на практике, <URL:http://www.elitarium.ru/2009/05/29/diagramma_pareto.html
 9. *Ефремов Л.В., Черняховский Э.Р.* , Надёжность и вибрация дизельных установок промысловых судов, Москва: Пищевая промышленность, 1980,
 10. *Ефремов Л.В.*, Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий., Санкт-Петербург: Наука, 2007, 5-02-025134-8
 11. *Байков Б.П. и др.*, Дизели. Справочник, Ленинград: Машиностроение, 1977,

12. *Ефремов Л.В.*, Практика инженерного анализа надежности судовой техники, Ленинград: Судостроение, 1980,
13. *Ефремов Л.В., Тузов Л.В.*, Динамика судовых и стационарных двигателей, Ленинград: СЗПИ, 1982,
14. *Ефремов Л.В.*, Практикум по расчету надежности судовой техники, Мурманск: МГТУ, 2000,
15. *Ефремов Л.В.* Практикум по расчетам надежности судовой техники: Учеб. пособие. — Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 1999.— 128 с.
16. Методы и средства технической диагностики судовых технических средств / Л.В. Ефремов .-М., 1992.-40 с.:ил.- (Рыбн. хозво. Сер. Эксплуатация флота. Судостроение: Обзорная информация / ВНИЭРХ; Вып.6).
17. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
18. *Проников А.С.* Надежность машин. М.;Машиностроение,1978.
19. *Скотникова М.А.* Повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин. Учебное пособие. СПб, ПИМаш, 2003,
20. *Скотникова М.А., Мартынов М.А.* “Практическая электронная микроскопия в машиностроении”. Монография. СПб. ПИМаш, 2006, *Лебедев В.М.* Износостойкость трибосопряжений деталей машин. СПб.: СПбГТУ, 1995.
21. *Ашейчик А.А.* Основы трибоники. - СПб.: СПбГТУ, 1995.

6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

6.1. Практическое занятие ПЗ – 1

Ремонтный цикл дизеля

Задание. Изучить зависимость системы ППР от долговечности основных элементов на примере дизеля 8NVD36 и оценить коэффициент технического использования $K_{ти}$ при коде РЦ 1124.

Исходные данные.

1. Общая таблица назначенных ресурсов и нормативов износов элементов судовых дизелей трех типов (таблица 1)
2. Таблица типовых работ по видам ремонта дизелей трех типов (таблица 2).

Порядок выполнения и результаты работы

Составляется график периодичности ремонта основных элементов дизеля 8NVD36 для кода РЦ 1124 по данным таблицы 8.

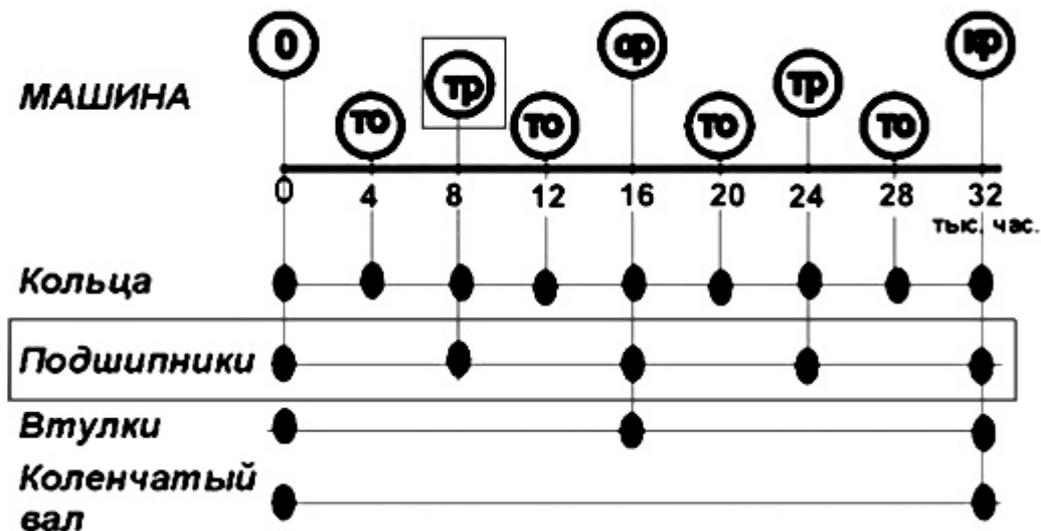


Рисунок 30 Ремонтный цикл двигателя 8NVD36

Из рисунка следует, что периодичность текущего ремонта лимитируется ресурсом подшипников.

Таблица 9

Шифр	Двигатели (по ГОСТ)	NVD48			NVD36			NVD24		
		R _γ , тыс.ч	h _о , мм	h _д , мм	R _γ , тыс.ч	h _о , мм	h _д , мм	R _γ , тыс.ч	h _о , мм	h _д , мм
1. Поршень - втулка цилиндров:										
1.1	износ зеркала цилиндров, дмтр/эллс	24	0	2,1/0.7	16	0	1.8/0.5	12	0	0.8/0.2
1.2	износ поверхности юбки поршня	24	0	0,25	16	0	0,20	12	0	0,15
1.3	зазор между втулкой и поршнем	24	0,25	1,2	16	0,20	0.95	12	0.18	0.8
1.4	зазор в головном подшипнике	24	0,15	0,3	16	0,10	0,25	12	0,08	0,2
1.5	зазор в замке первого кольца	6	1,5	5,1	4	1,0	4.00	3	0.8	3
1.6	зазор в кепе первого кольца	6	0,06	0,6	4	0,06	0,5	3	0,06	0,25
1.7	износ по высоте первого кольца.	6	0	0,4	4	0	0,35	3	0	0,3
2 Коленчатый вал - подшипники:										
2.1	износ шеек коленчатого вала	48	0	0,15	32	0	0,12	24	0	0,11
2.2	зазор в шатунных подшипниках	12	0,1	0,3	8	0,06	0,25	6	0,05	0,18
2.3	зазор в рамовых подшипниках	12	0,1	0,25	8	0,1	0,22	6	0,05	0,16
3 Крышка цилиндров - клапана										
3.1	зазор между штоком и втулкой	12	0,1	0,3	8	0,05	0,25	6	0,045	0,22
3.2	износ тарелки клапана	12	4	2	8	3	2	6	2,5	2
4 Распредвал и привод газораспределения:										
4.1	зазор в подшипниках вала	24	0,1	0,27	16	0,08	0,20	12	0,03	0,15
4.2	зазор у коромысла клапанов	6	0,07	0,25	4	0,05	0,18	3	0,03	0,15
4.3	зазор в зубьях шестерен привода	24	0,2	0,8	16	0,2	0,6	12	0,2	0,6
4.4	износ кулачков распредвала.	24	0	0,14	16	0	0,12	12	0	0,10

Таблица 10 Распределение работ по видам ТОР

Периодичность ТОР для дизелей			Виды ТОР	Основные диагностируемые узлы	Глубина разборки дизеля
NVD48	NVD36	NVD24			
3	2	1.5	То	Топливная аппаратура, внешние органы газораспределения, фильтры и пр.	Только внешние детали без разборки корпуса
6	4	3	ТО	То + Поршневые кольца, органы газораспределения	ТО1+снятие крышек цилиндров без разборки, подъем поршней без разборки шатунов
12	8	6	ТР	ТО2 + детали крышки цилиндров, рамовые и мотылевые подшипники, детали турбокомпрессора	ТО2+ разборка крышки цилиндров, выкатывание подшипников, топливные насосы, демонтаж и разборка турбокомпрессора
24	16	12	СР	ТР + цилиндрические втулки, поршни и шатуны, распредвал, зубчатые зацепления	ТР + выпрессовка цилиндрических втулок, разборка узлов поршень - шатун и распредвала
48	32	24	КР	СР + коленчатый вал, блок цилиндров и рама, все системы	СР + полная разборка дизеля с демонтажем блока и выемом коленчатого вала

Оценка ремонтного цикла

Ввод исходных данных Ремонтный цикл $T_K := 48$ тыс. ч.

Относительная норма времени ремонта (во сколько раз время капитального ремонта меньше его периодичности) $\eta := 14$ Продолжительность капитального ремонта

Виды ремонта $k := 4$ $j := 1..k$ $n_j := \tau_K(\eta) := \frac{T_K}{\eta}$

Ввести количество ремонтов (по коду)

1
1
2
4

$\tau_K(\eta) = 3.429$

Рисунок 31 Первый фрагмент расчета *K_{тв}*. Исходные данные

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ рассчитывается по формуле (3) (п.1.5) на фрагментах редактора МATHCAD (рис. 32 и 33). Установлено, что $K_{ти} = 0.85$ при отношении времени капитального ремонта к его ресурсу $\eta=14$ и $K_{ти} = 0.9$ при $\eta=22$.

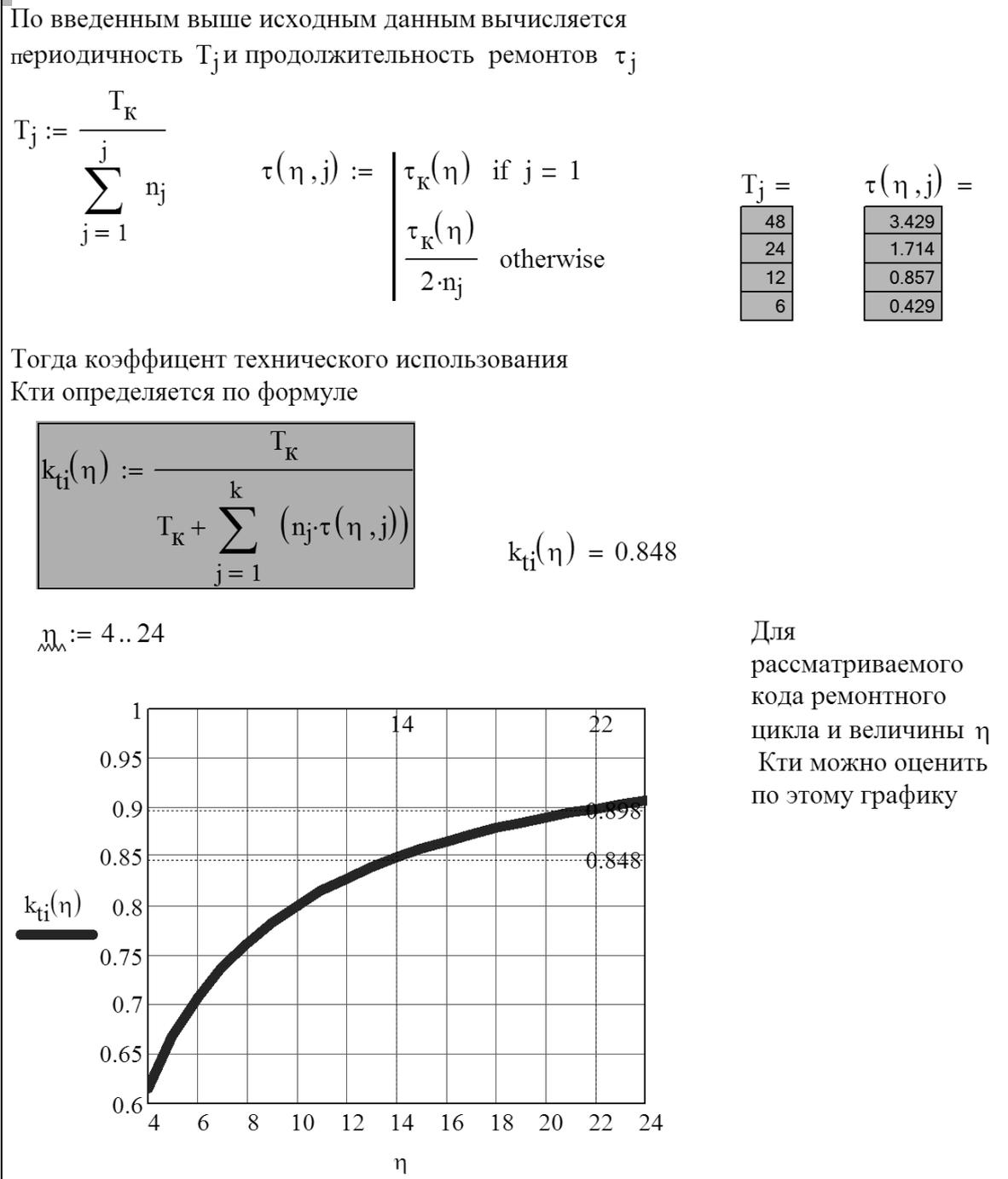


Рисунок 32 Второй фрагмент расчета $K_{ти}$

6.2. Практические занятия ПЗ – 2

Корректировка нормативных ресурсов машины

Задание.

Обосновать право судовладельца корректировать назначенный ресурс 8 тыс. час. рамового подшипника двигателя 8NVD36 до диагностики в текущем ремонте. Задание относится к разделу 2.5.

Порядок выполнения работы в редакторе MATHCAD

Открываем редактор MATHCAD (версия 13) и производим следующие основные действия, показанные на копии фрагментов файла ПЗ.2.xmcd, приведенные на рис.34 – 37

1. Вводим постоянные исходные данные. По общей таблице 1 выбираем ДП 2.3 «зазор рамового подшипника» и выбираем для него требуемый назначенный ресурс 8 тыс.час и нормативы первичного $L0 = 0.1$ мм и предельно-допустимого зазора $LA = 0.22$ мм. Остальные постоянные исходные данные устанавливаются по методике раздела 2.5, как показано на рис. 34.

Постоянные исходные данные					
Объект исследования	рамовый подшипник.				
Диагностический параметр	зазор				
Нормативный ресурс	$Tr := 8$	контрольный	$Tk := 1.25 \cdot Tr$	$Tk = 10$	
Дпустимая ВБР γ при ЗМН Z (1...3)	$Z = 2$		$\gamma := cnorm(Z)$	$\gamma = 0.977$	
Уровни состояния объекта (зазоры, мм)					
$L0 := 0.1$	$LA := 0.22$	$LR := 2 \cdot LA - L0$	$LR = 0.34$	$LB := \frac{LA + LR}{2}$	$LB = 0.28$
Коэффициент для оценки доверительных границ			$Aa := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$		

Рисунок 33. Фрагмент ввода постоянных исходных данных

2. Вводим переменные исходные данные. К ним относятся результаты измерения зазоров (вектор Y) после каждой i – й наработки

подшипников (вектор X). На практике для этого желательно проводить ресурсные стендовые испытания. Для учебных занятий допустимо имитировать эту работу с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ) для одного из 17 распространенных законов распределений (нормального, Вейбулла и пр.), которые имеются в редакторе MATHCAD. В данной задаче применен генератор ГСЧ для равномерного закона распределения $\text{runif}(n, c, d)$. Он характеризуется нижней c и верхней d границей и объемом выборки nn . Эта процедура для векторов X и Y показана на рис. 35. Для вектора наработок подобраны параметры $c = 6$ и $d = 9$, а для вектора зазоров $c = 0.18$ и $d = 0.22$. Объем выборки принят $nn = 20$. Для перехода к задаче оценки ресурсов подшипника на том же фрагменте показан расчет вектора износостойкости JZn , который имеет математическое ожидание JZS , СКО σ_j , минимальное $\min(JZn)$ и максимальное $\max(JZn)$ значение.

Переменные исходные данные

Источник информации

На практике - путем ресурсных испытаний. В учебном процессе с помощью ГСЧ для равномерного распределения

наработка до измерений $X := \text{sort}(\text{runif}(20, 6, 9))$ износ $Y := \text{sort}(\text{runif}(20, 0.18, 0.22)) - L0$

$\max(X) = 8.966$ $\max(Y) = 0.12$ $\min(X) = 6.004$ $\min(Y) = 0.08$

Расчет эмпирической износостойкости

случайный вектор износостойкости $JZn := \text{sort}\left(\frac{X}{Y}\right)$

характеристики вектора объем выборки $nn := \text{rows}(JZn)$ $nn = 20$ $i := 1..nn$

средняя $JZS := \text{mean}(JZn)$ $JZS = 68.074$ ско $\sigma_j := \text{Stdev}(JZn)$ $\sigma_j = 3.324$

$\max(JZn) = 74.793$ $\min(JZn) = 63.564$

Рисунок 34 Фрагмент ввода переменных исходных данных

Обоснование основных функций для решения поставленной задачи об определении допустимого гамма-процентного ресурса (при $Z = 2$) в диапазоне допустимого уровня зазора от $LA = 0.22$ до $LB = 0.28$ приведено на фрагменте рис. 36. В верхней части фрагмента по-

казаны зависимости ресурса от зазора и наоборот с учетом доверительных границ по критерию A_k . Отсюда следует расчет среднего и гамма-процентного ресурса до достижения нормативного и контрольного предельного износа.

Кроме того, фрагмент рис. 36 содержит расчет эмпирического (по формуле (10)) и теоретического распределения ВБР для каждого уровня предельного износа.

Расчет функций ресурса от износа и износа от наработки

Зависимость ресурса от зазора h $Rw(h, k) := (h - L0) \cdot (JZS + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma_j)$

Зависимость зазора от наработки t $Hm(t, k) := \frac{t}{JZS + Aa_k \cdot Z \cdot \sigma_j} + L0$

средние и γ - процентные ресурсы составят при $\gamma = 0.977$ $\gamma_2 := 1 - 2 \cdot (1 - \gamma)$ $\gamma_2 = 0.954$

Для нормативного уровня $LA = 0.22$ средняя $RA := Rw(LA, 2)$ ГПП $Ray := Rw(LA, 1)$

Для контрольного уровня $LB = 0.28$ средняя $RB := Rw(LB, 2)$ ГПП $Rby := Rw(LB, 1)$

Расчет функций распределений при нормальном законе

Эмпирическая ВБР по формуле (10) $P_i := 1 - \frac{i}{nn}$

Расчетная формула при уровне зазора $LA = 0.22$ вектор $X0 := JZn \cdot (LA - L0)$

средняя $RA = 8.169$ СКО $\sigma := \sigma_j \cdot (LA - L0)$

ВБР $PP(X0) := 1 - pnorm(X0, RA, \sigma)$ плотность $f(X0) := dnorm(X0, RA, \sigma)$

Расчетная формула при уровне зазора $LB = 0.28$ вектор $X1 := JZn \cdot (LB - L0)$

средняя $RB = 12.253$ СКО $\sigma_1 := \sigma_j \cdot (LB - L0)$

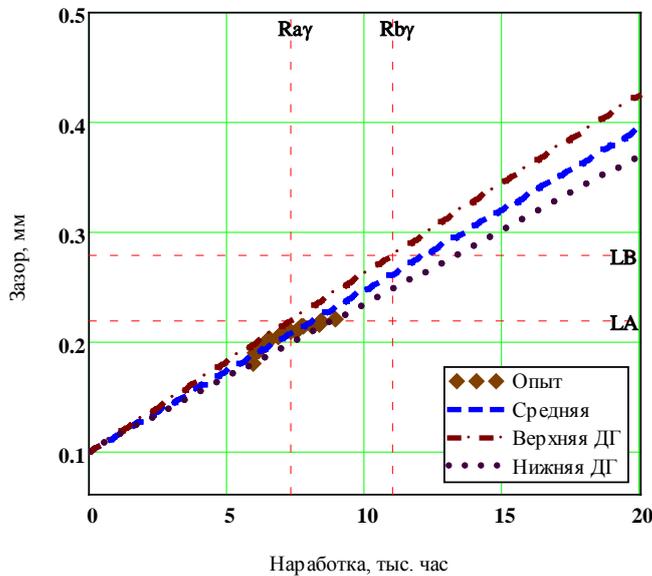
ВБР $PP(X1) := 1 - pnorm(X1, RB, \sigma_1)$ плотность $f1(X0) := dnorm(X1, RB, \sigma_1)$

Рисунок 35 Фрагмент обоснования зависимости ресурса от зазора и функций распределения вероятности

Результаты исследования показаны на фрагменте рис. 37 и в таблице 10. Откуда следует заключение о возможности представления права судовладельцу безопасно корректировать назначенный ресурс подшипника 8 тыс. час в пределах до 11 тыс. час.

РЕЗУЛЬТАТЫ

$$\begin{pmatrix} \text{"LX"} & \text{"k1"} & \text{"средн"} & \text{"k2"} & \text{"ГПР"} \\ \text{LA} & 2 & \text{RA} & 1 & \text{Ray} \\ \text{LB} & 2 & \text{RB} & 1 & \text{Rby} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"LX"} & \text{"k1"} & \text{"средн"} & \text{"k2"} & \text{"ГПР"} \\ 0.22 & 2 & 8.169 & 1 & 7.371 \\ 0.28 & 2 & 12.253 & 1 & 11.057 \end{pmatrix}$$



КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ

$$\text{corr}(Y + L0, Hm(X, 2)) = 0.932$$

$$\text{corr}(Y + L0, X) = 0.932$$

$$\text{corr}(P, Pp(X0)) = 0.976$$

$$\text{corr}(P, Pp(X1)) = 0.976$$

$$\text{corr}(P, X0) = -0.959$$

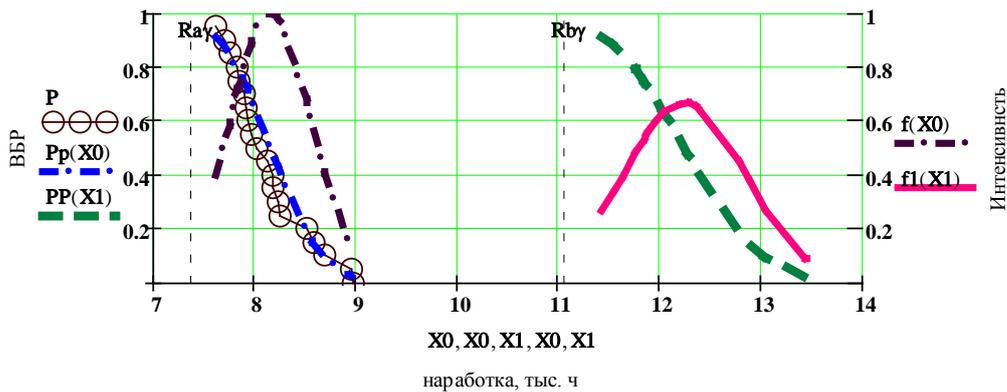


Рисунок 36 Результаты расчетов

Таблица 11

Уровень ДП	A_k при $k=2$	МО	A_k при $k=1$	ГПР при $\gamma = 97.7\%$
LA = 0.22	0	8.169	- 1	7.371
LB = 0.28	0	12.253	- 1	11.057

6.3. Практические занятия ПЗ – 3

Ускоренные ресурсные испытания объекта

Объект исследования - стенд с 30 лампами накаливания, которые соединены параллельно. Причина отказа - усталость нити накала от циклических включений-выключений (нагрев-охлаждение) лампы

Задание. Определить гамма - процентный ресурс лампы (например, при $\gamma = 90\%$) на основании ускоренных ресурсных испытаний (УРИ) указанного объекта для плана испытаний [NUr], когда из n образцов выходят из строя r образцов, а остальные остаются исправными. Исходные данные для выполнения задания рекомендуется принимать по таблице 12.

Таблица 12 Задание

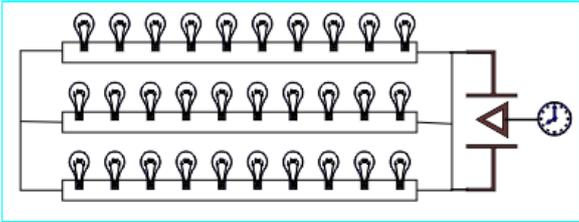
Вариант	по, шт.	г, шт.	Nr, циклы	τ , час	Uo, час	Качество b	γ %,
1.	30	12	1000	0.2	30	5	90
2.	36	12	1200	0.15	30	6	95
3.	20	5	1250	0.2	30	5	80
4.	36	12	1200	0.15	30	4	90
5.	30	15	750	0.2	30	5	90
6.	36	12	1200	0.15	30	6	95
7.	24	18	1000	0.2	30	5	80
8.	26	И	1200	0.15	30	4	90
9.	40	12	1200	0.2	30	5	90
10.	30	17	900	0.15	30	6	95
11.	35	10	1200	0.2	30	5	80
12.	30	12	1100	0.15	30	4	90
13.	36	12	1200	0.2	30	5	90
14.	25	7	1000	0.15	30	6	95
15.	36	13	1200	0.2	30	5	80

Постоянные исходные данные

Задание и постоянные исходные данные для примерного расчета выбраны по первому варианту таблицы 11. Они показаны на рис.

38 на фрагменте программы в редакторе MATHCAD. К ним относятся: назначенный ресурс лампы N_r в циклах, величина цикла испытаний τ в часах, величина рабочего цикла U_0 в часах и др. На указанном фрагменте также рассчитаны вторичные данные: ресурс в часах R_r , время испытаний в часах R_i , базовый коэффициент ускорения ku_1 и др.

Определение показателей цензурированной усеченной выборки по точкам при ускоренных испытаниях



Объект исследования - стенд с 30 лампами накаливания, включенных параллельно.
 Причина отказа - усталость нити накала от циклических включений-выключений (нагрев-охлаждение) лампы

Задание. Определить гамма - процентный ресурс лампы ($\gamma := 90\%$) на основании ускоренных испытаний указанного объекта для плана испытаний $[N, U_r]$, когда из $n_0 := 30$ образцов выходят из строя $r := 12$ образцов, а остальные остаются исправными

Постоянные исходные данные

Назначенный ресурс лампы в циклах $N_r := 1000$, Рабочий цикл $U_0 := 4$ часа, тогда ресурс в часах составит $R_r := N_r \cdot U_0$. Цикл испытаний $\tau := \frac{12}{60}$ часа, тогда время испытаний $R_i := \tau \cdot N_r$, базовый коэффициент ускорения $ku_1 := \frac{R_r}{R_i}$, Фактический коэффициент ускорения $Ku_2 := ku_1 \cdot \frac{n_0}{r}$

итак $ku_1 = 20$ $n_0 = 30$ $R_i = 200$ $Ku_2 = 50$ $r = 12$ $N_r = 1000$
 $U_0 = 4$ $R_r = 4000$ $\tau = 0.2$ $\gamma = 0.9$ $z := \text{qnorm}(\gamma, 0, 1)$ $z = 1.282$

Рисунок 37 Задание и постоянные исходные данные

Переменные исходные данные.

К основным переменным исходным данным относятся вектора наработок до отказа и до цензурирований (фрагмент на рис. 39).

Переменные исходные данные

Для имитации проведения испытаний в условиях обучения для образования вектора выборки наработки до отказа (перегорания нити) допускается применить генератор случайных чисел (ГСЧ) для закона Вейбулла. Для этого необходимо задать не только объем выборки n_0 , но параметр формы этого распределения, который зависит от качества эксплуатации и изготовления ламп. Для примера принимаем этот параметр `качество := 4`

Установите $n_0 = 30$ и $r = 12$ Тогда выборка цензурированных составит `mc := n_0 - r`

Кроме того зададим стандартный параметр формы распределения Вейбулла `ss := 3` и условный запас долговечности узла относительно нормального состояния объекта, а также множитель w

$$K_N := \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{ss} \quad K_N = 2.117 \quad w := R_i \cdot K_N \quad w = 423.452$$

Выражение для образования выборки ГСЧ при законе Вейбулла имеет следующий вид

`x := sort(w-rweibull(n_0, качество))`

Определение эмпирических распределений вероятности безотказной работы (ВБР)

Вектор отказов `i := 1..r` $t_i := x_i$ $t_r = 345.066$

Вектор цензурированных `i0 := 1..mc` $x2 := \max(t)$ $x2 = 345.066$ `t0_i0 := x2`

Автоматически построенный график позволяет получить первое впечатление о выборках отказов и цензурированных.

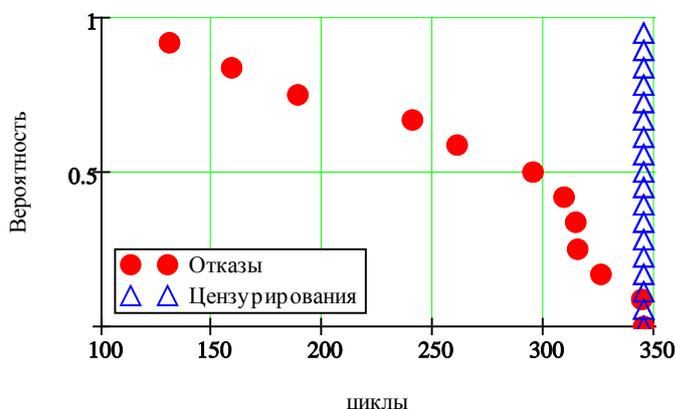


Рисунок 38 Формирование переменных исходных данных

При наработке до отказов выборка формируется ГСЧ, а до цензурированных - вектором с одинаковыми наработками, которые равны

максимальной наработке до последнего отказа. Как показано на втором фрагменте расчетов в редакторе MATHCAD на рис. 39 здесь применен ГСЧ закона Вейбулла. Полученные ранжированные векторы отказов и цензурирований позволяют перейти к расчёту эмпирического распределения вероятности безотказной работы (ВБР) P_i . При этом расчет на фрагменте рис. 40 произведен двумя методами по формулам (10) и (11). Результаты этих расчетов полностью совпали, что подтверждает их равноценность в данном простом случае.

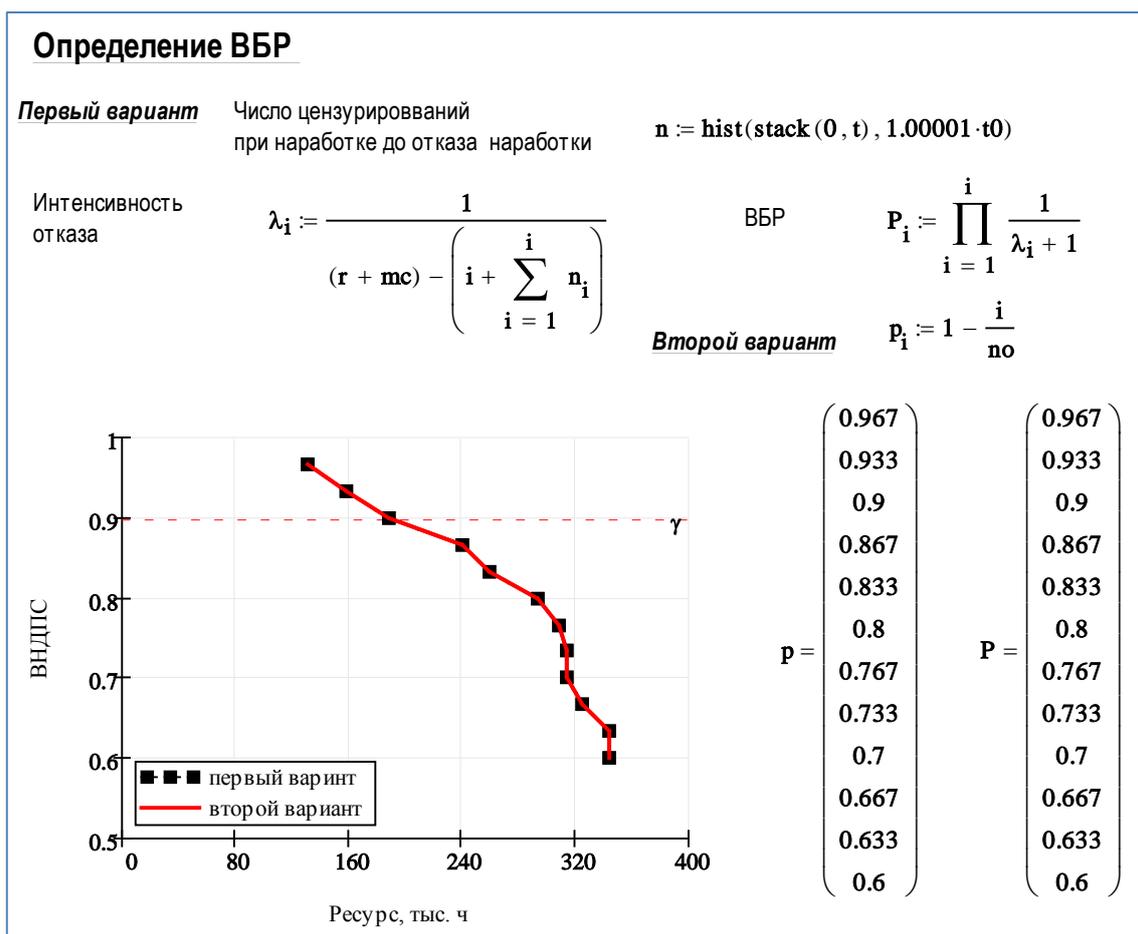


Рисунок 39 Построение эмпирического распределения

Основной целью формирования эмпирического распределения является определение с его помощью параметров адекватного теоретического закона распределения для оценки, в конечном счете, искомого гамма - процентного ресурса.

Расчеты параметров распределений Вейбулла и показателей надежности

1. Методом МНК

$$b_n := \text{if}(P_r = 0, r - 1, r) \quad k := 1 \dots b_n \quad mma := \text{ceil}\left(\frac{t}{r}\right) \quad t3 := 0, \frac{mma}{100} \dots mma$$

Сначала применяем метод наименьших квадратов, с использованием анаморфозы

$$xv_k := \ln(t_k) \quad yv_k := \ln\left(\frac{1}{\ln\left(\frac{1}{P_k}\right)}\right) \quad b_n = 12$$

Коэффициент корреляции в этом случае $rv := \text{corr}(xv, yv) \quad rv = -0.984$

$$sos := \text{line}(xv, yv) \quad sos_1 = 15.59 \quad b2 := -sos_2 \quad a2 := e^{\frac{sos_1}{b2}} \quad b2 = 2.517$$

ВБР	ГПР	Интенсивность	Плотность
$Pv(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{a2}\right)^{b2}\right]$	$Rv(\gamma) := a2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b2}}$	$\lambda v(t) := \frac{b2}{a2} \cdot \left(\frac{t}{a2}\right)^{b2-1}$	$f(t) := Pv(t) \cdot \lambda v(t)$

$Kkv := \text{corr}(P, Pv(t)) \quad Kkv = 0.97$ Коэффициент корреляции

$Rv(\gamma) = 200.092 \quad Rv(0.5) = 422.88 \quad Kkv = 0.97 \quad rv = -0.984$

2. Уточнение методом Minerr Given

Требуемая фгнкция $Pp(t, b2, a2) := \exp\left[-\left(\frac{t}{a2}\right)^{b2}\right] \quad res(b2, a2) := P - Pp(t, b2, a2)$

$0 = res(b2, a2) \quad \begin{pmatrix} b1 \\ a1 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(b2, a2) \quad \begin{pmatrix} b1 \\ a1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.18 \\ 442.549 \end{pmatrix}$ Искомые параметры

$b1 = 3.18 \quad a1 = 442.549$

Вычислене параметров

$Kb := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b1}\right)$	$Kb = 0.895$	$Vv := \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b1}\right) - Kb^2}}{Kb}$	$Vv = 0.345$	$Rvs := a1 \cdot Kb$
---	--------------	--	--------------	----------------------

Искомые функции

ВБР	ГПР	Интенсивность
$PV(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{a1}\right)^{b1}\right]$	$Rv(\gamma) := a1 \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b1}}$	$\lambda v(t) := \frac{b1}{a1} \cdot \left(\frac{t}{a1}\right)^{b1-1}$

Плотность $fV(t) := PV(t) \cdot \lambda v(t)$

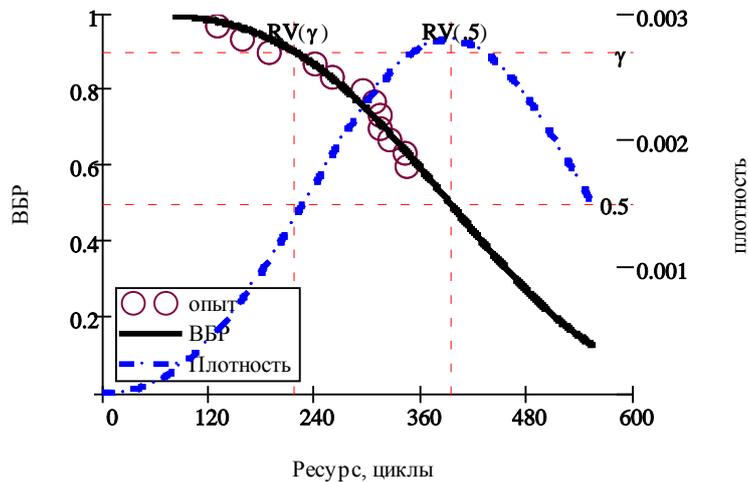
Коэффициент корреляции $KkV := \text{corr}(P, PV(t)) \quad tt := 1 \dots \max(x)$

Рисунок 40 Расчет показателей надежности

$$PEZ := \begin{pmatrix} \text{"Кор"} & \text{"Фрм"} & \text{"Мсш"} & \text{"КВар"} & \text{"Ср"} & \text{"Мед"} & \text{"ГПР"} \\ KkV & b1 & a1 & Vv & Rvs & RV(.5) & RV(\gamma) \end{pmatrix}$$

Результаты

$$PEZ = \begin{pmatrix} \text{"Кор"} & \text{"Фрм"} & \text{"Мсш"} & \text{"КВар"} & \text{"Ср"} & \text{"Мед"} & \text{"ГПР"} \\ 0.98 & 3.18 & 442.55 & 0.34 & 396.25 & 394.37 & 218.09 \end{pmatrix}$$



$$ИТОГ := \begin{pmatrix} \text{"Вид"} & \text{"Средн"} & \text{"Медиана"} & \text{"ГПР"} \\ \text{"Часы УРИ"} & Rvs & RV(0.5) & RV(\gamma) \\ \text{"Часы R"} & ku1 \cdot Rvs & ku1 \cdot RV(0.5) & ku1 \cdot RV(\gamma) \\ \text{"Циклы"} & \frac{Rvs}{\tau} & \frac{RV(0.5)}{\tau} & \frac{RV(\gamma)}{\tau} \\ \text{"Ко"} & \frac{Rvs}{\tau \cdot Nr} & \frac{RV(0.5)}{\tau \cdot Nr} & \frac{RV(\gamma)}{\tau \cdot Nr} \end{pmatrix}$$

$$X := ИТОГ_{5,4}$$

$$X = 1.09$$

$$ИТОГ =$$

	"Вид"	"Средн"	"Медиана"	"ГПР"
"Часы УРИ"		396.25	394.37	218.09
"Часы R"		$7.93 \cdot 10^3$	$7.89 \cdot 10^3$	$4.36 \cdot 10^3$
"Циклы"		$1.98 \cdot 10^3$	$1.97 \cdot 10^3$	$1.09 \cdot 10^3$
"Ко"		1.98	1.97	1.09

$$Оценка := \begin{cases} \text{"плохо"} & \text{if } X < 0.95 \\ \text{"хорошо"} & \text{if } 0.95 \leq X < 1.1 \\ \text{"отлично"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Оценка = \text{"хорошо"}$$

Рисунок 41 Результаты исследования

Этой задаче посвящен фрагмент на рис. 41, где показано обоснование параметров распределения Вейбулла двумя способами: методом наименьших квадратов и на основе оператора Minerr. Результаты расчета параметров этого закона и ресурсов объектов во время испытаний (часы) приведены в таблице 12.

Таблица 13

$K_{корр}$	Закон Вейбулла			Время УРИ		
	b	a	V	R	$R(50\%)$	$R(\gamma\%)$
0.98	3.18	442.55	0.34	396.25	394.37	218.09

Общие результаты исследования приведены на заключительном фрагменте рис. 42, где показан графики эмпирического и теоретического распределения ВБР и плотности вероятности, а также итоговая таблица показателей долговечности исследуемых ламп накаливания. Эти данные также продублированы в таблице 13.

Таблица 14

Показатель	Средняя	Медиана	ГПР
Время УРИ, час	396	394	218
Время работы, час	7930	7981	4360
Циклы	1980	1970	1080
Отношение к норме	1.98	1.97	1.09

Основным критерием надежности исследуемых объектов принято отношение гамма – процентного ресурса в циклах ($RV(\gamma)/\tau$) к его нормативному значению $Nr = 1000$ циклов. Для оценки этой величины составлена небольшая программа «оценка» для сравнения значения X в ячейке 5,4 таблицы (оно оказалось равным 1.09) с обозначенными допустимыми диапазонами. В рассмотренном примере оказалось, что $0.95 < (X= 1.09) < 1.1$. Поэтому была дана хорошая оценка надежности исследуемых ламп накаливания.

6.4. Практические занятия ПЗ – 4

Диагностирование технического состояния элемента машины

Объект и цель испытаний

Это занятие выполняется с целью оценки остаточного ресурса, характеризующего техническое состояние элемента машина (например, рамового подшипника), по результатам периодического измерения его зазора, как основного диагностического параметра (рис. 43).

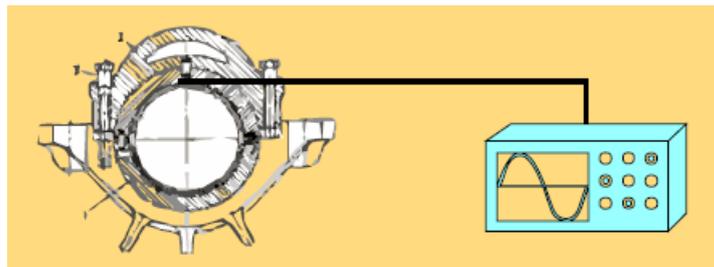


Рисунок 42 Объект исследования: рамовый подшипник с прибором для измерения его зазора

Исходные данные для исследования

Как показано на фрагменте рис. 44 в этом задании к постоянным исходным данным относится предельно допустимый зазор h_d и назначенный ресурс R_n . Переменные данные образуются в виде векторов наработок до измерений t_j (тыс. час.) и результатов измерений h_j (мм) объемом m измерений в диапазоне $j = 0 \dots m - 1$

Содержание исследования

Для расчета фактического и остаточного ресурса необходимо в первую очередь с помощью векторов переменных t_j и h_j установить корреляционные зависимости изменения зазора от наработки $h_x(t)$ и наоборот - $R_{ml}(h)$ с учетом доверительных границ их рассеивания. Последний фактор определяется с учетом квантиля $Z = 1.645$ для соответствующей вероятности $\gamma = 95\%$ и СКО δy_1 по оси y_1 .

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИАГНОСТИКИ		
ПОСТОЯННЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		
ЧИСЛО ЗАМЕРОВ	m = 4	ДОПУСКАЕМЫЙ ЗАЗОР hd := 0.22
НАЗНАЧЕННЫЙ РЕСУРС	Rn := 12	
ПЕРЕМЕННЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		НОМЕРА ЗАМЕРОВ j := 0..m - 1
j =	t1 _j :=	h1 _j :=
0	0	0.1
1	2	0.13
2	5	0.16
3	8	0.18

Рисунок 43 Постоянные и переменные исходные данные для исследования

Решение основной задачи методом наименьших квадратов показано на фрагменте рис. 45. применительно к линейной модели с применением оператора line(x,y) для оценки постоянных A и B уравнения регрессии вида (18). Кроме того, необходимо было рассчитать с помощью соответствующих операторов величины KOR1 := corr(x1,y1), SKOy := Stdev(y1) и $\delta y1 := SKOy \sqrt{1 - KOR1^2}$.

В итоге были обоснованы формулы (32) для решения поставленной задачи

$$\begin{aligned}
 hlx(t) &= A1 + b1 \cdot t + z \begin{bmatrix} -\delta 1 \\ 0 \\ +\delta 1 \end{bmatrix}, \quad a) \\
 Rm1(h) &= \frac{t - A1}{b1} - \frac{z \begin{bmatrix} -\delta 1 \\ 0 \\ +\delta 1 \end{bmatrix}}{b1}. \quad b)
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Полученные зависимости позволили рассчитать средний и 95 - процентный ресурс по формуле (32b), которые характеризуются вектором Rml(hd) для h = hd на фрагменте рис. 45.

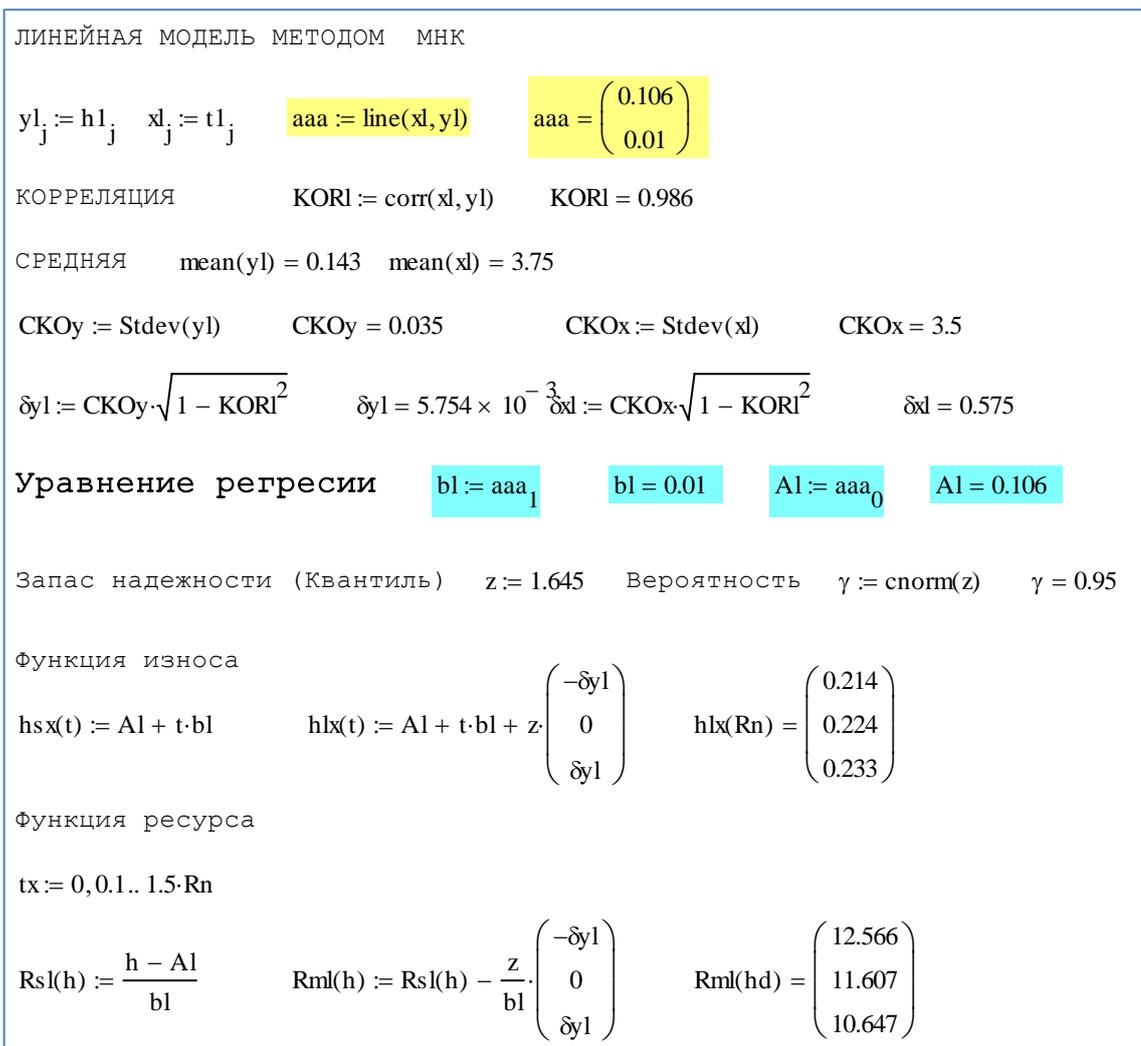


Рисунок 44 Обоснование корреляционных зависимостей между зазором и наработкой подшипника

В данном случае средний ресурс составил 11.607 тыс. час, а 95 – процентный ресурс 10.65 тыс. час, что несколько меньше назначенного ресурса 12 тыс. час. Для проверки допустимости этого расхождения на фрагменте рис. 46 приведена программа с четырьмя ступенями допустимых средних значений $X_d = \text{Rin}(\text{hd})/\text{Rn}$. Она подтвердила допустимость такого расхождения (оценка “good”) и возможность оценить остаточный ресурс в диапазоне от 2.6 до 4.6 тыс. час.

Физическая сущность выполненного исследования иллюстрируется графиком на том же рис. 46.

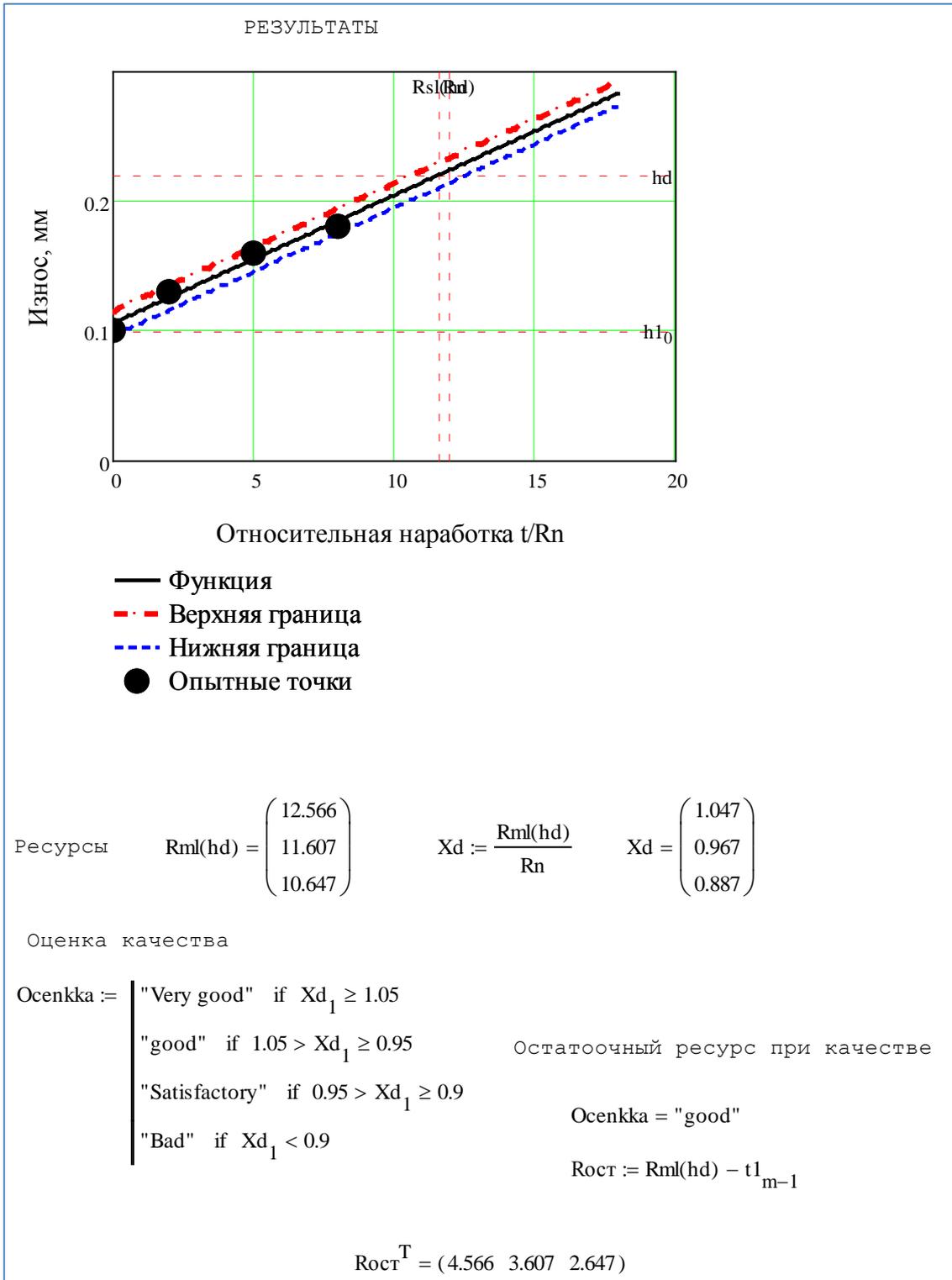


Рисунок 45 Результаты диагностирования подшипника

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

Таблица 15 Тест для раздела «Техническая эксплуатация»

№	Вопрос	Ответ	Тест
1.	Роль машины в коммерческой эксплуатации (в схеме производственного процесса)	Средство труда	да
		Предмет труда	нет
		Субъект труда	нет
2.	Роль машины в технической эксплуатации (в схеме производственного процесса)	Средство труда	нет
		Предмет труда	да
		Субъект труда	нет
3.	Что такое процесс деградации изделия	Повышение качества	нет
		Постепенное снижение качества	да
		Внезапный отказ	нет
4.	Цель выполнения ремонта объекта	Восстановить исправность	нет
		Восстановить работоспособность	да
		Восстановить пригодность	нет
5.	Цель выполнения технического обслуживания объекта	Восстановить исправность	да
		Восстановить работоспособность	нет
		Восстановить пригодность	нет
6.	Характерный процесс деградации узлов трения машины	Усталость поверхности	нет
		Кавитация	нет
		Изнашивание	да
7.	Что такое ремонтный цикл	Наработка до капитального ремонта	да
		Продолжительность ремонтов	нет
		Количество ремонтов	нет
8.	Что такое система ППР	Планово-предупредительные ремонты	да
		Плановый процесс ремонтов	нет
		Принудительный порядок ремонтов	нет
9.	Какой комплексный показатель характеризует общую надежность машины	Стоимость ТОР	нет
		Коэффициент технического использования	да
		Коэффициент готовности	нет

Продолжение таблицы 15.

№	Вопрос	Ответ	Тест
10.	Что такое ремонт по состоянию	Ремонт в зависимости от его стоимости	нет
		Ремонт при возникновении отказа	да
		Ремонт по усмотрению заказчика	нет
11.	От надежности какой детали двигателя зависит капитальный ремонт	Топливный насос	нет
		Распределительный вал	нет
		Коленчатый вал	да
12.	От надежности какой детали двигателя зависит средний ремонт	Цилиндровая втулка	да
		Коленчатый вал	нет
		Подшипники	нет
13.	От надежности какой детали двигателя зависит текущий ремонт	Цилиндровая втулка	нет
		Коленчатый вал	нет
		Подшипники	да
14.	К какому элементу производственного процесса относятся документы на ремонт	Труд	нет
		Средство труда	да
		Предмет труда	нет

Таблица 16 Тест для раздела «Эксплуатационная надежность»

№	Вопрос	Ответ	Тест
1.	Что такое отказ и повреждение	Событие	да
		Состояние	нет
		Свойство	нет
2.	Последствия отказа	Потеря исправности	нет
		Потеря работоспособности	да
		Потеря ремонтпригодности	нет
3.	Последствия повреждения	Потеря исправности	да
		Потеря работоспособности	нет
		Потеря ремонтпригодности	нет

Продолжение таблицы 16.

№	Вопрос	Ответ	Тест
4.	Что такое ресурс объекта	Наработка до поломки	нет
		Наработка до предельного состояния	да
		Время до отказа	нет
5.	Единицы измерения срока службы	Календарное время эксплуатации	да
		Наработка без учета простоев	нет
		Объем выполненной работы	нет
6.	Единицы измерения ресурса	Календарное время эксплуатации	нет
		Наработка с учетом простоев	нет
		Объем выполненной работы	да
7.	Что такое ВБР	Вероятность большого ремонта	нет
		Вероятность безотказной работы	да
		Вероятность большого риска	нет
8.	Размерность износостойкости	Отношение времени износа к износу	да
		Отношение износа ко его времени	нет
		Время износа	нет
9.	Как зависит интенсивность отказов λ от наработки на отказ t_o	$\lambda = 1/t_o$	да
		$\lambda = \sqrt{t_o}$	нет
		$\lambda = 1/t_o^2$	нет
10.	Формула для ВБР при постоянной интенсивности отказов $\lambda = const$	$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)$	нет
		$P(t) = \exp(\lambda t)$	нет
		$P(t) = \exp(-\lambda t)$	да
11.	К какой подгруппе надежности относится гамма-процентный ресурс	Безотказности	нет
		Ремонтопригодности	нет
		Долговечности	да
12.	Что означает в Законе Вейбулла показатель b $P(t) = \exp\left[-(t/a)^b\right]$	Параметр масштаба	нет
		Параметр формы	да
		Параметр смещения	нет

Продолжение таблицы 16.

№	Вопрос	Ответ	Тест
13.	Что означает в Законе Вейбулла показатель a $P(t) = \exp[-(t/a)^b]$	Параметр масштаба	да
		Параметр формы	нет
		Параметр смещения	нет
14.	От какого статистического параметра выборки зависит параметр b закона Вейбулла	Средней величины	нет
		Дисперсии	нет
		Коэффициента вариации	да
15.	Что такое выборка ряда случайных величин (СВ)	Совокупность ограниченного числа СВ	да
		Количество СВ	нет
		Набор СВ	нет
16.	Что такое медианный ресурс	Средняя величина ресурса	нет
		Ресурс при вероятности 50%	да
		Ресурс при вероятности 100%	нет
17.	К какой подгруппе надежности относится среднее время восстановления	Безотказности	нет
		Ремонтопригодности	да
		Долговечности	нет
18.	Прибор для измерения износа цилиндрической втулки	Нутромер	да
		Виброметр	нет
19.	Для какого участка диаграммы изнашивания узла трения применяется модель типа «Веер»	На участке приработки	нет
		На участке постоянной работы	да
		На участке форсированного износа	нет
20.	Как называется нормативный ресурс сложной машины по ГОСТ	Назначенный	да
		Установленный	нет
		Общий	нет
21.	Как определить назначенный ресурс машины по данным о гамма-процентных ресурсах (ГПР) ее элементов	По средней величине ГПР	нет
		По минимальному ГПР	да
		По произведению ВБР	нет
22.	Какой закон распределения лучше описывает процесс изнашивание	Нормальный	нет
		Логнормальный	нет
		Релея	да

Продолжение таблицы 16.

№	Вопрос	Ответ	Тест
23.	У какого закона распределения имеется линейная зависимость интенсивности отказов от времени	Нормального	нет
		Релея	да
		Логнормального	нет
24.	Допустимая вероятность γ для оценки ГПР процесса изнашивания узла трения	50%	нет
		95%	нет
		80%	да
25.	Допустимая вероятность γ для оценки ГБР процесса усталостного разрушения детали	50%	нет
		95%	да
		80%	нет
26.	Какой закон распределения применяется при ресурсных испытаниях на усталость	Нормальный	нет
		Логнормальный	да
		Вейбулла	нет
27.	Основной ГОСТ о терминах и определениях по надежности	ГОСТ 26885-86	нет
		ГОСТ 27.002-89	да
		ГОСТ 27.003-90	нет
28.	Что надо знать кроме наработки на отказ для расчета коэффициента готовности	Трудоемкость восстановления	нет
		Время восстановления	да
		Стоимость восстановления	нет
	Основной комплексный показатель надежности	Коэффициент технического использования	да
		Коэффициент готовности	нет

Таблица 17. Тест для раздела «Ресурсные испытания!»

№	Вопрос	Ответ	Тест
1.	Условия проведения ресурсных испытаний	При эксплуатации	нет
		На стенде	да
		При ремонте	нет
2.	Что такое коэффициент ускорение испытаний	Отношение продолжительности работы и испытаний при одинаковой вероятности	да
		Отношение трудоемкости эксплуатации и испытаний	нет
		Отношение сроков измерений при работе и испытаниях	нет
3.	Какой цикл применяется при УРИ стиральной машины	Стиральный цикл	да
		Отжимной цикл	нет
		Загрузочный цикл	нет
4.	Какой цикл применяется при УРИ авиационной техники	Предполетный цикл	нет
		Взлетно-посадочный цикл	нет
		Полетный цикл	да
5.	Какие колебания применяют при высокочастотных испытаниях	Вынужденные	нет
		Резонансные	да
		Околорезонансные	нет
6.	Что изучают при параметрических испытаниях	Наработки до отказов	нет
		Тренд диагностического параметра	да
		Точность измерений	нет
7.	Что изучают при цензурированных испытаниях	Наработки до отказов	да
		Тренд диагностического параметра	нет
		Точность измерений	нет
8.	Для какого участка диаграммы изнашивания узла трения применяется модель типа «Веер»	На участке приработки	нет
		На участке постоянной работы	да
		На участие форсированного износа	нет

Продолжение таблицы 17.

№	Вопрос	Ответ	Тест
9.	С какой целью проводят ресурсные испытания	Оценка срока службы	да
		Оценка трудоемкости испытаний	нет
		Оценка достоверности испытаний	нет
10.	Цель метода равных вероятностей при ресурсных испытаниях	Оценка ресурса при увеличенной нагрузке	да
		Оценка ресурса при повышенной частоте	нет
		Оценка срока службы при низкой частоте	нет
11.	Какой закон распределения поучил наибольшее применение при ресурсных испытаниях	Нормальный	нет
		Логнормальный	нет
		Вейбулла	да
12.	У какого закона распределения имеется линейная зависимость интенсивности отказов от времени	Нормального	нет
		Релея	да
		Логнормального	нет
13.	Допустимая вероятность γ для оценки ГПР процесса изнашивания узла трения	50%	нет
		95%	нет
		80%	да
14.	Допустимая вероятность γ для оценки ГБР процесса усталостного разрушения детали	50%	нет
		95%	да
		80%	нет
15.	Какое время применяется для понятия о цензурировании	Известное время работы до отказа	нет
		Известное время работы без отказа	да
		Общее время испытаний	нет

Таблица 18. Тест для раздела «Техническая диагностика»

№	Вопрос	Ответ	Тест
1.	К какой подгруппе надежности относится среднее время восстановления	Безотказности	нет
		Ремонтопригодности	да
		Долговечности	нет
2.	Главная цель технической диагностики	Оценка технического состояния	да
		Выявление причин отказа	нет
		Измерение параметров	нет
3.	Чем техническая диагностика отличается от дефектации	Выполняется без разборки машины	да
		Измеряются износы деталей	нет
		Выполняется с разборкой машины	нет
4.	Когда определяется остаточный ресурс объекта	При ремонте	нет
		При работе машины	нет
		При диагностировании	да
5.	Как еще называется закон распределения Гаусса	Равномерный	нет
		Нормальный	да
		Экспоненциальный	нет
6.	У какого вида ремонта максимальная трудоемкость работ	текущего	нет
		капитального	да
		среднего	нет
7.	Какой прибор применяется для контроля компрессии цилиндра двигателя	Пневмоиндикатор	да
		Нутромер	нет
		Виброметр	нет
8.	Для какого участка диаграммы изнашивания узла трения применяется модель типа «Веер»	На участке приработки	нет
		На участке постоянной работы	да
		На участке форсированного износа	нет
9.	Как называется нормативный ресурс сложной машины по ГОСТ	Назначенный	да
		Установленный	нет
		Общий	нет

Продолжение таблицы 18.

№	Вопрос	Ответ	Тест
10.	Как определить назначенный ресурс машины по данным о гамма-процентных ресурсах (ГПР) ее элементов	По средней величине ГПР	нет
		По минимальному ГПР	да
		По производству ВБР	нет
11.	Какой закон распределения наилучшим образом описывает процесс изнашивания	Нормальный	нет
		Логнормальный	нет
		Релея	да
12.	У какого закона распределения имеется линейная зависимость интенсивности отказов от времени	Нормального	нет
		Релея	да
		Логнормального	нет
13.	Допустимая вероятность γ для оценки ГПР процесса изнашивания узла трения	50%	нет
		95%	нет
		80%	да
14.	Допустимая вероятность γ для оценки ГБР процесса усталостного разрушения детали	50%	нет
		95%	да
		80%	нет
15.	Какой закон распределения применяется при ресурсных испытаниях на усталость	Нормальный	нет
		Логнормальный	да
		Вейбулла	нет
16.	Основной ГОСТ о терминах и определениях по диагностике	ГОСТ 20911-89	да
		ГОСТ 27.002-89	нет
		ГОСТ 27.003-90	нет
17.	Что надо знать кроме наработки на отказ для расчета коэффициента готовности	Трудоемкость восстановления	нет
		Время восстановления	да
		Стоимость восстановления	нет
18.	Какой комплексный показатель характеризует общую надежность объекта	Стоимость ТОР	нет
		Коэффициент технического использования	да
		Коэффициент готовности	нет

Ефремов Леонид Владимирович,
Скотникова Маргарита Александровна

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ
ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Подписано в печать ____ 2016. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная
Усл. печ. л. ____ . Уч.-изд. л. ____ . Тираж 130. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами
в цифровом типографском центре Издательства Политехнического
университета:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел. (812) 540-40-14

Тел./факс: (812) 927-57-76