

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Л.В. ЕФРЕМОВ

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Санкт-Петербург
"ART-XPRESS"

2014

УДК 629.02:06–192

ББК 39.45

Е92

Ефремов Л.В. Вероятностные проблемы ресурсных испытаний.

– СПб.: Art-Xpress, 2014. – 160 с.

В монографии рассмотрен и решен ряд проблем вероятностной оценки показателей долговечности техники различного назначения путем проведения нормальных и ускоренных ресурсных испытаний, Особое внимание уделено цензурированным и параметрическим моделям деградации и отказов изделий, а также алгоритмам расчета этих показателей в математических средах Mathcad и EXCEL.

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

Efremov L.V. Probabilistic problems of the endurance test - St. Petersburg.

Art-Xpress, 2014. — 160 p.

The monograph discussed and solved a number of problems probabilistic assessment of indicators of longevity techniques for various purposes through the normal and accelerated life tests , special attention is given censored and parametric models of degradation and failure of the product, as well as algorithms for calculating these indicators in mathematical environments Mathcad and EXCEL.

For employees of academic and industrial research institutes, design offices, testing laboratories and industrial professionals, educators and students of technical universities.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.Ш. Сулабаридзе,

д-р техн. наук, проф. Ю.А. Фадин

Монография рекомендована к опубликованию решением Ученого Совета института проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН) от 25 февраля 2014 года (Протокол 1/14).

ISBN 978-5-4391-0097-2

© Л. В. Ефремов, 2014

© ИПМаш РАН, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Показатели долговечности относятся к основным характеристикам качества любой продукции. В законе о защите прав потребителей таким показателем является срок службы товара длительного пользования, который рассматривается как период, по истечении которого он может представлять опасность для жизни, здоровья потребителя, причинять вред его имуществу или окружающей среде. К аналогичным показателям относятся назначенные ресурсы или сроки службы до ремонта машин различных видов. В метрологии ту же роль играют так называемые межповерочные интервалы (МПИ) приборов.

Обоснование этих нормативных показателей при создании изделий многих типов обычно требует проведения специальных испытаний, которые называются ресурсными (нормальными или ускоренными). Опыт их выполнения выявил ряд проблем, которые связаны с вероятностной природой исследуемых процессов деградации изделий. Поэтому в основу книги положена концепция планирования, проведения и обработки результатов параметрических и цензурированных испытаний с целью оценки гамма – процентных ресурсов при обосновании нормативных показателей долговечности изделий.

Основная идея создания этого труда состоит в разработке эффективных методов и алгоритмов нормальных и ускоренных ресурсных испытаний (РИ) в математическом редакторе Mathcad и электронных таблицах EXCEL, которые включены в две последние главы книги. Для обоснования актуальности и работоспособности предлагаемых методов ресурсных испытаний, в первой главе показаны примеры их проведения в разных отраслях промышленности. Затем, во второй и третьей главах показаны вероятностные характеристики и проблемы, которые связаны с созданием методического и программного обеспечения испытаний. Это позволило выполнить классификацию РИ в четвертой главе и перейти к примерам решения поставленных задач в пятой и шестой главах. Можно выразить надежду, что такое построение книги облегчит ее полезное использование, например, в качестве учебного пособия студентами технических Вузов.

В основу монографии положены результаты научных исследований автора в институте проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) при активном участии творческого коллектива Мурманского ГТУ в составе профессора. Боевой Л.С., доцента Сергеева К.О, аспирантов Кумовой Ж.В., Куприянова М.В. и др.

Выражается благодарность рецензентам этой монографии д-ру техн. наук, проф. Фадину Ю. А. и д-ру техн. наук, проф. Сулабаридзе В.Ш., критические замечания которых были с благодарностью приняты и учтены автором перед сдачей рукописи в печать.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВБР	вероятность безотказной работы
ВЛ	вероятностная логика
ВНПС	вероятность не-достижения предельного состояния
ГПР	гамма процентный ресурс
ГТД	газотурбинный двигатель
ГТУ	государственный технический университет
ДП	диагностический параметр
ЗМН	запас метрологической надежности
ИПМаш РАН	институт проблем машиноведения РАН
КУ	коэффициент ускорения
МО	математическое ожидание
МП	параметрическая модель
МПИ	межповерочный интервал
НИР	научно-исследовательская работа
ОКП	объект конечного применения
ПД	процесс деградации
ПДДП	предельно допустимый диагностический параметр
ППП	предел погрешности прибора
ППР	стратегия планово-предупредительных ремонтов
ППО	стратегия планово-предупредительных осмотров
ПЦ	полетный цикл
РИ	ресурсные испытания
СЗЧ	сменно запасная часть
СИ	средство измерения
СиП	систематическая погрешность
СКО	(или сигма) среднее квадратическое отклонение
СУ	силовая установка
ТО	техническое обслуживание
ТОР	система технического обслуживания и ремонта
УРИ	ускоренные ресурсные испытания
ХПД	характеристика процесса деградации
ШЦ	штангенциркуль
ЦАГИ	центральный аэрогидродинамический институт
ЦМ	цензурированная модель

1. Обзорная информация о ресурсных испытаниях техники

Для начала хотя бы кратко рассмотрим некоторые примеры ресурсных испытаний различной и разнообразной техники. На основании этой информации можно более четко сформулировать цели ресурсных испытаний (РИ) с учетом ряда непростых проблем, которые следует решать с учетом вероятностной природы процессов деградации (ПД) и отказов при эксплуатации машин и приборов.

1.1. Испытания деталей и узлов

1.1.1. Оценка долговечности подшипников качения

Классическим примером результативности РИ является создание стандартизированной методики расчета динамической грузоподъемности и ресурса подшипников качения (рис. 1-1), в основе которого лежит расчет 90 – процентного ресурса подшипника [17], как числа циклов (оборотов) до появления первых признаков усталости металла колец или тел вращения с вероятностью 90%



Рисунок 1-1. Подшипник качения

Учитывая массовое производство подшипников, такие испытания могли выполняться с использованием цензурированных и параметрических моделей для больших выборок образцов. Поскольку для расчета ресурса использована степенная функция с нулевой асимптотой типа (1-1), то, цель испытаний заключалась в определении ее параметров C_r и m .

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{G_E} \right)^m \quad (1-1)$$

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).

Для постоянной C_r обоснованы зависимости от качества материала подшипника, количества и размеров шариков. Разработка такого стандарта является выдающимся достижением инженерной науки о надежности техники и скорее всего в повторном исследовании такого масштаба необходимости не имеется. Тем не менее, это изделие будет использовано при демонстрации методи-

ки в разделе 5.5, как условный пример испытаний большой группы однотипных изделий.

1.1.2. Ускоренные ресурсные испытания трубопроводной арматуры

Удачным примером проведения ускоренных ресурсных испытаний (УРИ) является методика испытаний трубопроводной арматуры на примере латунного пробкового крана (рис. 1-2) по правилам ОСТ [45].

В этом стандарте отмечено, что причиной истощения ресурса данного изделия является процесс изнашивания узла «коническая пробка - корпус». Для измерения износа рекомендовано применять метод искусственных баз [19]. При этом процесс деградации может быть представлен линейной функцией на всём интервале наработки от начала установившегося процесса после приработки до достижения предельного износа 130 мкм.

В описании объекта отмечено, что рабочей средой является топливный газ с указанными допустимыми характеристиками. Указана средняя частота срабатывания $\omega_s \approx 0.1$ цикла/час = 2.4 цикла/сутки.



Рисунок 1-2. Кран пробковый латунный

Показателями долговечности этого невосстанавливаемого являются: назначенный срок службы до списания не менее 10 лет, назначенный ресурс до списания – не менее 10000 циклов при вероятности безотказной работы 0.8. Испытание крана проводится на стенде «Фреон-12» и использованием воздуха в качестве испытательной среды (с давлением 0.1 кгс/см² при температуре 20 °С). Измерение износа должно выполняться периодически через заданное число циклов. Один цикл представляет собой одну операцию «открыто-закрыто» путем поворота штурвала. На первом участке (приработка) – через 100 циклов, а затем в диапазоне от 100 до 4100 циклов – через каждые 1000 циклов. После каждого такого сеанса выполнялись измерения лунок, которые были вырезаны в 42 точках на конусе пробки (см рис. 5-2).

Ускорение испытаний данного изделия 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 режима достигается за счёт учащения циклов «открыто-закрыто» до частоты 30 цикл/час.

Концепция определения ресурса по графику «износ – наработка в циклах» изложена в этом стандарте вполне грамотно. Однако примененная там методи-

ка оценки ресурса по результатам измерения изложена не достаточно четко и внятно относительно оценки дисперсии и доверительных границ. На современном этапе развития методов эту задачу предложено решить более корректно, что и будет показано далее в разделе 5.2 книги.

1.2. Испытания в автомобилестроении

1.2.1. Общие правила

В известном учебнике о прочности и долговечности автомобилей [11] приведен ряд инженерных методов расчета гамма – процентных ресурсов основных элементов машин по критерию усталостных разрушений (рис. 1-3) с применением, например, логнормального распределения для той же самой степенной функции с нулевой асимптотой (1-1). При этом показатель степени может изменяться для конкретных деталей от 2 до 10, что было обосновано путем проведения специальных уникальных экспериментальных исследований.

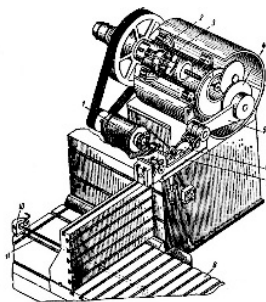


Рисунок 1-3. Стенд для испытания деталей на усталость

Большое внимание уделено оценке износостойкости узлов трения в машине. Рассмотрены методы и средства стендовых испытаний деталей и узлов машин на усталость и износ. Показано, что на нагрузочный режим, определяющий долговечность того или иного агрегата автомобиля, влияют особенности эксплуатации. К ним относятся дорожные условия (категория автомобильных дорог, улицы городов, виды бездорожья и проч.); характер перевозок (массовые, порционные, мелкие); климатические зоны (умеренная, жаркая сухая, с большой влажностью, зона низких температур); тип автомобиля по назначению (легковой, грузовой, универсальный и специализированный, городской и междугородный автобусы) и по проходимости (дорожный, повышенной и высокой проходимости).

1.2.2. Ускоренные испытания современного автомобиля

В условиях рыночной экономики и жесткой конкуренции новые легковые машины разных фирм проходят ускоренные ресурсные испытания на форсированных режимах с тройным коэффициентом ускорения (рис. 1-4).

Так в статье журнала «Авторевию» [37] дается интересная информация о РИ машины Volkswagen Polo в течение 32 тысячи километров за несколько месяцев, которые моделируют 100-тысячный пробег.



Рисунок 1-4. Автомобиль на испытаниях

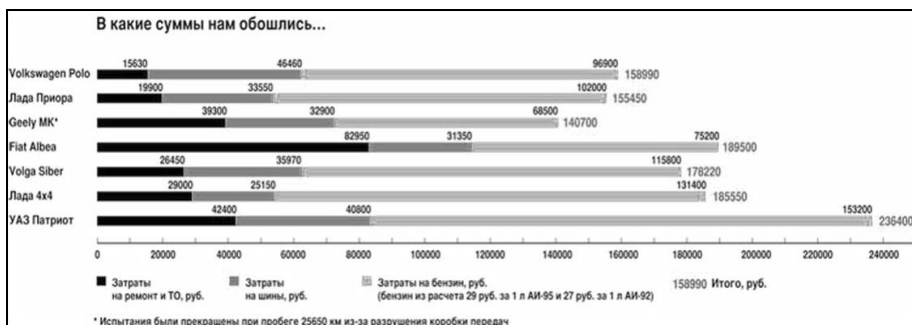


Рисунок 1-5. Копия информации о затратах на форсированную эксплуатацию машин разных марок по данным [37]

Тысячи литров бензина, сожженные на скоростных, «горных», булыжных и грунтовых дорогах, шестьдесят часов единоборства с коррозией в соляном тумане, запуски моторов в «холодильнике», тысячекратное поднятие и опускание стекол, хлопанье дверями, капотами и крышками багажников, раскладывание сидений... А в финале — удар о жесткий барьер на скорости 15 км/ч, имитирующий типичную городскую аварию.

Критерием качества служили составляющие эксплуатационных затрат по статьям расхода (рис. 1-5) и описание дефектов по этапам испытаний в сравнении с другими марками машин с учетом мнения опытных водителей. Наиболее жесткие условия создавались при скоростном движении на дороге с булыжным покрытием. Эти данные имеют рекламное назначение.

1.3. Испытания авиационной и космической техники

1.3.1. Общие данные

Порядок организации и проведения работ при установлении (изменении) ресурсов и (или) сроков службы воздушных судов Российской Федерации определяется рядом руководящих документов [8].



Рисунок 1-6. Статические испытания "Сухой Супер Джет-100" в ЦАГИ

В частности, 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. Способность конструкции противостоять повторяющимся нагрузкам оценивается по результатам ресурсных испытаний.

Разновидностью РИ являются усталостные испытания под воздействием совокупности низкочастотных (до 1 Гц) и высокочастотных (до 50 Гц) нагрузок, эквивалентных нагрузкам типовой эксплуатации. Низкочастотные нагрузки воспроизводят повторно-статическим способом, высокочастотные — путём возбуждения резонансных колебаний конструкции на собственных частотах. Завершающий этап разработки нового, модернизированного или модифициро-

ванного летательного аппарата — лётные испытания полностью укомплектованного летательного аппарата. В России имеются лаборатории, которые оснащены самым современным приборным и программным обеспечением для испытаний самолетов (рис. 1-6). К ним относится ЦАГИ - Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского.

1.3.2. Ускоренные испытания авиационных энергетических установок

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, как правило — часового. Затем в течение всего периода эксплуатации по мере проведения ресурсных испытаний ресурс периодически увеличивается. Такой подход известен как стратегия № 1 управления ресурсом. В современном понимании эксплуатации по техническому состоянию ресурс увеличивается по результатам большего объема эксплуатационной информации о ресурсах основных деталей, определяемых путем циклических испытаний на стендах поузловой доводки вне двигателя (стратегия № 2) или расчетами на базе развитого банка данных по механическим свойствам материалов деталей (стратегия № 3).

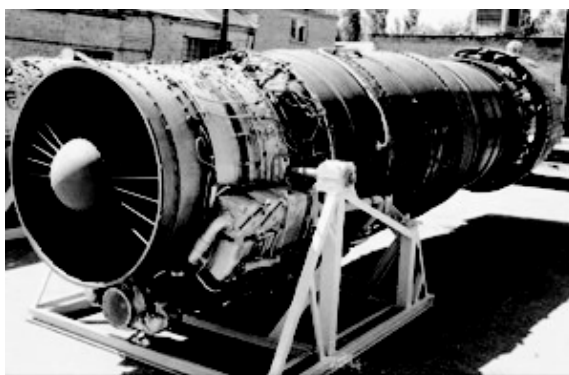


Рисунок 1-7. Турбореактивный двигатель

Типовой ПЦ двигателя включает в себя установившиеся и переменные режимы — запуск на земле перед полетом, полет, посадка и руление (до выключения двигателя). Исходными данными для тепловых и прочностных расчетов деталей и узлов являются режимы ПЦ.

В качестве примера в [9] приведены требуемые показатели ресурса типового турбореактивного двигателя пятого поколения (рис. 1-7) для перспективного самолета с длительностью обобщенного ПЦ 2,5 часа.

На этапе развитой эксплуатации планируется: ресурс основных деталей «холодной» части двигателя более 30000 ПЦ (75000 час); ресурс основных деталей «горячей» части двигателя более 15000 ПЦ (37500 час); календарный срок службы в пределах ресурса основных деталей «холодной» части двигателя

более 25 лет. К началу эксплуатации нового ГТД, подтвержденные эквивалентно — циклическими испытаниями ресурсы составили: основных деталей «холодной» части двигателя более 7500 ПЦ (18750 час); основных деталей «горячей» части двигателя >5000 ПЦ (12500 час).

В статье Уфимского государственного авиационного технического университета [10] приводится обстоятельный анализ ускоренных ресурсных испытаний ГТД и энергетических установок в зависимости от вида их нагружения, особенностей компоновки на объекте и условий его эксплуатации. Дается подробное описание надежности различных элементов энергетических установок в зависимости от области их применения, их характерные отказы и конструктивные недостатки. Перечисленные в статье факторы существенно усложняют задачу выбора объема, режимов и длительности ускоренных ресурсных испытаний ГТД и установок. В статье рассмотрено шесть вариантов организации РИ, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы. В заключение статьи ее авторы отмечают, что разнообразие условий применения изделий в существенной мере ограничивает возможность проверки надежности и ресурса изделий в стендовых испытаниях. Существующие методы ускоренных ресурсных испытаний, ориентированные на обеспечение эквивалентности испытаний типовому эксплуатационному режиму, не учитывают многовариантности применения изделий, что естественно снижает достоверность оценки их надежности и ресурса. Исходя из цели экономии материальных и временных затрат на проведение испытаний целесообразным является совмещение эксплуатационных программ ресурсных испытаний при меньшем числе программ ускоренных испытаний.

1.3.3. Ускоренные ресурсные испытания прецизионного редуктора

Работа ОАО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) [57] проводилась в процессе создания прецизионного редуктора с высокой долговечностью, как элемента электромеханических исполнительных органов систем ориентации космических аппаратов.

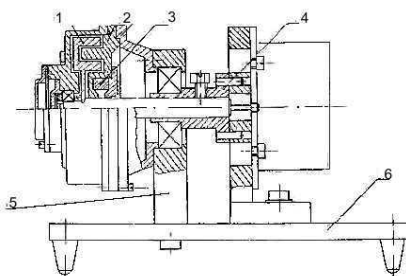


Рисунок 1-8 Стенд для испытания редуктора и нагрузочного устройства. 1 - ротор демпфера; 2 - корпус демпфера; 3 – магнитное уплотнение, состоящее из постоянного магнита, магнито проводящего контура и магнитной жидкости в зазоре между корпусом и ротором; 4 - муфта, для стыковки с выходным валом редуктора; 5 -стойка; 6 -плита.

Он должен удовлетворять ряду требований: малая инерционность кинематической цепи (не более $2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$), максимальный момент трогания (не более $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}$), погрешность перемещений и мертвый ход выходного звена (не более 3 угл. сек.) и ресурс не менее 10^5 час. Выбор форсированного воздействия был связан с изменением мёртвого хода вследствие износа и заключался в повышении момента нагрузки и частоты вращения входного вала передачи. Сравнительным параметром оценки долговечности принято количество оборотов (циклов) входного вала за период эксплуатации, равный $5,5 \cdot 10^9$

Наработка редуктора на ресурс проводилась на стенде (рис. 1-8), в состав которого входит нагрузочное устройство, представляющее собой жидкостный демпфер кругового вращения с магнитным уплотнением. Внутренняя полость демпфера заполнена высоковязкой жидкостью типа ПМС (полиметилсилоксан). При этом нагрузка изменялась за счет увеличения вязкости этой жидкости. Создаваемый демпфером момент пропорционален угловой скорости ротора.

Максимально достигнутые значения момента нагрузки составили $150 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а скорость вращения входного вала - 6000 об/мин . Информации об общем коэффициенте ускорения не приводится, но видимо он составляет порядка 900. В период испытаний проводились измерения параметров различных узлов, которые не вышли за допустимые пределы.

Таблица 1-1

Параметры	Требования	Опыт
Погрешность перемещения выходного вала за один шаг двигателя, угл. сек.	2	1
Мертвый ход выходного вала	2	1
Момент трогания, Нм	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Податливость, угл. Мин/Нм	0.6	0.53
Момент нагрузки, Нм	0.6	150
Частота вращения входного вала, об/мин	1000	6000

На этом основании было сделано заключение о том, что ускоренные испытания позволили существенно сократить сроки разработки прецизионного редуктора для космического аппарата. Результаты эксплуатации космических аппаратов подтвердили достоверность выбора и обоснования факторов, повышающих интенсивность воздействий на рабочие поверхности передач редуктора. Данные, полученные при этих исследованиях, позволили выбрать передачи, обеспечивающие заданные параметры, и создать конструкцию прецизионного редуктора повышенной долговечности (табл. 1-1).

1.4. Ускоренные испытания бытовой техники

Поучительным примером УРИ можно считать испытания стиральных машин на предприятии «Ростест-Москва» [4]. При испытаниях с целью оценки ресурса, 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-четырёх стирок в неделю, для назначенного изготовителем сро-

ка службы 10 лет ресурс машины был принят равным 1840 стиральных циклов. Тогда лабораторные испытания сводились к проверке фактического срока службы до отказа того или иного узла



Рисунок 1-9. Авария стиральной машины

В источнике [4] было отмечено, что большинство машин выходят из этого испытания лишь с естественным износом и незначительными отказами. Поэтому серьезная авария машины Candy GO 1460 стало неприятным сюрпризом (рис. 1-9). Первый образец «полетел» уже после 752 стиральных циклов при выполнении отжима (при максимальных оборотах). Таким образом, машина не наработала бы и 5 лет. Продолжающие работать два образца Candy GO 1460 перенесли в отдельное помещение. И поступили благоразумно: второй образец тоже не дошел до финиша — самоуничтожился после 1328 стиральных циклов. На этом испытания завершились, и третий образец Candy сняли с испытаний, а производство и продажу машин этой марки было рекомендовано прекратить. Причина таилась в барабане. Как оказалось, сломавшиеся в лаборатории Ростест-Москва стиральные машины не были единственными и первыми. После публикации результатов испытаний несколько читателей сообщили о подобных происшествиях.

По официальной информации, в тюрьме города Фленсбург еще в 2009 году у стиральной машины Hoover VHD 9163 при отжиме также лопнул сварочный шов барабана. В обеих машинах барабан разорвался в режиме отжима.

При 1 400 оборотов в минуту лопнул (разошелся) сварочный шов. В итоге разорвавшийся барабан с громким хлопком пробил бак со стиральной жидкостью. Затем была пробита крыша стиральной машины, и в радиусе до 3 метров от машины по помещению стали разлетаться острые осколки.

Этот пример поучителен тем, что цель таких испытаний заключается не в определении ресурса, а в проверке субъективно назначенного поставщиком срока службы (10 лет) и рассчитанного по нормативам ресурса 1840 стираль-

ных циклов. В итоге испытания можно считать проведенными по цензурированной модели до первого крупного отказа.

1.5. Ускоренные испытания средств измерений

1.5.1. Обоснование МПИ счетчика электроэнергии

Успешный пример использования группового принципа РИ относится к стандарту МИ 2307-94 [41] по обоснованию 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.



Рисунок 1-10. Счетчик электроэнергии

Применялось две схемы ускоренных испытаний – параметрическая и цензурированная, о которых подробно будет сказано позже. 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. Интересно отметить, что по этим данным был предусмотрен расчет квантиля нормального распределения.

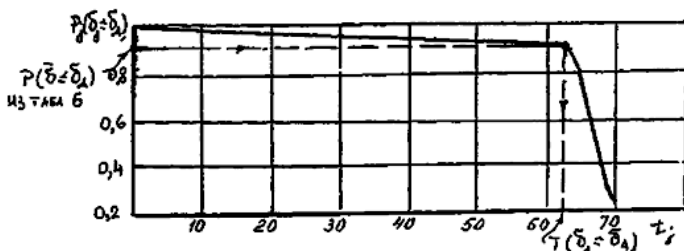


Рисунок 1-11. Копия графика из стандарта

Этот квантиль соответствует понятию о запасе метрологической надежности [31, 33], который позволяет определять искомую вероятность не достиже-

ния предела погрешности. Но при разработке стандарта об этом показателе еще не было известно, и квантиль был использован для другой цели. Была применена непонятная методика оценки доверительной вероятности границ ресурса с помощью больших многофакторных вспомогательных таблиц. Самых вычислений вероятности в стандарте не приводится, хотя там имеется коряво нарисованный от руки график этой вероятности (см. копию на рис. 1-11). Проблема вероятностного расчета ускоренной долговечности была решена не совсем понятно. Но теперь ее можно решить проще с помощью современной методики, как это будет показано в главе 5.4.

Для своего времени этот стандарт можно считать заметным достижением в области организации РИ с целью расчета коэффициента ускорения и обоснования назначенного МПИ, который был принят равным 16 годам. Этот документ до сих пор является действующим стандартом.

1.5.2. Ресурсные испытания электрохимических сенсоров

Электрохимические датчики (сенсоры) имеют широкое распространение в приборах контроля состояния различных газообразных сред, включая газоанализаторы и алкометры, которые напрямую связаны с обеспечением безопасности жизнедеятельности. Поэтому проблема достоверной оценки для них меж поверочного интервала (МПИ) является весьма актуальной. Следует признать, что обычно назначение норматива этого показателя носит формальный характер без представления корректных доказательств. Это косвенно подтверждается тем фактом, что обычно у всех типов таких приборов МПИ принимается равным одной и той же величине – одному году. Более того, по закону о единстве измерений корректировать эту норму поставщики прибора не имеют права. Поэтому практическое значение имеет изучение трендов деградации состояния сенсора с целью оценки степени влияния на срок службы либо числа циклов работы прибора, либо календарной продолжительности его эксплуатации.

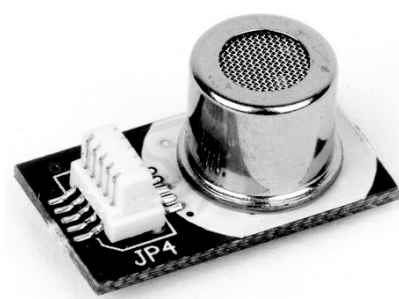


Рисунок 1-12 Электрохимический сенсор для алкометра

Попытка изучить эту проблему была предпринята в 2009 – 2010 годах во ВНИИМ (при участии автора книги) путем получения информации из двух источников [35, 39]. Во-первых, были проведены уникальные сеансы многократных измерений погрешности алкометров трех типов. Объем выборок измерений

достигал 1000 циклов при продолжительности сеансов 50 циклов в день. В качестве диагностического параметра применялась систематическая погрешность и квантиль нормального распределения (см. формулу (3-7)), который в последующих трудах был назван запасом метрологической надежности (ЗМН) [31].

Эти испытания позволили объективно оценить качество алкометров различных фирм с учетом продолжительности их эксплуатации на момент испытаний.

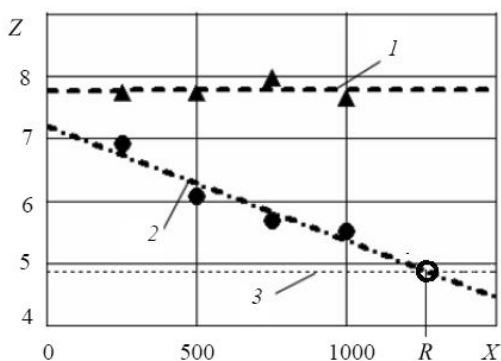


Рисунок 1-13 Зависимость ЗМН от числа циклов испытаний прибора высокого (1) и низкого (2) качества. Точки – опытные данные, линии – расчетные прямые.

На рис. 1-13 показано, что в течение 1000 циклов испытаний алкометр высокого качества 1 с минимальной наработкой до начала испытаний (до двух лет) имел стабильную характеристику ЗМН ($Z = 7.8$). Алкометр низкого качества 2 при наработке до испытаний более 4 лет имел явно выраженный нисходящий тренд этого показателя (от 7 до 4.8) с ограниченным остаточным ресурсом. Второй способ исследования заключался в обработке результатов проверок девяти рабочих алкометров с разной продолжительностью эксплуатации на момент испытаний. Об этом будет подробнее сообщено в статье раздела 6.4.

1.5.3. Ускоренные испытания штангенциркуля на износ

В 2013 году творческим коллективом Мурманского ГТУ были проведены УРИ на износ штангенциркуля на специально созданном стенде СУИС (Стенд Ускоренных Испытаний Сергеева). Результаты и подробное описание методики проведения этих испытаний изложены в § 5.3 книги.

Здесь приведём только сведения о том, что при испытаниях была применена концепция оценки изменений погрешности измерений из-за износа губок прибора по мере накопления циклов упругих ударов губок о мишень. При этом частота ударов составляла 90 кол/мин, что обеспечивало высокий коэффициент ускорения испытаний (более 15000!)

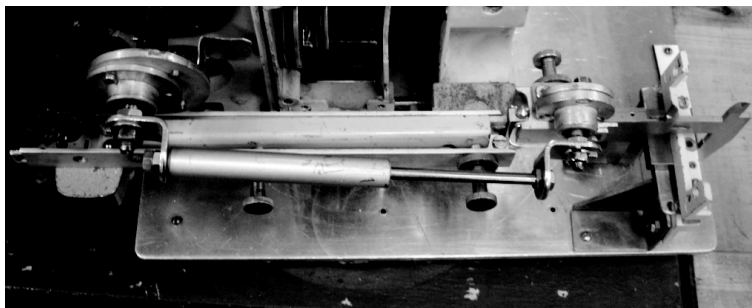


Рисунок 1-14. Стенд для УРИ штангенциркуля

Измерения погрешности производились после каждых 21600 циклов за сеанс. Был применен корректный регрессионный анализ функции погрешности от наработки с учетом доверительных границ, что позволило установить ресурс образца 105030 циклов для предела погрешности 0.05 мм при односторонней вероятности 0.975 (квантиль $Z = 2$). Однако, следует признать, что также как и в предыдущих примерах и не смотря на высокую точность оценки ресурса в циклах проблема оценки срока службы в календарном времени решалась весьма условно. И это понятно. Одно дело, когда инструмент используется на производстве. Другое дело, когда он применяется в учебном процессе или в быту. Но это не означает, что задача не имеет решения.

Далее будет показана роль вероятностной логики при решении этой и других проблем на различных этапах РИ. Например, приняв среднюю частоту использования инструмента 10 циклов/сутки при установленном ресурсе 100000 циклов можно назначить условный срок службы не менее 30 календарных лет.

1.6. Диагностика техники для оценки остаточного ресурса

Целью ресурсных испытаний могут быть не только разработка и корректировка нормативов долговечности техники, но также и контроль их технического состояния при эксплуатации.

Такой контроль принято называть диагностированием, который должен выполняться через заданные промежутки времени с помощью специальных средств диагностики. При этом основным критерием оценки состояния объекта является остаточный ресурс, т.е. разрешенная вероятная наработка после данного диагностирования до наступления предельно-допустимой величины исследуемого диагностического параметра.

Диагностическими (контролируемыми) параметрами могут быть не только характеристики изнашивания узлов трения (зазоры в подшипниках и прочее), но и другие физические величины. В разделе 6.2. будет показана рабочая методика оценки остаточного ресурса демпфера судового двигателя по результатам периодических измерений крутильных колебаний системы валов с использованием оптического торсиографа [34]. Особенностью таких ресурсных испытаний является предварительное расчетное моделирование развития крутильных колебаний системы.

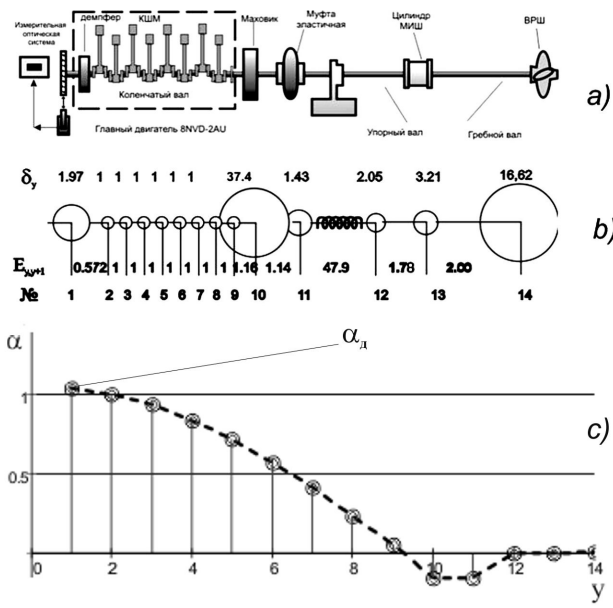


Рисунок 1-15. Эскиз системы вращающихся масс главной силовой установки судна - *a*), безразмерная схема системы вращающихся масс - *b*) и моторная форма свободных колебаний - *c*). Обозначения: КШМ – кривошипо – шатунный механизм, МИШ – механизм изменения шага, ВРШ – винт регулируемого шага, δ_y – относительный момент инерции y – й массы, $E_{y,y+1}$ – относительная податливость участка между y и $(y+1)$ – й массами, α – относительная амплитуда, α_d – относительная амплитуда демпфера.

Использование результаты этого расчета в качестве эталона позволяет обеспечить более высокую достоверность прогнозирования ресурса по сравнению с другими видами вибрационных испытаний. Исходными данными для такого моделирования служат конструктивные характеристики вращающихся элементов (рис. 1-15*a*). С их помощью рассчитывается крутильная схема системы вращающихся масс, состоящая из моментов инерции сосредоточенных масс, податливостей участков валов между массами, демпфирующих моментов и др. (рис. 1-15*b*). Это позволяет рассчитать эталонные значения частот свободных колебаний N и наиболее опасные резонансные частоты вращения вала n_v от возмущающих моментов ν - го порядка и их амплитуды (перемещений A_ν и напряжений τ_ν), а также допускаемые напряжения $\tau_{доп}$ по правилам Регистра. Указанные величины для так называемой моторной формы колебаний (рис. 1-15*c*) являются основными диагностическими параметрами для оценки степени исправности и остаточного ресурса $R_{ост}$ демпфера. Расчеты выполняются по методике монографии [34].

Руководство по диагностическим испытаниям демпферов судовых двигателей методом торсиографирования дано в правилах Российского морского регистра судоходства.

1.7. Предварительные выводы

Приведенные примеры РИ техники позволяют сделать ряд общих и частных предварительных выводов. Во-первых, было показано, что целью нормальных или ускоренных испытаний может быть не только обоснование показателей долговечности изделий (сроков службы и ресурсов), но и выявление дефектов и оценка качества и безотказности продукции. Оба направления исследований имеют большое практическое значение. Однако в этой книге вероятностные модели и алгоритмы относятся в основном к первому направлению РИ для оценки гамма – процентного ресурса исследуемого изделия и процесса его деградации (ПД). Во-вторых, практически во всех случаях нормативы сроков службы были регламентированы задолго до проведения испытаний. Поэтому, цель исследований заключалась не в определении, а в проверке ресурса по результатам нормальных или ускоренных испытаний. При этом отмечается более или менее вероятная субъективность первичной оценки сроков службы в условиях неопределённости частоты использования продукции при эксплуатации, не смотря на успешные результаты РИ. В-третьих, чаще испытаниям подвергалось малое количество образцов изделий (от одного до десяти), что требует анализа этой проблемы, как с математической, так и физической точки зрения. В-четвертых, обнаружено явное несовершенство устаревших методов вероятностной оценки результатов РИ, которые применялись в большинстве примеров испытаний, что указывает на актуальность создание новых алгоритмов решения этой проблемы. В этой книге применены алгоритмы вероятностных расчетов, основанные на трудах [32, 33]. Ответы на поставленные вопросы можно получить на основе концепции вероятностной логики (ВЛ) анализа случайных событий с учетом ряда субъективных факторов (раздел 3.4). Они будут рассмотрены далее при обсуждении проблем организации нормальных и ускоренных ресурсных испытаний.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
1. ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕХНИКИ	5
1.1. Испытания деталей и узлов	5
1.2. Испытания в автомобилестроении	7
1.3. Испытания авиационной и космической техники	9
1.4. Ускоренные испытания бытовой техники	12
1.5. Ускоренные испытания средств измерений	14
1.6. Диагностика техники для оценки остаточного ресурса	17
1.7. Предварительные выводы	19
2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ДАННЫМ	20
2.1. Два подхода к оценке показателей надежности	20
2.2. Техническое обслуживание и надежность продукции	23
2.3. Особенности оценки показателей долговечности	28
2.4. Пример исследования безотказности восстанавливаемого объекта	30
2.5. О диаграмме ПАРЕТО	34
2.6. Некоторые нормы надежности	37
2.7. Проблемы организации эксплуатационных испытаний	38
3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	39
3.1. Показатели долговечности	39
3.2. Статистическая оценка случайных событий	43
3.3. Статистическая оценка случайных процессов	48
3.4. Вероятностная логика ресурсных испытаний	54
3.5. Проблемы вероятностных расчетов	56
4. КЛАССИФИКАЦИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	61
4.1. Общие понятия об испытаниях на надежность	61
4.2. Классификация испытаний по режиму использования техники	63
4.3. Классификация моделей ресурсных испытаний	65
4.4. Цензурированные модели ресурсных испытаний	66
4.5. Параметрические модели ресурсных испытаний	69
5. ПРИМЕРЫ АЛГОРИТМОВ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	72
5.1. Общие замечания	72
5.2. Ускоренные ресурсные испытания пробкового крана	73
5.3. Ускоренные ресурсные испытания штангенциркуля	78
5.4. Ускоренные ресурсные испытания индукционных электросчетчиков	85
5.5. Ресурсные испытания подшипников качения	94

5.6. ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ЛЁГКОГО СПЛАВА НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.....	103
6. СТАТЬИ О МЕТОДАХ ИСПЫТАНИЙ МАШИН И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ	109
6.1. ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ	109
6.2. РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЕМПФЕРА СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	113
6.3. РОЛЬ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	123
6.4. О ВЛИЯНИИ ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКУЮ НАДЕЖНОСТЬ.....	127
6.5. ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ИЗНОСА УЗЛА ТРЕНИЯ	133
6.6. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕРИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА	135
6.7. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ	142
7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ГЛАВА.....	147
7.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКОМЕНДУЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	147
7.2. ОСОБЕННОСТИ РЕКОМЕНДУЕМЫХ АЛГОРИТМОВ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	148
7.3. ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	151
7.4. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ	151
ЛИТЕРАТУРА	155

Леонид Владимирович Ефремов

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Текст настоящего издания приводится в авторской редакции

Оригинал - макет Л. Ефремов
Дизайн обложки Ю. Данилович

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПМаш РАН)
199178, Санкт-Петербург, В.О, Большой пр. 61

Подписано к печати 20.03. 2014. Формат 70х90/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Уел. печ. л. 10. Заказ № 69
Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии «Art-Xpress»
199155, Санкт-Петербург, В.О., ул. Уральская, 17
E-mail: zakaz@art-xpress.ru
<http://www.art-xpress.ru>