

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Л.В. Ефремов

**ПРАКТИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО
АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ С
ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**



Санкт-Петербург
«Наука»
2008

УДК 629.02:06–192
ББК 39.45
Е92

Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. — СПб.: Наука, 2008. — 216 с.: ил.

ISBN 978-5-02-025340-7

Монография базируется на многолетнем научном и практическом опыте автора в исследовании надежности судовых машин. В книге даны основные понятия о надежности машин и описаны оригинальные методы расчета показателей надежности с использованием компьютерных технологий в популярной среде программирования MATHCAD. Практическое значение имеют требования, алгоритмы и компьютерные программы вероятностного моделирования и прогнозирования гамма-процентных сроков службы элементов техники с учетом деградации их состояний. Такой подход позволяет обеспечивать безотказную работу машин.

Для сотрудников академических и отраслевых НИИ, конструкторских бюро, специалистов измерительных лабораторий и промышленных предприятий, преподавателей, аспирантов и студентов технических университетов.

E f r e m o v L . V . Computerized Analyses of Reliability of Mechanics: Theory and Practice.— St. Petersburg: Nauka, 2008. — 216 p.

ISBN 978-5-02-025340-7

The monography is based on long-term scientific and practical experience of the author in probe of reliability of ship machines. In the book the basic concepts about reliability of machines are given and original methods of a choice and calculation of indicators of reliability with use of computer technologies in the popular environment of programming MATHCAD are described. Practical value requirements have, algorithms and computer programs of likelihood modelling and forecasting of life cycles of elements of technics taking into account degradation of statuses of elements. Such approach allows to provide demanded level of non-failure operation of machines at operation.

For employees of the academic and branch scientific research institutes, design offices, experts of measuring laboratories and the industrial enterprises, teachers, post-graduate students and students of technical universities.

Рецензенты:

д-р физ-мат. наук, проф. Б. П. ХАРЛАМОВ
д-р техн. наук, проф. Р. И. ИВАНОВСКИЙ

ISBN 978-5-02-025340-7

© Л. В. Ефремов, 2008
© Издательство «Наука», 2008

Предисловие

Для повышения эффективности и безопасности использования любой техники важнейшее значение имеет совершенствование практических методов исследования ее надежности. Только на основе анализа надежности можно разработать мероприятия по повышению долговечности и безотказности деталей и узлов, обосновать межремонтные периоды, нормативы расхода сменно-запасных частей и объема ремонтов, оценить уровень безотказности изделий при государственной аттестации, сформулировать требования по надежности применительно к заданным условиям эксплуатации и решить многие другие важные задачи.

В предлагаемой книге основное внимание уделено проблеме предупреждения отказов, возникающих из-за постепенной деградации состояния элементов машин и механизмов, поскольку методы исследования структурной надежности сложных систем, широко используемые в радиоэлектронике, автоматике или электроэнергетике, не во всем пригодны для изделий машиностроения¹.

При проектировании машин и механизмов основной задачей конструктора является не столько взаимная компоновка элементов машины, сколько выбор таких конструктивно-технологических мер, которые обеспечивали бы необходимую долговечность и безотказность узлов и деталей. Для этого приходится выполнять расчеты на прочность, износостойкость, коррозионную и другую стойкость.

Общий методологический подход к решению вопросов надежности машин с наибольшей полнотой был сформулирован в монографии А. С. Проникова [36], где были введены понятия фактических и потенциальных отказов и обоснованы способы расчета ресурсов деталей машин.

Эффективность подобного подхода к изучению надежности машин подтверждается многолетним опытом организации комплексных исследований надежности оборудования отечественного промыслового флота. Этот опыт позволил написать и издать в 1980 г монографию [20], в которой методология оценки долговечности машин получила дальнейшее развитие с учетом вероятностной природы деградации состояния элементов машин. Поэтому в наших трудах [18, 20, 22, 23, 24 и др.] придается основополагающее значение оценке не средних, а гамма-процентных ресурсов элементов техники. При этом допустимое значение вероятности не достижения предельного состояния «гамма» принимает разные значения для конкретных видов повреждений (с учетом степени их опасности). Очевидно, что подобные вероятностные задачи должны решаться на основе теории вероятности и математической статистики, но в вузах этот раздел высшей математики, как правило, дается в малоприспособленном для практического применения абстрактном виде. Отчасти это явилось причиной создания новых

¹ Основы исследования структурной надежности систем изложены в трудах И. А. Рябилина [39], В. С. Сотскова [40] и др.

оригинальных вероятностных методов и программ для решения сугубо прикладных проблем в области надежности, которые рассматриваются в данной монографии. Прежде всего следует отметить предложенный автором принцип одинаковых последствий, снимающий ряд противоречий между теорией и практикой вероятностного анализа. Заслуживают внимания программы для построения эмпирических распределений вероятностей для так называемых цензурированных выборок при любом плане испытаний, а также для расчета параметров теоретических распределений с последующей оценкой их корреляции с эмпирическим распределением. Для стадии проектирования машин и другой техники весьма полезным разделом является глава о вероятностных моделях. Рассмотрены и другие практически вопросы, такие как выбор номенклатуры показателей для изделий различного назначения, определение перечня работ при ремонтах с помощью характеристик надежности деталей и узлов, методы, средства и программы технического диагностирования состояния техники и др.

Данная книга базируется на идеологии ранее изданных трудов, но при этом существенно от них отличается применением современного инструментария для аналитического анализа надежности. Алгоритмы всех расчетов были переработаны и усовершенствованы с помощью мощной системы математического программирования MATHCAD, которая обладает к тому же высокой степенью наглядности. Это позволило все процедуры анализа надежности пояснять с помощью фрагментов расчета в редакторе MATHCAD, которые имеют в книге свою систему нумерации, отличную от нумерации рисунков. Формулы и алгоритмы, приводимые на фрагментах программ, можно применять в расчетах другими средствами или просто использовать для изучения методов исследования. Автор выражает надежду на то, что этот труд найдет достойное применение у создателей и потребителей машиностроительной продукции и будет способствовать повышению безопасности эксплуатации техники во всех отраслях народного хозяйства и на транспорте.

Эта книга может быть полезной и для преподавателей вузов по дисциплинам, связанных с изучением или применением теории вероятностей и математической статистики, наряду с учебным пособием [27]. Общей особенностью обеих монографий является использование для расчетов и анализа упомянутой выше математической среды MATHCAD [17, 32].

Автор считает своим долгом выразить благодарность рецензентам, докторам соответствующих наук — авторитетному специалисту по теории вероятности и математической статистике профессору Р. И. Ивановскому и известному ученому в области надежности профессору Б. П. Харламову за благожелательную оценку этого труда.

1. Основные понятия о надежности техники

1.1. Цели и задачи изучения надежности техники

Актуальность исследований надежности техники можно показать на примере современного промышленного судна, которое является сложным инженерным сооружением, насыщенным разнообразным комплектующим оборудованием. Так, крупнотоннажный траулер имеет энергетическую установку с двухмашинным дизель-редукторным агрегатом и винтом регулируемого шага, многочисленное электрооборудование, холодильную установку, технологическое и промышленное оборудование, системы различного назначения, радиопоисковую технику и др. Для поддержания всей этой многообразной техники в работоспособном состоянии требуются определенные затраты на техническое обслуживание и ремонты. Одни только плановые ремонты за весь срок службы судна приводят к простоям общей продолжительностью до 25 % эксплуатационного времени. Эти затраты могут значительно возрасти из-за недостаточной надежности судового оборудования или отсутствия запасных частей. При неблагоприятном стечении обстоятельств отказ оборудования судна может привести к особо тяжелым последствиям вплоть до гибели людей.

Таким образом, основная цель изучения надежности техники — обеспечение безотказной работы, а также минимальных затрат времени и средств на техническое обслуживание и ремонт судна за установленный срок службы до его списания. Это предусматривает целенаправленное исследование надежности на всех этапах проектирования и эксплуатации любого изделия судовой техники путем решения ряда конкретных задач. Рассмотрим наиболее важные из них.

Первая задача заключается в определении элементов, надежность которых не удовлетворяет требованиям эксплуатации и снижает общий уровень надежности изделия. Задача решается путем сбора информации об отказах в эксплуатации с последующей разработкой конструктивно-технологических мероприятий по устранению причин отказов серийно изготавливаемых объектов. Этому способствует существующая система гарантийных обязательств поставщиков по устранению дефектов на основе предъявляемых рекламационных актов. Менее эффективно и оперативно устраняются дефекты изделий после истечения гарантийных сроков. Поэтому для решения первой задачи очень важно совершенствовать систему сбора информации о недостатках техники и разработки, согласованных между поставщиком и заказчиком решений по улучшению ее качества.

Вторая задача инженерного анализа надежности состоит в определении показателей безотказности, необходимых для оценки уровня качества при государственной аттестации изделий, с последующим составлением плана мероприятий по их совершенствованию. Для этого применяются сравнительно простые методы расчета показателей надежности. Главная проблема заключается в организации системы сбора данных об отказах, их накоплении и обработке в организациях потребителей и поставщиков техники.

Третья задача — разработка или корректировка нормативов периодичности и объема ремонтов, а также норм расхода запасных частей. Для решения этой

задачи требуются более достоверные и точные исходные данные о надежности элементов, полученные не только во время эксплуатации, но и при дефектации изделий во время ремонтов. Поэтому число подконтрольных объектов приходится ограничивать на основе правил планирования наблюдений. Для обоснования нормативов необходимо совершенствовать методы инженерного анализа распределений долговечности изделий.

Четвертая задача решается одновременно с тремя первыми; она заключается в совершенствовании требований по надежности и правил проектирования элементов изделий с учетом вероятностной природы возникновения отказов. Здесь, кроме изучения опыта эксплуатации, необходимы специальные исследования, направленные на обеспечение надежности конструктивными и технологическими методами (повышение прочности, износостойкости, коррозионной стойкости и т. п.). Эту задачу, как правило, решают научно-исследовательские организации поставщика, иногда совместно с заказчиком.

Пятая задача состоит в разработке методов прогнозирования надежности при эксплуатации машин путем проведения диагностирования. В настоящее время еще не для всех видов отказов машин и механизмов разработаны инженерные методы прогнозирования надежности. Требуются специальные исследования в лабораторных и натуральных условиях деталей машин различного назначения для накопления достоверного статистического материала.

К шестой задаче можно отнести определение причин недостаточной надежности того или иного элемента изделия (детали или узла) и разработку технических мероприятий по их устранению. Причины низкой надежности выявляются расчетными и экспериментальными методами. В состав работ по исследованию причин недостаточной надежности входит изучение вероятностных характеристик фактической долговечности рассматриваемой детали (узла). Для разработки рекомендаций по устранению причин отказов необходимо изучить передовую технологию и прогрессивные конструктивные решения. В некоторых случаях выполняются специальные лабораторные исследования новых материалов, конструкций и технологических процессов.

При исследовании надежности во время эксплуатации удастся также получить исходные данные для решения еще одной важной задачи — определения объектов безразборной диагностики с последующей разработкой средств и методов этого перспективного направления технического обслуживания и ремонта техники (сервиса).

Рассматривая задачи в области надежности, можно наметить два основных этапа инженерного анализа. На первом этапе устанавливается фактическая (хотя и не всегда точная) картина надежности и выявляются «слабые звенья» в системах, из которых состоят изделия той или иной техники. На втором этапе производится более глубокое изучение надежности элементов изделий на основе анализа вероятностной и физической сущности отказов. Только с помощью методов, применяемых на втором этапе, может быть достигнута основная цель исследования надежности — обеспечение требуемого уровня безотказности, долговечности и ремонтпригодности как оборудования, так и судна в целом.

Задачи, которые указаны выше, обычно решаются научно-иссле-

довательскими и проектно-конструкторскими организациями применительно к любому обезличенному изделию. Однако большой экономический эффект можно получить и при изучении надежности каждого конкретного изделия в полевых условиях или при стендовых испытаниях машин. С помощью сравнительно простых методов анализа работоспособности и износа деталей механизма имеется возможность подготовить обоснованные предложения по продлению межремонтных ресурсов в одних случаях (при большом запасе надежности) или увеличению дополнительной поставки запасных частей в других (в случае низкой надежности).

Умение анализировать данные о надежности может выручить обслуживающий персонал при разборе причин аварийных случаев, если аварийный отказ произошел из-за конструктивных и технологических недостатков, а не из-за нарушения правил технической эксплуатации.

1.2. Термины и определения по надежности

1.2.1. Общие замечания

Прежде чем приступить к рассмотрению особенностей исследования надежности техники (машин, механизмов, устройств и т. п.), представляется целесообразным отдать должное формальной информации о терминах и определениях этого комплексного свойства, которое регламентируется государственным стандартом ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» [11] и рядом отраслевых документов.

Для пояснения понятий, которые могут впервые встретиться по ходу чтения книги, ниже приводится краткий (пока с минимальными комментариями) справочник основных терминов. В последующих разделах книги эти термины будут рассмотрены более подробно. Данный справочник может быть полезен студентам для «зазубривания» терминов перед экзаменом или зачетом (если этот труд рассматривать как учебное пособие).

При изучении надежности рассматриваются следующие философские категории: свойства, состояния, события, процессы и объекты. Кроме этих понятий здесь приведены определения измерителей и показателей надежности, признаков отказов и повреждений, понятий о резервировании (для выполнения структурного анализа надежности) и об основных статистических показателях.

1.2.2. Свойства

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

Понятие о надежности требует некоторого разъяснения, поскольку это свойство входит в состав более общего свойства, которое называется качеством продукции.

Качество — это совокупность свойств продукции, обуславливающее ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Одновременно надежность представляет собой сложное понятие, включаю-

щее в себя такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до перехода в предельное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем приведения ремонтов и технических обслуживаний.

Сохраняемость — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после режима ожидания, хранения и (или) транспортирования.

1.2.3. Состояния

Основной целью изучения надежности является оценка стадий изменения состояний изделия в зависимости от времени.

Исправное состояние (исправность) — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Неисправное состояние (неисправность) — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно—технической документацией.

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

Для количественной оценки наработки до отказов и повреждений в этой книге применяются такие понятия об уровнях предельных состояний.

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

Назначенный уровень предельного состояния — установленная нормативно-технической документацией величина, достижение которой соответствует переходу от исправного к неисправному состоянию и возникновению повреждения элемента объекта.

Критический уровень предельного состояния — величина, достижение которой соответствует переходу от неисправного к неработоспособному состоянию с высокой вероятностью возникновению отказа элемента объекта.

Дефект — количественный или качественный признак несоответствия технического состояния объекта требованиям нормативно-технической документации.

1.2.4. События

Ключевыми понятиями теории надежности являются термины об отказах и повреждениях.

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 ремонтпригодности. Эти вопросы будут рассматриваться в других разделах книг более подробно.

Далее дадим лаконичную классификацию этих событий.

Допустимое повреждение — повреждение, которое возникает в результате развития естественных деградиационных процессов элемента объекта и учитывается в первую очередь при установлении назначенного ресурса до ремонта.

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

Внезапный отказ — отказ, возникновение которого характеризуется постоянной во времени интенсивностью отказов и скачкообразным изменением технического состояния.

Зависимый отказ — отказ элемента объекта, обусловленный повреждениями или отказами других элементов.

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

Независимый отказ — отказ элемента объекта, не обусловленный повреждениями или отказами других элементов.

Постепенный отказ (повреждение) — отказ (повреждение), возникновение которого характеризуется постепенным увеличением интенсивности отказов под воздействием одного или нескольких деградиационных процессов.

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

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

1.2.5. Процессы

Процесс — последовательная смена явлений, состояний в развитии чего-нибудь или совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата.

Прежде всего рассмотрим определение процессов ухудшения состояния элементов машин, которые приводят к повреждениям и отказам.

Деградиационный процесс — процесс ухудшения технического состояния объекта под воздействием конкретных внешних и внутренних факторов.

Изнашивание — деградиационный процесс изменения размеров, формы, мас-

сы объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении.

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

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

Далее приводятся примеры важнейших производственных процессов, связанных с тематикой исследования надежности техники.

Производственный процесс — совокупность целенаправленных действий исполнителей по созданию продукции или оказанию услуг определенного вида.

Жизненный цикл объекта — продолжительность существования объекта от начала проектирования до его списания, включающая в себя этапы проектирования, изготовления, хранения, транспортирования и технической эксплуатации.

Изготовление — производственный процесс создания объекта в соответствии с разработанной нормативно-технической документацией, завершающийся сдачей объекта в сферу эксплуатации.

Проектирование — процесс создания проекта-прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта или состояния.

Ремонт — производственный процесс восстановления работоспособности объекта с периодическим выводом его из эксплуатации.

Техническая эксплуатация — этап жизненного цикла объекта после его поступления в распоряжение потребителя, включающий в себя под этапы использования по прямому назначению, технического обслуживания и ремонта.

Техническое обслуживание — производственный процесс поддержания объекта в исправном состоянии без вывода его из эксплуатации.

Транспортирование — производственный процесс перемещения объекта до установки его на объект конечного применения.

Хранение — производственный процесс содержания и сохранения исправного состояния объекта вне его эксплуатации в заданных условиях.

Эксплуатация объекта — производственный процесс использования данного объекта для решения поставленных технологических и (или) транспортных задач с целью получения экономического результата.

1.2.6. Объекты

Понятия об объектах приводятся для более корректного разъяснения основных этапов исследования надежности.

Объект (от лат. *objectum* — «предмет») — философская категория, выражающая то, что противостоит субъекту в его предметно-практической и познавательной деятельности.

Субъект (от лат. *subjectus* — «лежащий внизу, находящийся в основе») — носитель предметно-практической деятельности и познания, источник активности, направленной на объект.

Механическая система (система) — сложный объект, представляющий собой совокупность взаимосвязанных функционально и расположенных в определен-

ном порядке элементов.

Объект конечного применения (предприятие, судно, агрегат) — сложный объект, созданный для производства конечной продукции.

Узел — часть машины, механизма, установки и т. п., состоящая из нескольких более простых элементов (деталей).

Деталь — элемент узла объекта, неразъемное изделие, изготовленное без применения сборочных операций или путем пайки, склейки, сварки и т. п.

Восстанавливаемый объект — объект, исправность или работоспособность которого подлежит восстановлению в случае возникновения отказа или обнаружения повреждения в рассматриваемой ситуации.

Невосстанавливаемый объект — объект, исправность или работоспособность которого не подлежит восстановлению в случае возникновения отказа или обнаружения повреждения в рассматриваемой ситуации.

Технический объект (объект) — предмет, подлежащий расчету, анализу, испытанию и исследованию в процессе его проектирования, изготовления, применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования в целях обеспечения его функционального назначения.

Элемент (механической системы) — объект, представляющий собой часть механической системы в рассматриваемом исследовании.

1.2.7. Измерители надежности

Наработка — продолжительность и объем работы объекта.

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.

Оперативное время восстановления — затраты времени каждого исполнителя на выполнение операций по восстановлению работоспособности объекта, определяемые его конструкцией и техническим состоянием.

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, а также значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленные нормативно-технической документацией.

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

1.2.8. Показатели надежности

Показатель надежности — величина, характеризующая одно из свойств (единичный показатель) или несколько свойств (комплексный показатель) надежно-

сти. К единичным показателям относятся показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. К комплексным показателям относятся коэффициенты технического использования и готовности.

1.2.8.1. Показатели безотказности

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.

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

Параметр потока отказов — плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемого объекта, определяемая для данного момента времени.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

1.2.8.2. Показатели долговечности

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

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.

1.2.8.3. Показатели ремонтпригодности

Вероятность обнаружения дефекта — вероятность того, что после наработки, равной назначенному ресурсу объекта до ремонта (технического обслуживания), при дефектации объекта будет обнаружен дефект элемента 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.

1.2.8.4. Показатели сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования, в течение и после которой показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности объекта не выйдут за установленные пределы с вероятностью γ , выраженную в процентах.

Назначенный срок сохраняемости — установленная нормативно-технической документацией календарная продолжительность хранения объекта в заданных условиях, по истечении которой применение его по назначению не допускается.

Средний срок сохраняемости — математическое ожидание срока сохраняемости.

1.2.8.5. Комплексные показатели

Коэффициент готовности — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Определяется как отношение наработки на отказ к сумме этой наработки и среднего времени восстановления после отказа (формула для расчета приведена в табл. 4.1 на стр. 142).

Коэффициент технического использования — отношение математического ожидания наработки за некоторый период эксплуатации к сумме математического ожидания наработки и продолжительности технического обслуживания и ремонтов за тот же период эксплуатации (см. формулу 4.1 на стр. 148).

1.2.9. Резервирование

Термины о резервировании применяются при исследовании структурной надежности систем.

Дублирование — резервирование, при котором кратность резервирования равна единице.

Избыточность — дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов.

Нагруженный резерв — резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной элемент.

Ненагруженный резерв — резервный элемент, который практически не несет нагрузок при работе объекта.

Облегченный резерв — резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент.

Общее резервирование — резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Основной элемент — элемент структуры объекта, минимально необходимый для выполнения объектом заданных функций.

Постоянное резервирование — резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными элементами.

Раздельное резервирование — резервирование, при котором резервируются элементы объекта или их группы.

Резервирование — метод повышения надежности путем введения избыточности системы.

Резервирование замещением — резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному элементу в случае отказа основного элемента.

Резервный элемент (резерв) — элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Смешанное резервирование — совмещение различных видов резервирования.

Структурное резервирование — резервирование, предусматривающее использование избыточных элементов структуры объекта.

1.2.10. Теория вероятности

Вероятность — число, характеризующее степень возможного наступления случайного события.

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

Объем выборки — число единиц, образующих выборочную совокупность.

Корреляция — зависимость между случайными величинами, не имеющая строгого функционального характера, при которой изменение одной случайной величины приводит к изменению математического ожидания другой.

Статистические характеристики выборки — совокупность показателей для

количественной оценки выборки (средняя, дисперсия, коэффициент вариации, эмпирическое распределение вероятности и др.).

Дисперсия — математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины X_i от ее математического ожидания X_{cp} :

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1), \quad (1.1)$$

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

Среднее квадратичное отклонение — основной показатель вариации, представляющий собой корень второй степени из дисперсии

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1)}. \quad (1.2)$$

Средняя арифметическая (выборочная) — приближенное значение математического ожидания случайной величины X .

$$X_{cp} = \sum_1^N X_i / N. \quad (1.3)$$

Коэффициент вариации — отношение среднего квадратичного отклонения к средней величине варьирующего признака.

$$V = \sigma / X_{cp} = \left(\sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2 / (N-1) \right)^{1/2} / X_{cp}. \quad (1.4)$$

Доверительная вероятность — вероятность того, что оцениваемый вектор характеристик генеральной совокупности покрывается доверительной областью (доверительным интервалом).

Доверительные границы — границы доверительного интервала.

Начальные M_k и центральные M_{c_k} статистические моменты k -го порядка

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} X^k f(X) dX, \quad M_{c_k} = \int_{-\infty}^{\infty} (X - M_{k-1})^k f(X) dX, \quad (1.5)$$

где X — непрерывная случайная величина, $f(X)$ — плотность вероятности.

Начальный статистический момент первого порядка M_1 называется математическим ожиданием, который принято считать равным величине среднего X_{cp} , определяемой по формуле (1.3).

Второй центральный момент M_{c_2} , называемый дисперсией, можно определять по формуле (1.1).

Метод наименьших квадратов — статистический метод нахождения оценок параметров генеральной совокупности, используемый, в частности, для нахождения оценок коэффициентов уравнения регрессии.

Метод моментов — один из общих методов оценивания неизвестных параметров распределения, который заключается в том, что некоторые статистические моменты генеральной совокупности как функции неизвестных параметров

приравниваются к соответствующим выборочным моментам, после чего решается система уравнений относительно неизвестных параметров.

Метод максимального правдоподобия — общий метод оценивания неизвестных параметров распределения с помощью тех значений параметров, которые отвечают максимуму совместной плотности или функции правдоподобия.

Моменты — числовые характеристики распределения вероятностей,

Размах выборки — статистическая характеристика рассеяния варьирующего признака. Она представляет собой разность между наибольшим (X_n) и наименьшим (X_1) значением вариационного ряда

$$X_1 < X_2 < X_3 < \dots < X_n. \quad (1.6)$$

Распределение вероятностей — совокупность всех возможных значений случайной величины и соответствующих им вероятностей.

Эмпирическое (выборочное) распределение вероятностей — статистический аналог распределения вероятностей, определяемый с помощью выборочной совокупности.

Теоретическое распределение вероятностей — распределение, выбранное для описания закона, которому подчиняется фактическое (эмпирическое) распределение.

1.2.11. Техническая диагностика

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.

Техническая диагностика (диагностика) — область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

Техническое диагностирование (диагностирование) — определение технического состояния объекта.

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 (контроля технического состояния) — изделие и (или) его составные части, подлежащие (подвергаемые) диагностированию (контролю)

Техническое состояние объекта — состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

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.

Технический диагноз (результат контроля) — результат диагностирования

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

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.

Алгоритм диагностирования (контроля) — совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

Диагностическое обеспечение — комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

Диагностическая модель — формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования. Может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и другой форме.

1.2.12. Принцип одинаковых последствий

В работе [24] был впервые обоснован принцип анализа случайных событий, снимающий ряд противоречий между теоремами теории вероятности и практикой инженерного анализа надежности техники.

Предложенный принцип назван принципом одинаковых последствий. Он состоит в следующем: «В состав общей классификационной группы, выборочной совокупности или суперпозиционного распределения вероятности допустимо включать только те случайные события (отказы, повреждения и др.), которые приводят к одинаковым последствиям. Если имеется несколько распределений случайных событий, которые приводят к разным последствиям, то они должны рассматриваться независимо друг от друга. Признаки (критерии) последствий отказов должны указываться в условиях задачи».

Этот принцип позволил решить многие проблемы надежности и, в первую очередь, уточнить такие основополагающие понятия в теории надежности как предельное состояние, отказ и повреждение.

1.2.13. Альтернативные термины

Приведенные выше термины и определения соответствуют содержанию данной книги. Однако в литературе по теории вероятности можно встретить и другие толкования одних и тех же понятий. Это следует из табл. 1.1, где приведены термины, используемые в этой работе при описании эмпирических распределений, и соответствующие им альтернативные термины из некоторых трудов по теории вероятности и математической статистике [2, 3, 4, 25, 41 и др.]

Альтернативные термины

Используемый термин	Альтернативные термины
Выборка	Выборочная совокупность
Ранжированная выборка	Вариационный ряд, ранжированный ряд
Член выборки	Выборочное значение, варианта (для ранжированного ряда)
Плотность вероятности	Относительная частота, дифференциальная функция вероятности
Безразмерная плотность вероятности	Частость или относительная частота в интервале
Эмпирическая интенсивность отказа	Нет
Безразмерная интенсивность отказа	Нет
Среднее арифметическое, математическое ожидание	Выборочное среднее, статистическое среднее, средневзвешенное
Дисперсия	Выборочная дисперсия, статистическая дисперсия
Среднее квадратичное отклонение	Выборочное среднее квадратичное отклонение, выборочное стандартное отклонение, выборочный стандарт
Функция распределения вероятности	Кумулятивная кривая (функция), интегральная функция
Эмпирическое распределение вероятности безотказной работы	Кривая убыли, функция надежности
Эмпирическое распределение плотности вероятности	Гистограмма интервального вариационного ряда или полигон относительных частот

1.3. Классификация машин и их элементов

1.3.1. Классификация оборудования

Надежность комплектующего оборудования (изделия) по-своему влияет на работоспособность судна в целом. Если, например, разрушение гребного винта или коленчатого вала главного двигателя приводит к аварийному ремонту судна, то перегоревшая лампа светильника в машинном отделении — легко устраняемая неисправность.

Имеются различия в методах технического обслуживания и ремонта изделий судовой техники. Одни изделия обслуживаются в рамках системы планово-предупредительных ремонтов (ППР), а другие — по мере возникновения отказов. Поэтому не может быть одинакового подхода к нормированию и анализу надежности разных видов техники, чем и вызвана необходимость ее классификации.

Применительно к рассматриваемой в этой книге методике представляется

целесообразным построить классификацию таким образом, чтобы в каждую классификационную группу входили изделия, одинаково влияющие на надежность и эффективность функционирования объекта конечного применения (судна в целом). Исходя из этого условия, сначала разделим все судовое оборудование на две укрупненные функциональные группы. К первой группе отнесем оборудование, обеспечивающее основные функции судна как транспортного плавучего средства: корпус судна, главную энергетическую установку, электростанцию, радиооборудование и др. Ко второй группе отнесем оборудование, предназначенное для выполнения судном каких-либо специальных функций, например, рыбопромысловое судно может иметь промысловое, технологическое и холодильное оборудование.

1.3.2. Классификация машин

После такого укрупненного разделения всего оборудования можно приступить к классификации изделий судовой техники. В частности, судовые машины, механизмы и другое механическое оборудование предлагается подразделить на четыре класса. К первому классу отнесем изделия, техническое обслуживание и ремонты 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 отнесем 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. Лишь отказы деталей, которые должны восстанавливаться во время ремонта (например, коленчатый вал главного двигателя), окажут воздействие на работоспособность судна в целом, так как потребуется вывод его из эксплуатации для аварийного ремонта. Если же откажет элемент, восстановление которого должно выполняться при техническом обслуживании, то с этой работой вполне справится экипаж судна. Так, судовой механик затратит не более часа на замену форсунки главного двигателя, плановое обслуживание которой тоже выполняется в море.

В третий класс включим 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, компрес-

соры 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: восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Невосстанавливаемые изделия — это изделия, которые должны заменяться в случае первого отказа: например, перегоревшую электрическую лампочку остается только заменить.

1.3.3. Классификация элементов машин

Аналогичный принцип положен в основу классификации отдельных элементов изделий судовых машин и механизмов. Для сложных изделий первого, второго и третьего классов предлагается такая классификация.

К элементам первой категории отнесем все детали и узлы, первое плановое освидетельствование которых должно выполняться при капитальном ремонте изделия или которые должны служить без ремонта до списания изделия. Очевидно, что в первую категорию войдут все наиболее ответственные детали, для ремонта которых потребуется полная разборка изделия.

К элементам второй категории можно отнести те детали и узлы, первое плановое освидетельствование которых должно выполняться во время среднего (или равноценного ему) ремонта. Здесь требуется лишь частичная разборка изделия, а следовательно, в случае отказа время простоя в ремонте будет заметно меньше, чем при отказе элемента первой категории.

К третьей категории отнесены элементы, первое освидетельствование которых может выполняться при техническом обслуживании. Обычно для восстановления элементов третьей категории не требуется разбирать корпус изделия, в крайнем случае, могут вскрываться штатные лючки или демонтироваться наружные узлы. Для восстановления изделий третьей категории потребуется еще меньше времени, чем для восстановления изделий второй категории.

Возьмем для примера какой-нибудь судовой механизм. У двигателя внутреннего сгорания к элементам первой категории можно отнести корпус и фундаментную раму, коленчатый вал, цилиндрические крышки и цилиндрические втулки и др. Все эти элементы должны либо служить до списания двигателя, либо проходить первый контроль при капитальном ремонте. Ко второй категории можно отнести поршневые кольца, подшипники, впускные и выпускные клапаны и т. п. Для осмотра этих деталей не надо разбирать весь двигатель, достаточно снять крышки цилиндров и штатные лючки картера. К третьей категории относятся детали и узлы топливной аппаратуры, для ремонта которых не требуется разборка корпуса двигателя.

1.4. Критерии надежности

1.4.1. Классификация отказов и повреждений элементов

Согласно ГОСТ 27.002-89, отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. При изучении надежности систем, состоящих из стандартных невосстанавливаемых элементов (конденсаторов, сопротивлений, транзисторов и т. п.), такое определение отказа является исчерпывающим и не нуждается в разъяснениях.

Однако для машин и механизмов, работоспособность которых приходится не только восстанавливать при возникновении отказов, но и поддерживать путем выполнения плановых ремонтов и технического обслуживания (профилактики), содержание понятия отказа усложняется.

При дефектации машины перед ремонтом выявляются различные повреждения, дефекты и случаи достижения предельно допустимых износов и зазоров. Эти явления нельзя смешивать с отказами, возникающими при эксплуатации, поскольку мы не можем знать наработки до тех отказов, которые могли бы произойти, если бы плановый ремонт не выполнялся. Это обусловило необходимость ввести дополнительный термин, охватывающий все случаи достижения предельных состояний элементов, обнаруживаемые при дефектации машин и механизмов. Проф. А. С. Проников предложил назвать подобные «несостоявшиеся» отказы потенциальными [36], что совпадает по смыслу с понятием «предупреждаемые отказы», используемым при изучении надежности оборудования судов промыслового флота [20]. В наших последующих работах это понятие было заменено на известный термин «повреждение».

Отказы, которые в действительности возникают в эксплуатации и вызывают внеплановые простои машин можно назвать фактическими отказами [36], а в методической документации по надежности оборудования флота рыбной промышленности [18] они назвались явными или просто отказами. Как показывает опыт работы на судах флота рыбной промышленности, разделение понятий «повреждение» и «отказ» облегчает задачу сбора, систематизации и обработки информации о надежности судового оборудования. Информация о фактических отказах регистрируется судовыми специалистами при нахождении судна в море, а затем направляется в центральную картотеку. Для получения информации о повреждениях, необходимо обрабатывать ремонтную документацию и проводить контрольные обмеры деталей во время дефектации механизмов на судоремонтных предприятиях или судах. Имеются различия и в методах обработки информации о повреждениях и фактических отказах.

Понятие о повреждении имеет принципиальное значение для инженерного анализа долговечности и ремонтпригодности машин и механизмов. Только путем изучения повреждений можно объективно оценивать и нормировать ресурсы до ремонтов, определять трудоемкость работ и затраты на сменно-запасные части при ремонтах, а также решать обратную задачу — находить конструктивные варианты, обеспечивающие безотказную работу в течение назначенного срока службы машины.

Иная роль отводится в методике анализа надежности машин и механизмов фактическим отказам. С помощью сведений о фактических отказах оценивается

уровень безотказности изделий в межремонтные периоды эксплуатации, так как при наличии системы ППР и ППО возникновение отказов должно рассматриваться как непропорциональное явление.

Многие виды отказов развиваются под воздействием естественных процессов старения, которые неизбежно должны привести к ремонту или списанию машины. Поэтому подобные события названы в работах [20, 36] допустимыми повреждениями. На стадии проектирования они должны приниматься в расчет при определении ресурсов машин до плановых ремонтов.

К сожалению, не всегда еще удается создать новую машину, которая не имела бы тех или иных конструктивных недостатков. В процессе эксплуатации или при дефектации многих машин выявляются различные дефекты, т. е. повреждения или фактические отказы, которых можно было бы избежать за счет соответствующих конструктивных или технологических решений. В работе [20] такие потенциальные отказы (повреждения) называются недопустимыми; задача конструктора машины или механизма заключается в том, чтобы такое событие не возникало раньше сроков ремонта или списания элемента, установленных с учетом допустимого повреждения.

Деление потенциальных отказов (повреждений) на допустимые и недопустимые облегчает нормирование значений вероятности достижения предельного состояния.

При анализе надежности машин и механизмов необходимо учитывать физическую природу возникновения отказов. Тогда отказы принято подразделять на внезапные и постепенные отказы (ГОСТ 27.002-89). Однако, довольно часто постепенные отказы проявляются неожиданно, так же, как и внезапные. Поэтому представляется целесообразным показать основное различие между ними.

Постепенные отказы возникают из-за развития с большей или меньшей скоростью процессов деградации состояния элементов машины. Это приводит либо к естественному старению машины в целом за установленный срок службы, либо к появлению преждевременных недопустимых отказов. Внезапные отказы происходят вследствие резкого увеличения внешних воздействий на деталь машины и не всегда связаны с процессами деградации. Условия возникновения внезапных отказов подобны обстоятельствам возникновения травм у людей. Так же, как в случае получения человеком травмы, вероятность возникновения внезапного отказа, в любой момент времени (т. е. интенсивность отказов) не зависит от возраста объекта. Например, поломка лопасти гребного винта из-за удара о твердый предмет одинаково вероятна как во время приемно-сдаточных испытаний судна, так и после десяти лет эксплуатации. По-иному проявляются во времени постепенные отказы: интенсивность этих отказов возрастает. Обработка статистических данных о поломках лопастей гребного винта большого морозильного траулера показала, например, что в интервале 4 — 6 тыс. ч работы на 100 гребных винтов приходилось две лопасти с трещинами в комле, а в интервале 18—20 тыс. ч работы число таких лопастей возросло до 12. Причиной разрушения лопастей оказались усталостные напряжения в комле, возникшие вследствие неудачного конструктивного решения и неправильного выбора материала.

Причины отказов принято разделять на конструкционные, производственные и эксплуатационные причины (ГОСТ 27.002-89). Следует отметить, что на практике решить вопрос о причине отказа зачастую бывает нелегко, поскольку каждая из сторон (проектная организация или завод-изготовитель и судовладелец) защищает свои интересы, а причины отказа могут быть взаимосвязанными. В общем случае причины отказа кроются в возникшем несоответствии между конструктивно-технологическими свойствами объекта и условиями его эксплуатации. При небольших запасах надежности малейшее отклонение от расчетных условий эксплуатации может привести к отказу. При значительных запасах надежности отказа не произойдет в любых, даже самых неблагоприятных условиях.

Для практики инженерного анализа надежности наряду с понятиями об отказах большое значение имеют понятия о ресурсе и предельном состоянии. Эти понятия связаны между собой, поскольку ресурс, это наработка от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Отсюда следует, что для определения ресурса необходимо, во-первых, получить зависимость изменения технического состояния объекта во времени, а во-вторых — установить критерий или признак, характеризующий предельное состояние. Тогда ресурс можно определить по моменту времени, когда техническое состояние, постепенно ухудшаясь, совпадет с предельным состоянием.

Таким путем можно установить ресурсы элементов машины при каждом виде повреждения, а затем с их помощью найти ресурс до ремонта машины в целом. В монографии и других трудах приводится особая методика и программное обеспечение решения этой не простой проблемы с учетом принципа одинаковых последствий (см. п. 1.2.12.).

В основе предлагаемых в этой книге методов расчета ресурсов положены современные представления о физической природе повреждений машин и, в частности, представления о техническом состоянии изделия.

В монографии [36] проф. А. С. Проников раскрывает механизм образования отказа и показывает, как формируется техническое состояние элементов машин под воздействием разнообразных процессов старения: изнашивания, коррозии, эрозии, усталостного разрушения металлов, наростообразования и т. п. Внешне подобные процессы проявляются в виде соответствующих повреждений. Так, изнашивание характеризуется износом, коррозия — коррозионными разрушениями поверхности, усталость металла — трещинами, наростообразование — увеличением слоя отложений и т. д. В свою очередь от степени повреждения зависят те или иные диагностические параметры машины или ее элементов, т. е. контролируемые признаки, которые характеризуют уровень технического состояния в любой момент времени. Допустимые пределы изменения диагностических параметров, необходимые для оценки уровня технического состояния, соответствуют понятию о предельном состоянии.

Исходными данными для определения и оценки долговечности являются результаты измерений или моделирования соответствующих диагностических параметров машин и их элементов, например, износы подшипников вала.

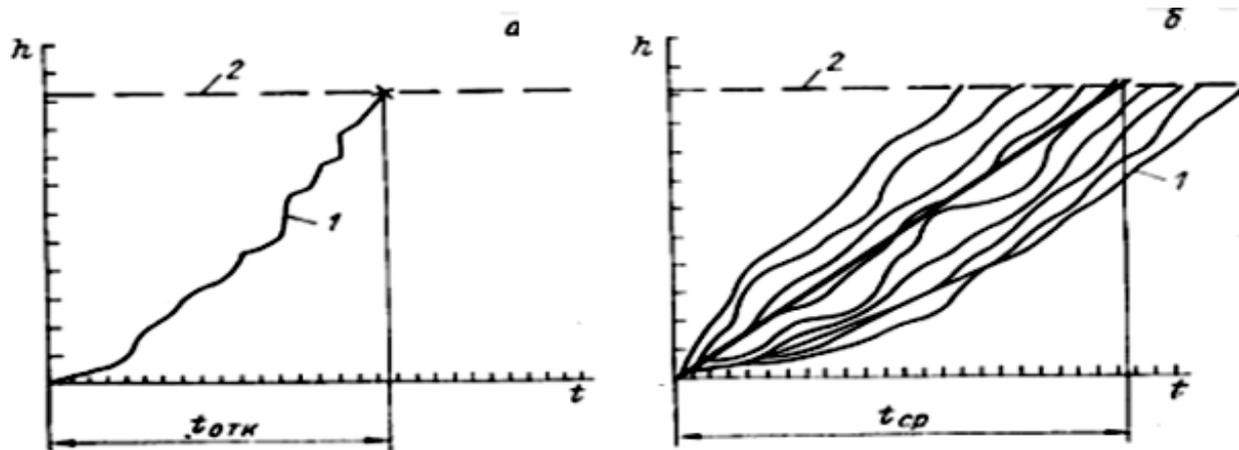


Рис. 1-1 Схема образования повреждения одного объекта (а) и множества однородных объектов (б): $t_{отк}$ — наработка до повреждения; $t_{ср}$ — средняя наработка до повреждения

На рис. 1-1а показана принципиальная схема образования повреждения из-за изнашивания подшипника. Возрастающая ломаная линия обозначает процесс изнашивания (линия изнашивания), а горизонтальная прямая линия 2 — предельно допустимый износ (линия предельно допустимого износа). Точка пересечения этих линий соответствует фактическому ресурсу исследуемого объекта.

Линия изнашивания на рис. 1-1а построена только для одного конкретного подшипника путем периодического измерения глубины истертого слоя через определенные промежутки времени (например, через месяц). Рассматриваемый график для одного объекта не представляет большого интереса для практики, поскольку он отражает уже прошедший период эксплуатации. Чтобы заблаговременно установить нормативный ресурс элемента изделия, необходимо исследовать не один, а много одинаковых объектов (рис. 1-1б).

Очевидно, что линии изнашивания для разных объектов не совпадут, поскольку эти объекты различались не только качеством материала и размерами (в пределах технологических допусков), но и условиями эксплуатации. В частности, имеют значение режимы работы, климатические условия, наработка за год и даже трудовая дисциплина обслуживающего персонала.

Поэтому на графике (рис.1-1б) показано некоторое семейство кривых изнашивания, что говорит о вероятностной природе этого процесса, как, впрочем, и любого процесса деградации. Методы математической статистики позволяют провести среднюю линию, которая будет проходить через точки математических ожиданий износа при различных наработках. Построение такой средней линии или обоснование ее формулы имеет большое практическое значение.

В частности, по точке пересечения средней линии изнашивания с линией предельного износа можно установить средний ресурс объекта. Средняя линия изнашивания набора дейдвудного подшипника из древесно-слоистого пластика характеризуется формулой

$$t = Jsr H, \quad (1.7)$$

где t — наработка, в течение которой узел изнашивается на величину H , тыс. ч
 J_{sr} — средняя износостойкость узла трения, тыс. ч/мм; H — рассматриваемый износ, мм;

Износостойкость является случайной величиной, рассеивание которой относительно среднего значения J_{sr} характеризуется коэффициентом вариации V .

Предельно допустимое изменение зазора в дейдвудном подшипнике можно оценить по формуле из правил Регистра:

$$Hd = 0,012 D, \quad (1.8)$$

где D — диаметр гребного вала, мм.

Путем обработки статистических данных об износостойкости подшипников большого числа дейдвудных устройств было установлено, что $J_{sr} = 10$ тыс. ч/мм при коэффициенте вариации $V = 0.523$. Тогда, для гребного вала диаметром 320 мм имеем предельно допустимый износ $Hd = 0.012 \cdot 320 = 3.84$ мм и средний ресурс $t_{cp} = 3.84 \cdot 10 \approx 38$ тыс. ч. При этом наблюдается рассеивание ресурсов отдельно взятых дейдвудных подшипников относительно среднего ресурса с тем же самым коэффициентом вариации ресурса $V_t = V = 0.523$.

С помощью среднего ресурса можно решать некоторые практические задачи, например, нормирование расхода запасных частей для рассматриваемого изделия. Однако для обеспечения безопасности эксплуатации такой показатель является вспомогательным параметром.

1.4.2. Гамма-процентный ресурс элемента

Предположим, что средний ресурс дейдвудного подшипника $t_{cp} = 38$ тыс. ч принят за норму периодичности его освидетельствования. Это значит, что после такой наработки мы обязаны поставить судно в док, демонтировать гребной вал и обмерить подшипник. Можно не сомневаться в том, что в этом случае износ более 50 % подшипников к этому сроку превысят предельно-допустимую величину. Из графика на рис. 1-2 следует, что износ некоторых подшипников может превысить допустимый износ в несколько раз. Едва ли можно признать нормальной и безопасной для мореплавания ситуацию, когда норма предельного износа превышена на каждом втором объекте. При этом не исключены аварийные случаи из-за отказов дейдвудного устройства.

Чтобы снизить вероятность отказов в межремонтный период эксплуатации подобных ответственных объектов, необходимо определить функцию распределения вероятности не достижения предельного состояния $\gamma(t)$ и с ее помощью назначить нормативные ресурсы по так называемому гамма-процентному ресурсу $R(\gamma)$, а не по среднему ресурсу. Методы и программы расчета параметров распределений будут подробно изучаться в последующих разделах книги. Здесь важно дать первое упоминание об этих понятиях для постановки основной цели анализа надежности.

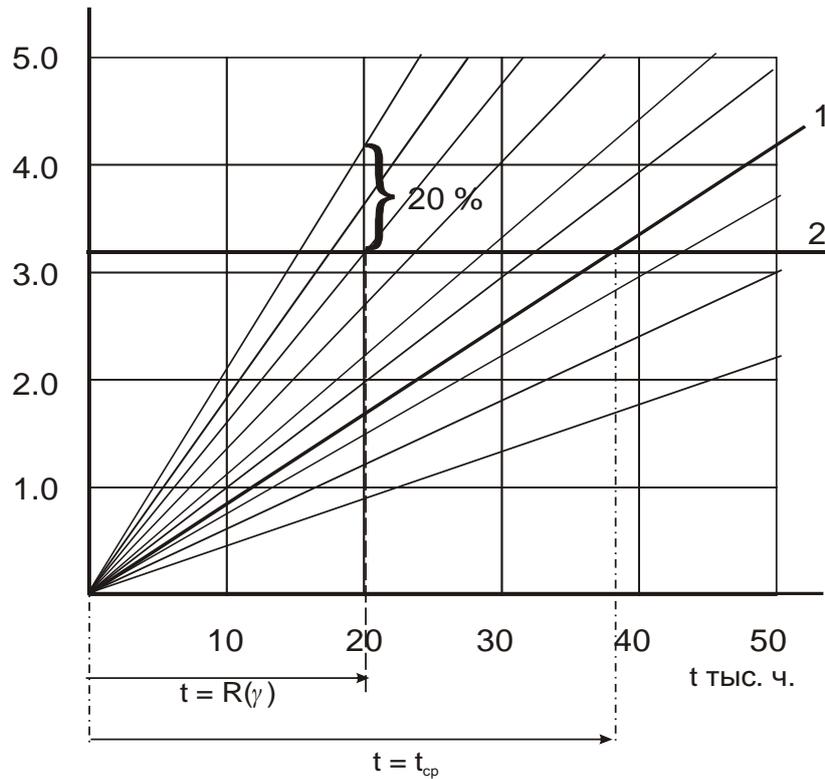


Рисунок 1-2. Рассеивание износостойкости: 1 — средняя линия изнашивания, 2 — линия предельного износа

Напомним, что согласно ГОСТ 27.002-89 гамма-процентный ресурс — это наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Из этого определения следует, что величину $\gamma(t)$ можно еще назвать вероятностью не достижения предельного состояния. Очевидно, что противоположное событие называется вероятностью достижения предельного состояния:

$$F(t) = 1 - \gamma(t), \quad (1.9)$$

если $F(t)$ выразить в долях единицы.

Для определения функции $\gamma(t)$ следует учитывать рассеивание значений ресурсов конкретных объектов относительно среднего значения, что будет показано во второй и третьей главах этой книги.

С помощью этой функции можно определить как гамма-процентный ресурс, так и вероятность достижения предельного состояния. Например, 80 % - ный ресурс в данном случае составит около 20 000 часов. Принцип решения этой задачи показан на графиках рис. 2-4 (стр. 53).

Таким образом, если мы назначим нормативный ресурс изделия по 80 % - ному ресурсу его элемента, то к моменту ремонта через 20 000 ч только 20 % изделий достигнут и немного превысят уровень предельного состояния.

1.4.3. Физическая сущность понятия предельного состояния

В инженерных расчетах чаще всего используются 50 %, 80 %, 90 % и 95 % - ные ресурсы машин, т. е. допустимая вероятность достижения предельного

состояния, соответствует диапазону вероятностей достижения предельного износа от 50 до 5 процентов. Поэтому иногда считают, что использование в качестве норматива таких значений γ может привести к недопустимо большой вероятности отказа.

Это утверждение нельзя признать корректным, прежде всего потому, что имеется принципиальное различие в понятиях «вероятность достижения предельного состояния» и «вероятность отказа». Иначе говоря, достижение предельного состояния не обязательно означает возникновение отказа в эксплуатации, причина здесь кроется в самом понятии предельного состояния и методах его определения.

Согласно ГОСТ 27.002-89, под предельным состоянием объекта понимается такое состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за нарушения требований безопасности, неустранимого выхода заданных параметров за установленные пределы, снижения эффективности эксплуатации ниже допустимого уровня, необходимости проведения среднего или капитального ремонта. При этом признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией.

При определении критериев предельного состояния целесообразно учитывать, что изменение технического состояния элементов может иметь последствия двух видов: снижение несущей способности деталей или снижение эффективности машины из-за ухудшения диагностических параметров

В общем случае критерии предельного состояния могут устанавливаться путем исследования либо несущей способности, либо диагностического параметра. При установлении критериев предельного состояния по диагностическим параметрам неизбежен субъективный подход. Если предложить какой-либо группе специалистов определить износы, которые они считают предельно допустимыми, то их ответы наверняка будут заметно различаться, и мы получим ряд случайных величин со своим математическим ожиданием и дисперсией. При таком подходе (назовем его экспертным) критерий предельного состояния будет иметь вероятностную природу. Тот же результат получим и при более строгом обосновании критериев предельного состояния с учетом экономических, эргономических, эстетических и любых других факторов, поскольку каждый из этих факторов также имеет вероятностную природу.

Обратимся к наиболее опасным деградиационным процессам, приводящим к потере несущей способности деталей машин. Эти процессы обычно можно описывать одной из двух моделей повреждения — прочностной или износостойкой.

Прочностная модель описывает изменение (уменьшение) разрушающих напряжений до величины действующих напряжений. При рассмотрении износостойкой модели исследуют изменение износа до предельного значения. Для прогнозирования ресурсов и для контроля технического состояния рекомендуется всегда, когда возможно, использовать износостойкую модель, поскольку процесс изнашивания легче контролировать при эксплуатации доступными средствами измерений.

Если же построить износостойкую модель не представляется возможным, то приходится для прогнозирования ресурса применять прочностную модель.

Для демонстрации принципа формирования критериев предельного состояния

при износе представим себе трубу с начальными диаметрами D (внешний диаметр) и d (внутренний диаметр). По трубе под рабочим давлением G прокачивается абразивная жидкость, изнашивающая стенки трубы, со скоростью v . По мере изнашивания толщина стенки будет уменьшаться в соответствии с простой формулой

$$H(t) = vt, \quad (1.10)$$

где t — текущее время, тыс. ч; $H(t)$ — износ стенки на сторону за время t , мм.

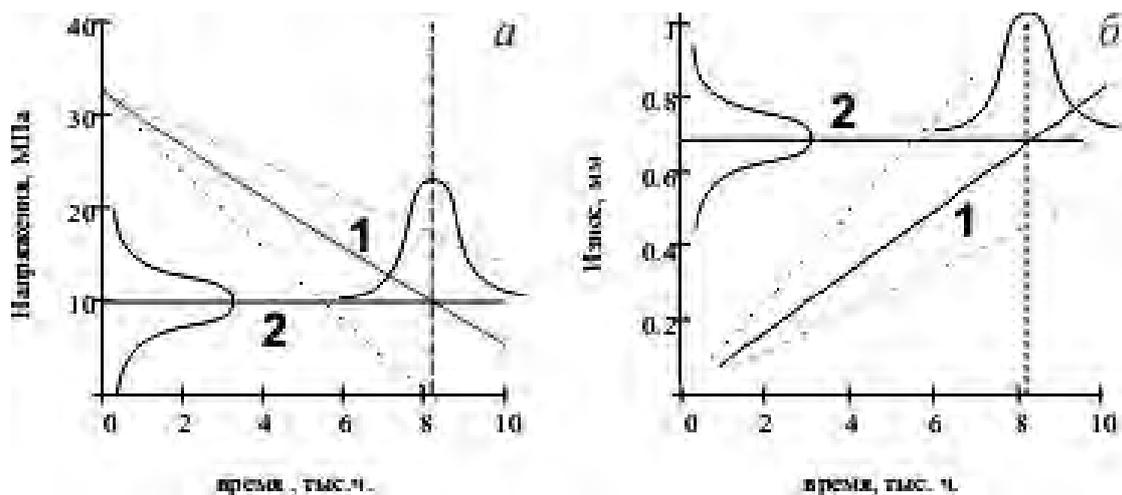


Рисунок 1-3 Модели изнашивания трубы абразивной жидкостью: а — прочностная модель; б — износная модель, пунктирные линии — доверительные границы

В свою очередь уменьшение толщины стенки будет приводить к уменьшению предельного давления G_{np} до величины, при которой полностью исчерпывается несущая способность стенки и образуется свищ. Согласно [20]

$$G_{np} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{D}{d + 2vt}\right), \quad (1.11)$$

где σ_T — предел текучести материала, МПа.

Прочностная модель данного процесса старения показана на рис. 1-3а, где плавно убывающая линия обозначает предельное давление G_{np} (несущую способность), а прямая 2 — рабочее давление при эксплуатации.

Вероятностный характер предельного давления в трубе объясняется тем, что при эксплуатации различных труб невозможно создать абсолютно одинаковые режимы работы потока воды, а свойства материала и начальных размеров объекта имеют определенное рассеивание из-за неизбежной нестабильности технологии изготовления труб. Однако, прочностная модель неудобна для практики, поскольку мы не можем контролировать величину G_{np} . Для этого

следовало бы через определенные промежутки времени испытывать материал трубы на разрыв, что невозможно.

$$Nd = \left[\frac{D}{\exp\left(\frac{G_{np}\sqrt{3}}{\sigma_T}\right)} - d \right] \frac{1}{2v} . \quad (1.12)$$

В данном случае проще использовать так называемую износую модель, т. е. зависимость фактического износа H от времени (линия 1 на рис.1-3б). В этом случае предельный износ можно оценить по формуле (1.12). Как видим величина предельного износа также имеют вероятностную природу, поскольку все компоненты формулы (1.11) также случайны по указанным выше технологическим и эксплуатационным причинам. Таким образом, величина, характеризующая предельное состояние, является случайной. Это значит, что она имеет свое математическое ожидание и коэффициент вариации и должна подчиняться законам теории вероятности и математической статистики.

Предельное состояние, соответствующий его математическому ожиданию, можно назвать критическим [20]. При достижении критического уровня вероятность возникновения фактического отказа очень велика — более 50 %. Поэтому в качестве норматива приходится выбирать значение, которое в несколько раз меньше критического уровня. Эту величину предлагается назвать назначенным уровнем предельного состояния, которую обычно включают в техническую документацию в качестве норматива для изделия.

Можно показать, что при достижении назначенного уровня вероятность отказа объекта будет значительно меньше, чем при достижении критического уровня.

На рис. 1-4 приведена таблица расчета вероятности (в процентах) достижения предельного уровня в математическом редакторе MATHCAD при следующих условиях: случайные значения уровня предельного состояния распределены по нормальному закону с максимальным для данного случая коэффициентом вариации $V = 1/3$, а назначенный уровень меньше критического в K раз.

Мы видим, что при коэффициенте $K = 1$ (когда никакого запаса надежности не имеется) вероятность отказа достигает 50 %. При введении двойного запаса эта вероятность резко падает до 6.7 %, а при $K = 3$ она составляет уже $F = 2.3$ %.

Таковы будут вероятности отказа, если к заданному моменту все изделия выборочной совокупности достигнут предельного уровня.

Но этого мало — при наработке, равной гамма - процентному ресурсу, назначенного уровня предельного состояния достигнут не все, а только $(100 - \gamma)$ % изделий. Это значит, что фактическая вероятность отказов Fg будет еще меньше, поскольку она определяется по формуле

$$Fg = F \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right). \quad (1.13)$$

$\gamma := 80\% \quad V = 0.333 \quad F_i := 1 - \frac{1 - \frac{1}{k_i}}{V} \quad F_{B_i} := (1 - \gamma) \cdot F_i$						
m =	"k"	1	1.5	2	2.5	3
	"F"	50	15.866	6.681	3.593	2.275
	"F80"	10	3.173	1.336	0.719	0.455
	"F95"	2.5	0.793	0.334	0.18	0.114

Рисунок 1-4 Результаты расчета вероятности достижения предельного уровня в процентах

Из таблицы на рис. 1-4 следует, что для износных отказов при 80 % - ном ресурсе и двойном запасе надежности вероятность достижения предельного износа составит всего 1.3 %. Для усталостных повреждений при 95 % - ном ресурсе и тройном запасе надежности вероятность обнаружения повреждения составит 0.11 %, которая на порядок меньше предыдущей величины. Это позволяет обеспечить вероятность не достижения предельного уровня, равную 99,89 %.

Итак, на приведенном выше условном примере мы показали, что благодаря введению в предельное состояние запаса надежности, достижение назначенного уровня предельного состояния соответствует весьма небольшой вероятности возникновения отказа в эксплуатации.

Следует признать, что на практике еще редко применяют рассмотренные понятия о запасе надежности и учитывают вероятностную природу деградиационных процессов и предельных состояний. Но опыт эксплуатации многочисленной и разнообразной техники во всех отраслях промышленности и транспорта показывает, что запасы надежности обычно интуитивно закладываются в предельное состояние. Во всяком случае, отказы из-за износных и других контролируемых процессов старения встречаются относительно редко; обычно приходится сталкиваться с недопустимыми постепенными неконтролируемыми отказами, например с усталостными разрушениями. Неправомерность возникновения таких отказов в эксплуатации лишний раз подтверждает необходимость гарантировать высокую безотказность изделия за счет введения гамма - процентных ресурсов с учетом требуемого запаса надежности. С другой стороны, вероятностная природа предельного состояния свидетельствует о наличии резерва повышения долговечности изделия за счет изучения и корректировки критериев предельного состояния.

1.5. Выбор показателей надежности

В основе анализа надежности изделия судовой техники лежит оценка уровня безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости изделий с помощью соответствующих показателей, регламентированных ГОСТ 27.002-89. Выбор минимальной, но достаточной для решения практических задач номенклатуры показателей надежности, имеет большое значение, как для проектирования, так и для эксплуатации машин, механизмов, приборов и других изделий. От правильного выбора номенклатуры показателей во многом зависит снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты, а также эффективность борьбы за повышение качества судов в целом. Поэтому при выборе номенклатуры показателей надежности следует учитывать интересы потребителя, например морского, речного и рыбопромыслового флотов.

Количество и перечень показателей, включаемых в номенклатуру, целесообразно устанавливать с учетом ряда факторов: назначения изделия; стратегии ремонтов и технического обслуживания (плановые, по потребности, при возникновении отказов и т. п.); влияния безотказности изделия на безопасность мореплавания судна или на самочувствие экипажа; возможности регистрации наработки в судовой документации; особенности системы сбора информации и др. Для примера рассмотрим рекомендации, которые использовались при разработке требований к надежности судов и судового оборудования флота рыбной промышленности.

Наиболее сложная номенклатура показателей надежности применялась для машин и механизмов, которые в течение своего срока службы должны проходить ремонты и техническое обслуживание нескольких видов. В этом случае используются все группы показателей: долговечности, безотказности, ремонтпригодности и комплексные.

1.5.1. Показатели долговечности машин и механизмов.

Для рассматриваемых ремонтируемых изделий первостепенное значение имеют показатели долговечности, к которым относятся срок службы и ресурсы до ремонтов и списания. В ГОСТ 27.002-89 рекомендуются средние, назначенные и гамма-процентные ресурсы, но не указаны условия применения каждого из них. На практике существуют различные мнения о правилах выбора показателей долговечности и поставщики различного оборудования по-разному решают этот вопрос. Например, известны рекомендации применять для ВРШ и других движителей средние ресурсы, тогда как для судовых дизелей, согласно ГОСТ 10150-73, следует применять назначенные ресурсы до различных видов ремонта. Заметим, что гребной винт и дизель при установке на судне образуют единую систему — силовую (пропульсивную) установку. Поэтому подобное несоответствие в выборе вида ресурса нельзя признать нормальным явлением. Следовательно, возникает необходимость разобраться, в каких случаях надо применять средний ресурс, а в каких — назначенный или гамма-процентный.

При разработке требований к надежности судового оборудования, устанавливаемого на судах флота рыбной промышленности, использовались следующие соображения. Если машина или механизм предназначены для работы в условиях

планово-предупредительной системы ремонтов и обслуживания, то потребитель должен быть уверен, что любой образец этой машины в заданных условиях эксплуатации безотказно отработает установленные в нормативно-технической документации ресурсы. Очевидно, это утверждение не должно вызывать возражений, тем более, что при авариях машин превышение нормативных ресурсов рассматривается органами технадзора как грубое нарушение правил эксплуатации, и судовые механики несут строгое наказание. Поэтому для таких машин и механизмов следует применять только назначенные ресурсы в соответствии с ГОСТ 27.002-89.

В случае применения для рассматриваемых машин понятия «средний ресурс» значения фактических ресурсов могут быть как больше, так и меньше средних значений. При этом более 50 % изделий заведомо не выработают среднего ресурса, но ответственности за это неблагоприятное для судовладельца явление поставщик изделия нести не будет. Эксплуатирующая организация при использовании среднего ресурса лишается права предъявлять какие-либо претензии в связи с преждевременным выходом из строя наиболее ответственных деталей машины. Такое положение наносит большой вред, так как устраняется основной фактор, стимулирующий повышение качества машин и механизмов.

Как будет показано, назначенные ресурсы могут быть обоснованы двумя способами. Первый способ основан на изучении потенциальных отказов (повреждений) и определении гамма-процентных ресурсов элементов машин. Назначенный ресурс считается подтвержденным, если гамма-процентный ресурс всех деталей будет больше назначенного. Второй способ заключается в определении средней фактической наработки изделия до ремонта и установлении показателей, характеризующих уровень безотказности изделия и его элементов. Средняя наработка до ремонта принимается за назначенный ресурс до этого ремонта, если уровень безотказности изделий за этот период не выйдет за установленные пределы.

Показатель «средний ресурс до ремонта» можно применять для тех изделий, сроки ремонта которых не зависят от сроков ремонта судна в целом и определяются либо на основании безразборной диагностики технического состояния для всех без исключения процессов деградации, либо в связи с возникновением отказов. При этом для оценки фактических ресурсов до ремонтов и технического обслуживания желательно знать коэффициент вариации наработки до предельного состояния. Поэтому при выборе показателя долговечности подобных изделий следует отдать предпочтение не среднему, а гамма-процентному ресурсу. С помощью этого показателя можно одновременно судить и о безотказности изделия, поскольку понятия о повреждении и фактическом отказах в этом случае совпадают. Такой показатель, в частности, применяется для оценки долговечности элементов систем автоматики.

Существуют также два следующих способа определения средних и гамма-процентных ресурсов рассматриваемых изделий. Первый способ заключается в определении фактических значений среднего и гамма-процентного ресурса с помощью опытного распределения фактических наработок до ремонтов и технического обслуживания. Второй способ предусматривает предварительное

установление распределений долговечности для каждого вида повреждения с последующим получением суперпозиции из этих распределений. Отметим, что решить эту задачу без применения ЭВМ практически невозможно.

Наряду с ресурсами, в перечень показателей долговечности (ГОСТ 27.002-89) входят сроки службы до ремонтов и списания. Сроки службы целесообразно применять для судна в целом и его элементов, а также для тех изделий, для которых не предусмотрена регистрация наработки в судовой документации. В частности, этими показателями целесообразно оценивать долговечность изделий, когда их техническое состояние ухудшается не столько во время выполнения рабочих операций, сколько под влиянием естественных (природных) процессов старения: коррозии, испарения, загрязнения, химических воздействий и т. п.

1.5.2. Показатели безотказности

Поскольку система ППР и ППО предназначена для предотвращения отказов во время эксплуатации, уровень безотказности лучше всего характеризуется фактическими отказами: чем меньше таких отказов и убытков от них, тем выше уровень безотказности изделий.

Существует мнение, что единственными показателями безотказности для рассматриваемых изделий являются наработка на отказ и вероятность безотказной работы. Это утверждение не вызвало бы возражений, если бы у сложного ремонтируемого изделия наблюдались отказы только одного вида. В действительности, однако, дело обстоит иначе. Например, опыт эксплуатации судовых дизелей показывает, что у них возникают отказы разных видов: выход из строя топливной аппаратуры, подплавление подшипников, пропуск газов из-под крышки цилиндров, поломка тахометра и даже разрушение коленчатого вала. Все эти отказы не равноценны; так, если трубку высокого давления можно заменить за полчаса, то ремонт двигателя из-за поломки коленчатого вала потребует больше недели.

Таким образом, наработка на отказ характеризует некоторый средний уровень безотказности за отчетный период наблюдения и несет в себе мало информации о последствиях отказов сложной машины. По тем же причинам вероятность безотказной работы не всегда объективно отражает уровень безотказности машин в целом. Когда говорят о вероятности безотказной работы, имеют в виду цифры 0.999, 0.90 или, в крайнем случае, 0.8. Между тем за период между ремонтами и техническим обслуживанием различного рода вероятность безотказной работы принимает значительно меньшие значения. Например, при наработке на отказ дизеля 500 ч вероятность безотказной работы за 650 ч (периодичность технического обслуживания) составит всего $P = \exp(-650/500) = 0.272$, а за 5000 ч составит $P = \exp(-5000/500) = 0.000045$. Однако это еще не значит, что изделие имеет низкую надежность. Вполне закономерно заменять два раза в месяц элементы фильтра или распылитель форсунки, но совершенно недопустима поломка коленчатого вала даже один раз за пять лет.

Показатель вероятности безотказной работы необходимо применять для тех изделий судовой техники, к которым предъявляются повышенные требования безотказности за время (обычно непродолжительное) выполнения ответственной

рабочей операции. Это относится, в частности, к спасательным и пожарным средствам, грузоподъемным устройствам и т. п. Показатель вероятности безотказной работы необходим также для оценки уровня надежности деталей и узлов сложных изделий с учетом последствия отказа [20].

Наиболее информативным показателем, характеризующим уровень безотказности любых изделий техники, и прежде всего ремонтируемых, является коэффициент готовности (комплексный показатель), который учитывает относительное время суммарных простоев из-за отказов в эксплуатации, т. е. последствия отказов. Формула этого показателя приведена в табл. 4.1 на стр. 142. Интересно отметить, что этот показатель не так чувствителен к качеству сбора информации, как, например, наработка на отказ, поскольку на его значение в большей мере влияют отказы, характеризующиеся наибольшим временем восстановления.

Проиллюстрируем это следующим примером. Один из двигателей внутреннего сгорания имел наработку на отказ 670 ч и коэффициент готовности 0.9926. После того, как из таблицы, в которой рассчитывались эти показатели, исключили сведения об отказах топливной аппаратуры, наработка на отказ увеличилась до 1580 ч, а коэффициент готовности практически не изменился (0.99295), так как время восстановления топливной аппаратуры, несмотря на большое количество ее отказов, составило всего 5 % суммарного времени простоев из-за отказов.

Это свойство коэффициента готовности имеет очень большое значение для практики, поскольку трудно ожидать, что при сборе информации будут учтены все без исключения отказы. Однако полнота сведений об отказах наиболее ответственных деталей и узлов обычно гарантирована.

1.5.3. Показатели ремонтпригодности

Очевидно, что показатели ремонтпригодности должны выбираться только для восстанавливаемых изделий.

ГОСТ 27.002-89 рекомендует два показателя ремонтпригодности: вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления. Для судовой техники чаще всего ограничиваются вторым показателем, который наиболее полно характеризует ремонтпригодность изделий, если они проходят ремонты или техническое обслуживание во время нахождения судна в море.

Для изделий, ремонтируемых во время общего ремонта судна, определить этот показатель практически невозможно, поскольку время ремонта изделия значительно перекрывается временем простоя судна в ремонте, а составные части изделия восстанавливаются в различных цехах судоремонтного предприятия. Поэтому ремонтпригодность в таких случаях более правильно оценивать с помощью показателей: трудоемкость технического обслуживания и трудоемкость ремонта (по видам ремонтов и технического обслуживания). Для их определения необходимо устанавливать перечни работ при каждом ремонте (техническом обслуживании) и использовать нормы времени на выполнение этих работ.

Другой способ расчета трудоемкости ремонтов и технического обслуживания заключается в обработке статистической информации о фактических объемах ремонта, получаемых из отчетной документации.

1.5.4. Комплексные показатели надежности

Для судна в целом наиболее важными комплексными показателями надежности являются коэффициент технического использования и удельная суммарная трудоемкость ремонтов и технического обслуживания. Кроме того, для оценки последствий аварийных отказов на флоте рыбной промышленности, например, использовался коэффициент готовности (см. табл. 4.1)..

Для восстанавливаемых изделий, которые ремонтируются только в судовых условиях, целесообразно применять те же показатели, что и для судна в целом. Однако, если машина или механизм ремонтируется во время планового ремонта судна, то коэффициент технического использования определить трудно, поскольку время ремонта механизма перекрывается ремонтным временем простоя судна. Для таких механизмов и машин можно предложить другой показатель — коэффициент технического обслуживания, равный отношению суммарного времени на техническое обслуживание в судовых условиях к суммарной наработке за один и тот же период эксплуатации.

Наиболее полно такие изделия характеризуют комплексные показатели: удельная суммарная трудоемкость ремонтов и удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания. В номенклатуру показателей надежности всех изделий рекомендуется включать коэффициент готовности, который, как уже было сказано, необходим для оценки последствий отказов в эксплуатации. Выбирая комплексные показатели надежности, следует иметь в виду, что они объективно отражают надежность объекта лишь в том случае, если рассматриваются затраты за весь срок службы изделия до списания.

Удельную суммарную стоимость ремонтов и технического обслуживания применять также целесообразно. Однако использование этого показателя затрудняется значительным разбросом стоимости ремонтов на различных ремонтных предприятиях, особенно из-за различной стоимости запасных частей.

1.5.5. Таблица для определения показателей надежности машин

На основе приведенных выше обоснований предлагается таблица-определитель (табл. 1.2), которая позволяет устанавливать номенклатуру показателей надежности для любых изделий, например, судовой техники.

В таблице приняты следующие сокращения для обозначения сроков ремонта: ППР - в соответствии с системой планово-предупредительных ремонтов; ППО - в соответствии с системой планово-предупредительных осмотров; ТД — только с помощью средств безразборной диагностики; Отк. — ремонт или техническое обслуживание, выполняемое после возникновения явных отказов.

Выбранный из табл. 1.2 показатель можно включать в номенклатуру в том случае, если всем признакам, характеризующим изделие, соответствует знак плюс. Если хотя бы один признак отмечен знаком минус, то рассматриваемый показатель не относится к данному изделию.

Например, необходимо определить показатель надежности для вспомогательного двигателя, работающего в условиях систем ППР и ППО. Ведется учет наработки при эксплуатации. В табл. 1.2 находим, что знаком плюс отмечены признаки: «ремонтируемое изделие», «ППР», «ППО» и «учет наработки» («да»).

Тогда в номенклатуру показателей надо включить следующие показатели: назначенный (нормативный) ресурс до списания; назначенный (нормативный) ресурс до капитального (среднего) ремонта; назначенный ресурс непрерывной работы; коэффициент технического обслуживания, коэффициент готовности; наработка на отказ; удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания и удельная суммарная трудоемкость ремонтов. Рекомендуем убедиться в том, что средний ресурс до капитального (среднего) ремонта не относится к номенклатуре рассматриваемого изделия, так как против этого показателя в графе ППР и ППО стоит знак минус.

Таблица 1.2

Таблица для выбора номенклатуры показателей надежности машин

Показатели надежности	Изделие		Способ установления срока						Учет наработки	
	Перемоти- руемое	Ремонт- руемое	ремонта			технического обслуживания			Да	Нет
			ППР	Т Д	Отк	ППО	ТД	Отк		
1. Назначенный (нормативный) срок службы до списания, лет	-	+	+	—	—	+	+	+	—	+
2. Назначенный (нормативный) срок службы до капитального (среднего) ремонта	—	+	+	—	—	+	+	—	—	+
3. Назначенный (нормативный) ресурс до списания, тыс. ч	—	+	+	—	—	+	+	+	+	—
4. Назначенный (нормативный) ресурс до капитального (среднего) ремонта тыс. ч	—	+	+	—	—	+	+	+	+	—
5. Средний ресурс до списания, тыс. ч	+	+	—	+	+	—	+	+	+	—
6. Средний ресурс до капитального (среднего) ремонта, тыс. ч	—	+	—	+	—	—	+	+	+	—
7. Назначенный (нормативный) ресурс непрерывной работы, тыс. ч	—	+	+	—	—	+	—	—	+	—
8. Средний ресурс непрерывной работы, тыс. ч	—	+	—	+	+	—	+	+	+	—
9. Средний срок службы до списания, лет	+	+	—	+	+	—	+	+	—	+
10. Средний срок службы до капитального (среднего) ремонта, лет	—	+	—	+	+	—	+	+	—	+
11. Вероятность безотказной работы	+	—	—	—	—	—	—	—	+	+
12. Нарботка на отказ, ч	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
13. Коэффициент технического обслуживания	—	+	+	—	—	+	+	—	+	—
14. Коэффициент готовности	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15. Гамма-процентный ресурс, тыс. ч	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
16. Средняя наработка до отказа, ч	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
17. Гамма-процентный срок службы, тыс. ч	+	—	—	—	—	—	—	—	—	+
18. Удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания чел.-ч/тыс. ч	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
19. Удельная суммарная трудоемкость ремонтов, чел.-ч/тыс. ч	—	+	+	+	—	+	+	+	+	+

Для изделий, которые должны иметь повышенный уровень безотказности и по условиям эксплуатации большую часть календарного времени находиться в режиме ожидания, номенклатура может быть дополнена таким показателем, как вероятность безотказной работы за время выполнения рабочей операции (это относится, в частности, к пожарному насосу, брашпилю и т.п.).

1.5.6. Показатели надежности элементов изделий

При обосновании рассмотренных выше показателей, а также при разработке мероприятий по повышению надежности изделий необходимо анализировать уровень безотказности и долговечности элементов (деталей и узлов). Эту задачу можно решить с помощью следующих показателей надежности элементов изделий. Если ремонты и техническое обслуживание изделий выполняются по потребности (при возникновении отказов или на основании диагностирования), то для анализа надежности элементов изделия достаточно иметь такие показатели: среднюю наработку до отказа, наработку на отказ, вероятность безотказной работы элемента и гамма-процентный ресурс.

Для машин и механизмов, техническое состояние которых должно поддерживаться с помощью систем ППР и ППО, целесообразно использовать две группы показателей. Показатели первой группы определяются с помощью данных о фактических отказах. К этим показателям относятся наработка на отказ и вероятность безотказной работы. При этом вероятность безотказной работы должна определяться за время, равное назначенному ресурсу до того вида ремонта, при котором исследуемый элемент должен проходить первую ревизию. Вторая группа содержит два равнозначных показателя, которые определяются с помощью распределения долговечности деталей для повреждений различных видов. В эту группу входят гамма-процентный ресурс и вероятность достижения предельного состояния. Последний показатель следует определять за время, равное назначенному ресурсу до соответствующего вида ремонта, при котором элемент должен проходить первую ревизию.

Методы и программы расчета указанных параметров будут изучаться в последующих разделах этой книги. Кроме рассмотренных вероятностных показателей надежности, при изучении повреждений необходимо применять некоторые показатели, характеризующие физическую природу отказов, которые можно назвать показателями обеспечения надежности. К ним относятся запас надежности и запас долговечности.

Запас надежности — это отношение уровня предельного состояния к математическому ожиданию величины, характеризующей текущее состояние (степень повреждения) элемента в рассматриваемый момент времени. Например, запасом надежности при изнашивании подшипника будет отношение предельно допустимого износа к математическому ожиданию текущего износа после заданной наработки.

Запас долговечности — это отношение математического ожидания наработки до предельного состояния к наработке в рассматриваемый момент времени.

Эти понятия положены в основу вероятностного моделирования износостойкости (глава 5 книги).

1.6. Нормы надежности техники

Для оценки уровня надежности изделий и обоснования нормативов ремонтов необходимы критерии, характеризующие допустимые или требуемые значения показателей надежности, которые можно назвать нормами надежности.

В каждой отрасли промышленности применяются свои нормы надежности,

которые разрабатываются с учетом особенностей устройства и условий эксплуатации оборудования. Для примера рассмотрим нормы, которые разрабатывались автором данного труда в семидесятых годах прошлого столетия для отечественного флота рыбной промышленности.

1.6.1. Нормы надежности для судна в целом

Требуемые сроки службы судна до списания на стадии проектирования рекомендовалось назначать на основании норм амортизационных отчислений Госплана СССР. В зависимости от размеров судна нормативные сроки службы до списания обычно составляли 18 лет, 23 или 24 года.

Требуемые сроки службы судна до основных видов ремонта зависят от принятой организации эксплуатации в каждой отрасли промышленности. Например, суда флота рыбной промышленности ставились в капитальный ремонт через 10—12 лет, а средние ремонты выполнять через 4 — 6 лет. При этом предусмотрены доковые освидетельствования и ремонты через один - два года (в зависимости от условий эксплуатации). Кроме крупных заводских ремонтов принято выполнять межрейсовое техническое обслуживание, периодичность которого зависит от продолжительности рейсов и от нормативных ресурсов изделий судовой техники первого и второго классов и, прежде всего, главных двигателей, гребных и рулевых устройств.

Целесообразно сроки заводских ремонтов судна совмещать с пятилетней периодичностью очередных освидетельствований судов по правилам морского регистра судоходства.

Ввиду того что сроки и объемы ремонтов могут изменяться в зависимости от принятой организации эксплуатации, надежность судна целесообразно также оценивать с помощью комплексного показателя — коэффициента технического использования. Для крупнотоннажных транспортных судов этот показатель может иметь наибольшие значения: 0.85...0.9. Коэффициент технического использования большинства средне- и крупнотоннажных судов промыслового флота составляли в среднем 0.75, а малотоннажных — 0.7. Столь низкие значения можно объяснить насыщенностью таких судов энергоемким промысловым, технологическим и холодильным оборудованием, а также сложностью другой судовой техники (многомашинные дизель-редукторные агрегаты, винты регулируемого шага, поисковая техника и т. п.). Кроме того, суда промыслового флота эксплуатируются в более тяжелых условиях, что объясняется спецификой их производственной деятельности. Уровень безотказности судна в целом рекомендуется оценивать с помощью коэффициента готовности, с учетом только отказов третьего и четвертого классов или аварийных отказов по техническим причинам. По опыту эксплуатации судов флота рыбной промышленности коэффициент готовности не должен превышать 0.995, что соответствует 1.5 суткам простоя в год (в среднем на каждое судно).

1.6.2. Нормы надежности для машин и механизмов

Назначенные и средние ресурсы, а так же сроки службы машин и механизмов не должны быть ниже значений, достигнутых на лучших изделиях-аналогах. Норму рекомендуется устанавливать путем анализа технических условий на

поставку и другой конструкторской и эксплуатационной документации. Если ресурсы и сроки службы устанавливаются впервые, можно руководствоваться следующим. Назначенные сроки службы и ресурсы до списания должны соответствовать срокам службы судна до списания или до одного из капитальных ремонтов (больших или малых). Исходя из этого, можно рекомендовать такие варианты требуемых сроков службы изделий до списания (не менее): 24, 12 и 6 лет; 24, 8 и 4 года; 18, 9 и 4.5 года; 18, 6 и 3 года.

За требуемый срок службы до списания можно выбрать одно из приведенных значений с учетом достигнутого уровня долговечности аналогичных изделий и типов судов, на которые предполагается их устанавливать.

Для машин, которые могут устанавливаться на суда любого назначения, рекомендуется принимать срок службы до списания 24, 12 или, в крайнем случае, 6 лет. Однако если объект предназначен только для судов конкретного типа (например, гребной винт фиксированного или регулируемого шага, рулевое устройство, валопровод и т. п.), то срок службы объекта до списания должен быть равным или кратным сроку службы до списания этого судна. Нежелательно, например, принимать срок службы ВРШ до списания равным 20 лет, если ВРШ устанавливается на судно со сроком службы 23 года.

Требуемый ресурс до списания определяется по формуле

$$R_{cn} = t_2 T_{cn} = 365 K_{mu} K_2 t_c T_{cn} , \quad (1.14)$$

где t_2 — средняя наработка за календарный год, ч; T_{cn} — требуемый срок службы до списания, лет; K_{mu} и K_2 — коэффициенты технического использования и готовности судна (допустимые); t_c — средняя наработка изделия за сутки эксплуатации, ч/сут.

Требуемые ресурсы до капитального и среднего ремонта рекомендуется выбирать исходя из предположения, что за срок службы до списания должен быть произведен один или два капитальных ремонта, а в период между капитальными ремонтами — один или два средних ремонта. Тогда требуемые ресурсы до капитального и среднего ремонта соответственно составят

$$\begin{aligned} R_{kp} &= R_{cn} / (1 + z_{kp}), \\ R_{cp} &= R_{kp} / (1 + z_{ck}) = R_{cn} / (1 + z_{kp})(1 + z_{ck}), \end{aligned} \quad (1.15)$$

где z_{kp} — число капитальных ремонтов до списания и z_{ck} — число средних ремонтов между очередными капитальными ремонтами.

Общее число средних ремонтов за срок службы до списания

$$z_{cp} = (1 + z_{kp}) z_{ck} . \quad (1.16)$$

Принято считать, что после выполнения капитального ремонта послеремонтный ресурс уменьшается на 10—20 %. Однако для первоначального анализа надежности это обстоятельство целесообразно не учитывать, поскольку сниже-

ние качества изделия после ремонта обычно компенсируется рассмотренным выше запасом надежности, заложенным в назначенный уровень предельного состояния. Кроме того, на практике для изделий судовой техники характерна, более равномерная периодичность ремонтов, поскольку она подчинена ремонтному циклу судна в целом, и факторы старения изделий будут влиять лишь на увеличение объема ремонтов. Для изделий второго класса наряду с плановыми ремонтами предусматривается техническое обслуживание, которое выполняется экипажем судна. Допустимое значение назначенного ресурса непрерывной работы до первого технического обслуживания, требующего остановки изделия, обычно должно быть не меньше месячной наработки.

Требования к ресурсам и срокам службы изделий не имеют смысла без одновременного указания допустимой безотказности изделий. Исходя из опыта изучения надежности изделий, входящих в состав судового оборудования промысловых судов, можно (при отсутствии других, более обоснованных данных) выбирать по табл. 1.3 допустимый коэффициент готовности изделия с учетом требуемого уровня безотказности изделия:

Таблица 1.3

Выбор допустимого коэффициента готовности

Требуемый уровень безотказности машины	Допустимый коэффициент готовности
Высший	0.995 и более
Высокий	От 0.990 до 0.995
Средний	От 0.950 до 0.990
Низкий	Менее 0.950

Напомним, что при оценке коэффициента готовности должны учитываться только фактические отказы, т. е. отказы, приводящие к внеплановым простоям, не предусмотренным правилами технической эксплуатации и ремонта.

Общее представление о надежности изделия можно получить с помощью значений удельной суммарной трудоемкости технического обслуживания и ремонтов. Для каждого конкретного изделия эти показатели не должны превышать соответствующие показатели лучших изделий-аналогов. При отсутствии сведений об изделиях-аналогах допустимую удельную суммарную трудоемкость ремонтов в первом приближении предлагается оценивать исходя из норм амортизационных отчислений по формуле

$$\omega_{дон} = KW_{изг}/R_{сн}, \quad (1.17)$$

где K — коэффициент, выбираемый в зависимости от трудоемкости и числа ремонтов ($K = 1.5 — 2$); $W_{изг}$ — трудоемкость изготовления изделия, чел-ч; $R_{сн}$ — нормативный ресурс или срок службы до списания, тыс. ч или лет.

С помощью показателя $\omega_{дон}$ можно сравнивать только ремонтпригодность изделий с одинаковыми характеристиками. Для большей универсальности рекомендуется наработку до списания (т. е. назначенный ресурс) выражать не в

часах, а в условно-выработанной продукции или энергии. Тогда удельная суммарная трудоемкость ремонтов может быть определена по формуле

$$\omega_{\text{дон}} = K W_{\text{изг}} / (R_{\text{сн}} G_{\text{н}}), \quad (1.18)$$

где $G_{\text{н}}$ — расчетная (паспортная, номинальная) мощность или производительность (в соответствующих единицах измерения).

В большинстве случаев удастся найти относительную трудоемкость ремонтов, если собрать сведения о фактической трудоемкости ремонтов изделий одинакового назначения, но различной производительности. Иногда лучшая корреляционная связь получается между трудоемкостью изготовления или ремонтов и основными размерами изделия. Так, для гребных винтов получена зависимость между стоимостью или трудоемкостью изготовления и квадратом диаметра гребного винта, а для судовых дизелей — зависимость трудоемкости ремонтов дизелей от их основных размеров, например:

$$W_i = k_i a (ZDS)^b \quad (1.19)$$

где Z — число поршней, i — номер ремонта в цикле, D и S — диаметр цилиндра и ход поршня в см, k_i , a и b — эмпирические показатели, определяемые по прилагаемой к формуле таблице.

Нахождение подобных зависимостей является актуальной задачей исследователей различных отраслей промышленности. Для ее решения нужно получить ряд суммарных трудоемкостей ремонтов для однотипных изделий при различных основных размерах, а затем выполнить корреляционный анализ зависимости между ними.

Для оценки надежности изделий применяется также вероятность безотказной работы за наработку, равную назначенному ресурсу. В документации на элементы автоматики часто указывается, что вероятность безотказной работы, например, за 2000 ч должна быть не менее 0.90. При этом имеются в виду отказы, подчиняющиеся экспоненциальному закону распределения. Если для элементов автоматики (или другого неремонтируемого изделия) задан гамма-процентный ресурс R_{γ} при допустимой вероятности безотказной работы γ , то допустимая средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$R_{\text{ср}} = R_{\gamma} / \ln(1/\gamma). \quad (1.20)$$

Например, при $\gamma = 0.9$ и $R_{\gamma} = 2000$ ч имеем $R_{\text{ср}} = 2000 / \ln(1/0.9) \approx 19000$ ч, что почти в 10 раз превышает гамма-процентный ресурс.

1.6.3. Нормы надежности для элементов изделия

Важным показателем долговечности элементов изделий является вероятность достижения предельного состояния. На основании литературных источников [18, 20, 25, 31 и др.] можно рекомендовать следующие допустимые значения вероятности достижения предельного состояния $F_{\text{дон}}$ (для повреждений элементов, лимитирующих долговечность изделий до ремонтов рассматриваемого вида):

0.05 — для недопустимых неконтролируемых повреждений (например, усталостные трещины в ответственных деталях);

0.10 — для допустимых контролируемых усталостных повреждений поверхности (например, питтинг зубьев колес);

0.20 — для основных повреждений износостого вида (износ в узлах трения, коррозионный износ и т. п.);

0.50 — для не основных повреждений (изменение формы поверхности из-за неравномерного изнашивания, риски, царапины и т. п.).

Приведенные допустимые вероятности достижения предельного состояния не должны быть превышены при наработке, равной требуемому назначенному ресурсу детали. Это условие можно выразить следующим неравенством:

$$F(R_n) \leq F_{дон}, \quad (1.21)$$

где $F(R_n)$ — фактическая вероятность достижения предельного состояния за наработку, равную требуемому назначенному ресурсу до соответствующего вида ремонта или до списания. Так, вероятность достижения предельного износа за нормативный ресурс дейдвудного подшипника не должна превышать 0.2. Надежность гребного вала не может быть признана достаточной, если за срок службы до списания судна вероятность образования усталостной трещины превышает 0.05.

Задачу по оценке долговечности элементов изделия можно решить и по-другому — путем сравнения их гамма-процентных ресурсов $R(\gamma)$ с требуемым нормативным ресурсом R_n . Выбор величины γ выполняется также в зависимости от степени опасности отказа, причем

$$\gamma_{дон} = 100(1 - F_{дон}). \quad (1.22)$$

Тогда условие обеспечения надежности детали для рассматриваемого вида повреждения можно представить таким неравенством:

$$R_\gamma \geq R_n. \quad (1.23)$$

Например, если 80 %-ный ресурс дейдвудного подшипника по износу окажется меньше назначенного ресурса до среднего ремонта 15 тыс. ч, такой подшипник не может быть признан достаточно надежным, и возникнет необходимость в уменьшении ресурса до этого вида ремонта или в повышении износостойкости подшипника. Можно также говорить о низкой надежности гребного вала, если 95 %-ный ресурс по трещинообразованию окажется меньше, чем назначенный срок службы до списания (например, 120 тыс. ч).

Мы уже отмечали большое различие в понятиях «вероятность отказа» и «вероятность достижения предельного состояния». Норма для вероятности отказа (или для вероятности безотказной работы) должна быть значительно жестче, чем для вероятности достижения предельного состояния. При возникновении отказа нарушается работоспособность машины с более или менее тяжелыми последствиями, а достижение назначенного уровня предельного состояния означает лишь необходимость выполнения тех или иных ремонтных работ.

В работе [20] приведены общие нормы для допустимой вероятности безотказной работы в зависимости от классов надежности, учитывающих последствия

отказов. Используя эти рекомендации, можно (при отсутствии других, более обоснованных предложений) определить допустимую вероятность безотказной работы с помощью следующих классов надежности:

нулевой класс — отказ не приводит к прекращению функционирования изделия и не отражается на работоспособности группы оборудования и судна в целом;

первый класс — отказ приводит к непродолжительной остановке изделия без прекращения функционирования какой-либо группы оборудования или системы;

второй класс — отказ приводит к временному прекращению функционирования какой-либо группы оборудования или судна без вывода его из эксплуатации;

третий класс — отказ приводит к аварийному ремонту судна с выводом его из эксплуатации;

четвертый класс — отказ приводит к гибели судна в целом.

Для приближенной оценки класса надежности рекомендуется следующий способ, учитывающий классификацию оборудования, изделий и элементов изделий судовой техники. Чтобы определить класс надежности судна при отказе элемента изделия, предлагается подсчитать сумму цифр, обозначающих группу оборудования, класс изделия и категорию элемента изделия (см. раздел 1.3), а затем оценить класс надежности по табл. 1.4.

Таблица 1.4

Определение класса надежности объекта

Сумма цифр	Класс надежности	Последствия отказа
3 — 4	Третий	Аварийный ремонт судна с выводом из эксплуатации
5	Второй	Временное прекращение работы группы оборудования без вывода судна из эксплуатации
6 и более	Первый	Непродолжительная остановка машины без вывода из эксплуатации функциональной группы оборудования

Рассмотрим три конкретных примера.

Пример 1. Заклинило гребной вал в дейдвудном подшипнике из капролона (это случается иногда при неправильно выбранных зазорах). В данном случае мы имеем дело с оборудованием первой группы (цифра 1), изделием первого класса (цифра 1) и элементом второй категории (цифра 2). В результате сложения получаем сумму цифр, равную 4.

Пример 2. Сгорел мотор траловой лебедки. На этот раз элемент первой категории (цифра 1) входит в состав изделия первого класса (цифра 1), которое относится к оборудованию второй группы (цифра 2). В данном случае также получили сумму, равную 4.

Пример 3. Вышла из строя форсунка вспомогательного двигателя. Имеем элемент третьей категории (цифра 3), изделие второго класса (цифра 2) и оборудование первой группы (цифра 1). В сумме получаем 6.

Таким образом, в первом и втором примерах мы имели отказы третьего клас-

са (сумма цифр 4), в третьем примере — отказы первого класса (сумма цифр 6). Такая классификация вполне правомерна: восстановление действующего устройства и тросовой лебедки приходится выполнять лишь в заводских условиях, т. е. необходим аварийный ремонт; в то же время для замены форсунки двигателя не пришлось даже останавливать электростанцию.

В зависимости от класса надежности элемента изделия (при рассмотрении одного вида отказов) допустимые вероятности безотказной работы $P_{доп}$ и вероятности отказа $F_{доп}$ можно оценить по табл. 1.5 [36].

Безотказность элемента изделия оценивается с помощью фактической вероятности безотказной работы $P(R_n)$ определённой за время, равное требуемому назначенному ресурсу R_n до соответствующего вида ремонта или списания (для ремонтируемых машин и механизмов постоянного действия) или времени выполнения ответственной рабочей операции (для изделий кратковременного действия). При этом должно выполняться условие

$$P(R_n) \geq P_{доп}. \quad (1.24)$$

Таблица 1.5
Нормы показателей безотказности элемента

Класс надежности	$P_{доп}$	$F_{доп}$
Нулевой	< 0.9000	> 0.1000
Первый	0.9000...0.9900	0.0100...0.1000
Второй	0.9900...0.9990	0.0010 ...0.0100
Третий	0.9990...0.9999	0.0001...0.0010
Четвертый	0.9999...0.99999	0.00001...0.0001
Пятый	1.0000	0

В заключение этого раздела отметим, что существуют другие методы и критерии оценки показателей надежности элементов техники с учетом последствий отказов. Например, не имеется оснований возражать против применения для этой цели указания ГОСТ 27.310-95 «Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения». Идеология этого документа не противоречит изложенным выше принципам, но не связана с компьютерной технологией расчета надежности по этой книге.

Таковы общие принципы выбора номенклатуры и допустимых параметров показателей надежности техники с учетом стратегии ТОР, которые являются неотъемлемой частью общей методологии оценки и прогнозирования долговечности и безотказности машин. Следующая часть этой методологии представляет собой комплекс алгоритмов и программ, которые базируются на теории вероятностей и математической статистики.

2. Вероятностная оценка надежности техники

2.1. Выбор программного обеспечения

В книге о надежности судовой техники [20], которая вышла в свет в далеком 1980 году, автор рекомендовал использовать для расчетов надежности прогрессивные для того времени вычислительные средства — программируемые калькуляторы. Тогда не возможно было даже представить, что всего через 10 — 15 лет любые задачи можно будет решать на мощных персональных компьютерах (ПК), доступных для широкого круга пользователей. По мере развития ПК, в последние 30 лет в мире наблюдался интенсивный процесс создания и совершенствования соответствующего программного обеспечения. В настоящее время имеется много пакетов программ для решения как системных, так и прикладных проблем, что позволяет приступить к выбору наиболее подходящей математической среды для этого труда. Такой выбор можно было бы сделать без особых доказательств с учетом личного опыта автора настоящей книги. Однако в условиях большого разнообразия вариантов представляется целесообразным наш выбор обосновать более корректно.

Для начала отсеим из рассмотрения явно устаревшие программы инженерных расчетов с помощью таких алгоритмических языков как ранние версии Бейсика, Фортрана, Паскаля и т.п. Сущность программирования в этих редакторах сводилась к составлению листинга программы по нумерованным или не нумерованным строкам с использованием текстовых команд (на английском языке). Для расчета по этим программам из листинга следовало переходить в вычислительный блок программы по вводимым туда исходным данным. Для использования таких программ необходимо было изучить и освоить методы программирования, что не требуется делать пользователям современных ЭВМ.

Следующим шагом в создании программирования инженерных расчетов стала разработка оболочек специализированных программ на основе некоторых из указанных (Паскаль, Бейсик и др.) и новых языков. Разработчики таких программ должны были быть хорошими программистами и, в то же время, высококлассными специалистами в области программируемых задач. В результате разрабатывался программный продукт в виде комплекса файлов, снабженной общей оболочкой для пользователя. Оболочка снабжалась кнопками и ячейками, куда пользователем должен заносить исходные данные по указаниям прилагаемой инструкции. По окончании ввода данных и нажатия на соответствующую кнопку на экране появлялись результаты расчета в виде таблиц или графиков. В частности подобные программы создавались на базе языка Visual Basic специально для статистических расчетов, среди которых лидером можно считать пакет STATISTICA (версия 6 на начало 2008 года). Он охватывает полный набор программ для математического анализа. Например, там рассматриваются: временные ряды, графические методы, дискриминантный анализ, дисперсионный анализ, канонический анализ, кластерный анализ, компоненты дисперсии, множественная регрессия, нейронные сети, нелинейное оценивание,

непараметрические методы, планирование эксперимента, факторный анализ и многое другое.

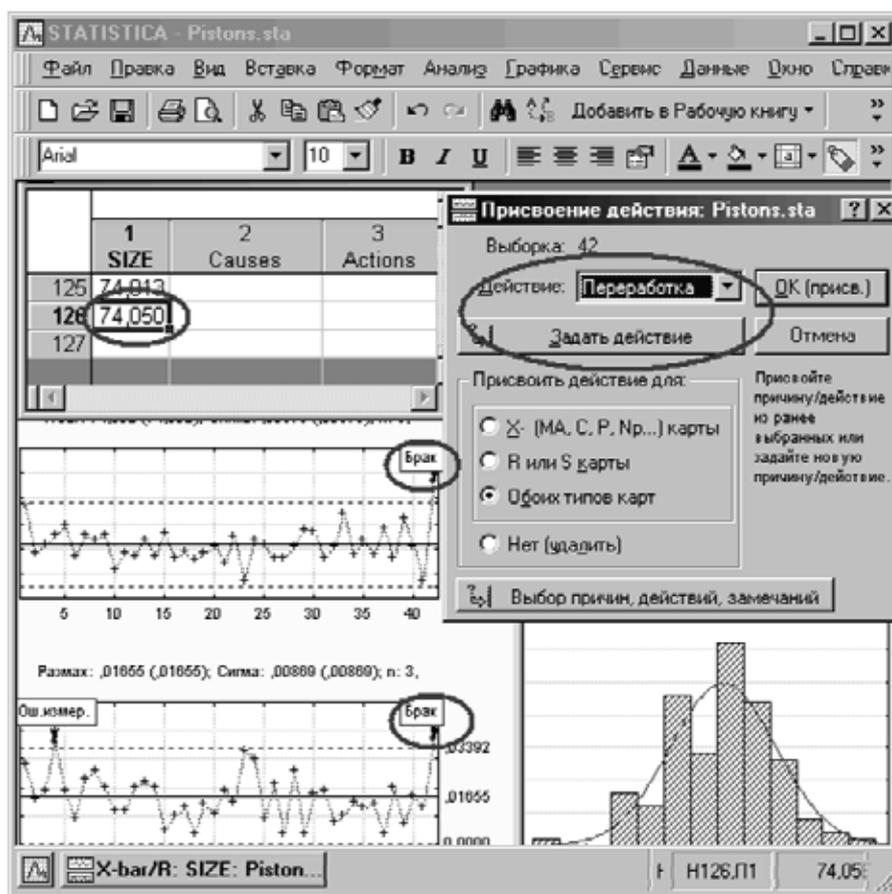


Рисунок 2-1. Пример применения пакета STATISTICA

Имеется хорошо разработанная система информационного обеспечения и обучения, которая осуществляется создателем продукта — компанией StatSoft Inc., основанной в 1984 г в городе Тулса (Оклахома, США). Все подробности о программном продукте STATISTICA можно найти на портале компании <http://www.statsoft.ru/> и в трудах профессора, научного директора StatSoft Russia В. П. Боровикова и профессора д. ф.-м. н. Г. И. Ивченко.

Признавая выдающиеся достоинства упомянутой системы, автор, тем не менее, не применяет ее в этой книге, поскольку, во-первых, нам было необходимо разработать новые программы для решения ряда практических инженерных задач методами, которые не учтены в пакете STATISTICA.

Во-вторых, этот пакет не предназначен для программирования новых задач, ибо он фактически является специализированным средством расчета и анализа по уже запрограммированным алгоритмам.

В-третьих, в основу пакета положены принцип программирования в электронных таблицах и поэтому эта система избыточно загромождена окнами с таблицами, графиками, ячейками и прочими элементами, а содержания алгоритмов расчета там не видно (рис. 2-1), что не отвечает цели данной книги.

Более доступным универсальным математическим редактором для инженерных расчетов можно считать электронные таблицы типа EXCEL (рис.2-2). Они

входят в стандартный набор офисных программ Microsoft (наряду с WORD, POWERPOINT, FRONTPAGE, OUTLOOK и др.) и в них имеются некоторый (хотя и ограниченный) набор статистических функций. Однако это средство имеет тот же недостаток — программирование в электронных таблицах приходится выполнять в слепую с помощью клавиатуры, что не позволяет наглядно демонстрировать алгоритмы расчета. В итоге на мониторе мы можем видеть только исходные и результирующие данные.

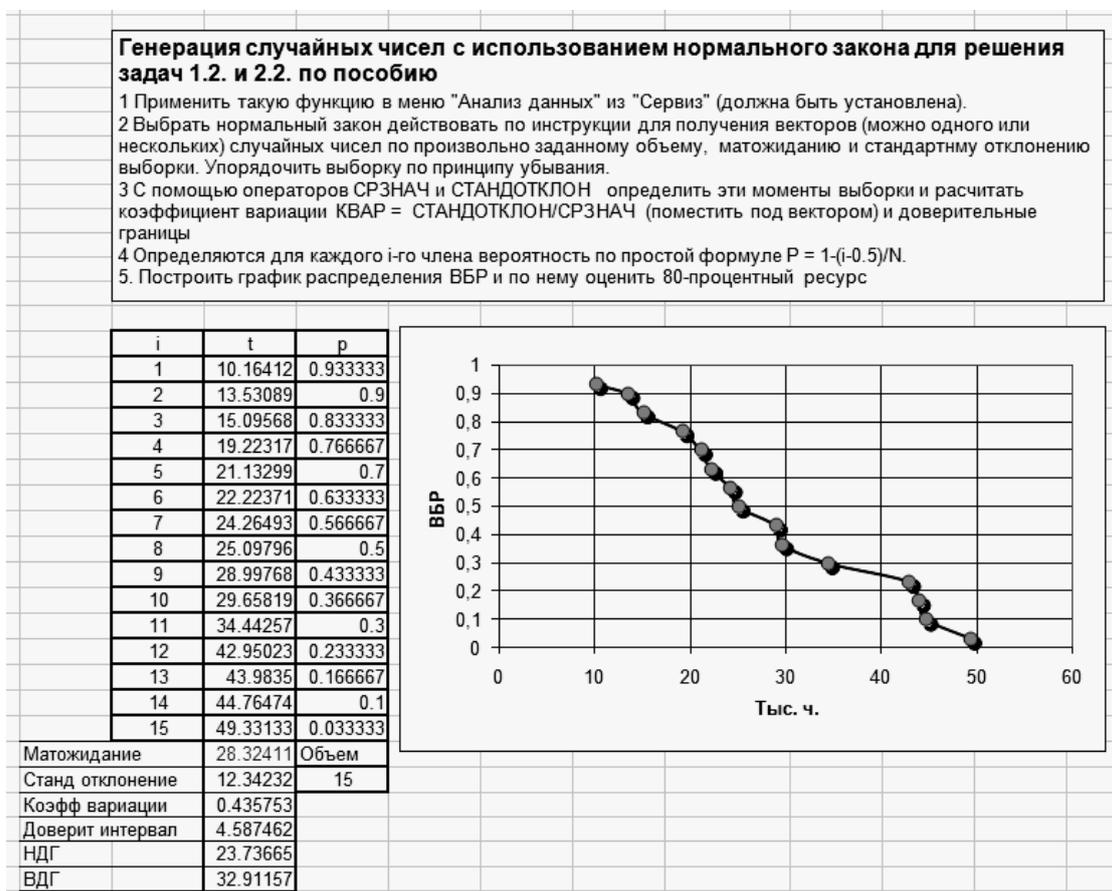


Рисунок 2-2 Пример статистического расчета в электронных таблицах EXCEL

Теперь рассмотрим возможность применения для нашей цели математических редакторов так называемого высшего уровня. Во многих обзорах систем компьютерной алгебры MAPLE справедливо считается одним из первых кандидатов на роль лидера среди них. Ядро системы MAPLE V используется целым рядом других мощных систем компьютерной математики, например системами класса MATHCAD и MATLAB. Свое лидерство MAPLE завоевывает в честной конкурентной борьбе с другой замечательной математической системой — MATHEMATICA 4.1 - 5. Каждая из данных двух систем имеет свои особенности, но в целом эти две лидирующие системы практически равноценны.

Если говорить о недостатках этих систем, то можно отметить значительный объем места на жестком диске, которые они требуют и соответственно высокие требования к мощности и стоимости компьютеров. Второй недостаток — программирование выполняется в традициях последовательного написания операторов в следующих друг за другом строках. Программист должен запомнить и уметь творчески применять большое количество команд, хотя многие

функции имеют традиционную форму изображения. В основе этих систем так же лежит программирование в электронных таблицах.

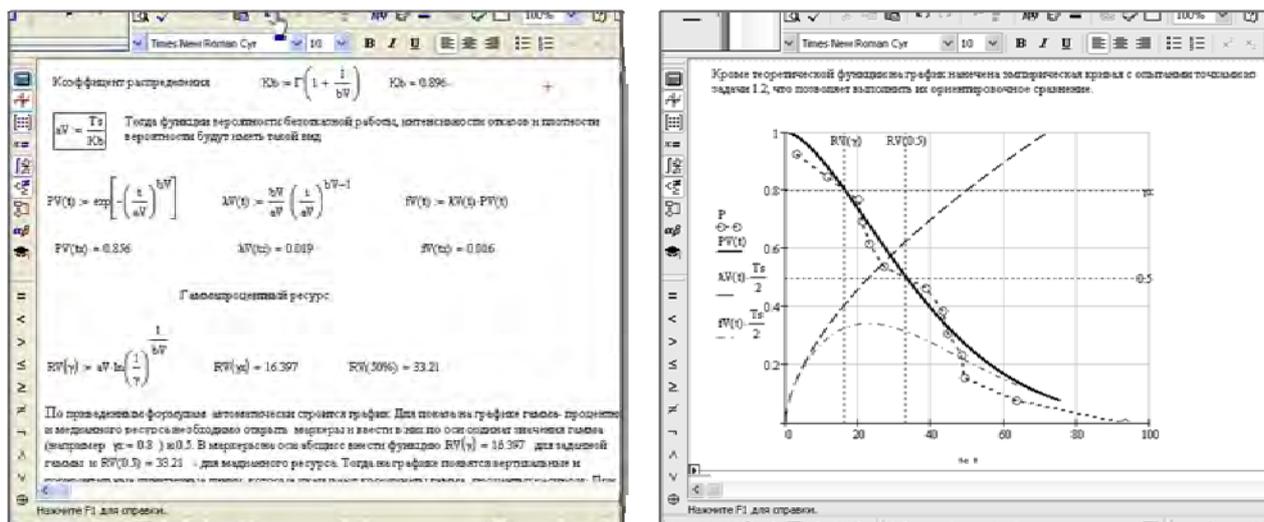


Рисунок 2-3 Примеры оформления расчетов в редакторе MATHCAD

Наиболее совершенным универсальным программным продуктом для решения вероятностных задач следует признать пакет MATHCAD. Он является математическим редактором, позволяющим проводить разнообразные научные и инженерные расчеты, начиная от элементарной арифметики и заканчивая сложными реализациями численных методов. Пользователи MATHCAD — это студенты, ученые, инженеры, разнообразные технические специалисты.

Благодаря простоте применения, наглядности математических действий, обширной библиотеке встроенных функций и численных методов, возможности символьных вычислений, а также превосходному аппарату представления результатов (графики самых разных типов, мощных средств подготовки печатных документов и Web-страниц), MATHCAD стал наиболее популярным математическим приложением. MATHCAD 11, 12 (и выше) в отличие от большинства других современных математических приложений, построен в соответствии с принципом WYSIWYG ("What You See Is What You Get" — "что Вы видите, то и получите"). Поэтому он очень прост в использовании, в частности, из-за отсутствия требований, сначала писать программу, реализующую те или иные математические расчеты, а потом запускать ее на исполнение. Вместо этого достаточно просто вводить математические выражения с помощью встроенного редактора формул, причем в виде, максимально приближенном к общепринятому виду в офисных приложениях WINDOWS, и тут же получать результат. Математические расчеты производятся немедленно, в соответствии с введенными формулами; графики различных типов (по выбору пользователя) с богатыми возможностями форматирования вставляются непосредственно в документы. Символьные вычисления позволяют осуществлять аналитические преобразования, а также мгновенно получать разнообразную справочную математическую информацию. В состав MATHCAD входят несколько интегрированных между собой компонентов. Это мощный текстовый редактор для

ввода и редактирования текста и формул, вычислительный процессор — для проведения расчетов согласно введенным формулам и символьный процессор, являющийся, по сути, системой искусственного интеллекта. Сочетание этих компонентов создает удобную вычислительную среду для разнообразных математических расчетов и, одновременно, документирования результатов работы. Этот математический пакет при достаточной мощности занимает значительно меньше места на жестком диске компьютера по сравнению с другими математическими программами, например MAPLE и MATHEMATICA.

В перечень функций программирования этого пакета входят все необходимые операции по статистическому и вероятностному анализу. Например, даются прямые и обратные функции для 17 законов распределений вероятности. Имеются команды для выполнения корреляционного анализа, для аппроксимации опытных данных и пр. и пр.

Важнейшим преимуществом этого редактора является возможность его использования в качестве наглядного средства иллюстрации методик различных расчетов, поскольку программные блоки имеют вид записей обычных формул.

Указанные преимущества в полной мере подтверждаются нашим многолетним опытом применения редактора MATHCAD, начиная с его первых версий (с четвертой — шестой) и кончая последними (на момент написания книги) — тринадцатой и четырнадцатой версиями. Имеется опыт программирования в этой среде различных вероятностных, динамических и прочностных задач. Положительные свойства этого редактора делают его незаменимым средством обучения любым расчетам и в, том числе, достаточно сложных о надежности и долговечности машин. Еще отметим, что файлы с расчетами в среде MATHCAD с расширением *.mcd занимают мало места на диске.

В последних версиях MATHCAD (13 и выше) в качестве основного предусмотрено расширение *.mxcd. Файлы с таким расширением предназначены для использования Интернета и занимают примерно в 2 раза больше места, чем с расширением *.mcd. Но зато версии 13 и 14 обладает более совершенными средствами оформления графиков и решения уравнений. Эти обстоятельства позволяет принять окончательное решение о выборе среды MATHCAD в качестве основного средства программирования вероятностных и других расчетов, рекомендуемого в этой монографии.

Обучение программированию и работы в среде MATHCAD изначально не входило в круг наших задач. Однако, по мере работы над рукописью стало ясно, что при рассмотрении конкретных примеров читатель сможет получить представления о том как можно работать в этой прекрасной среде программирования. Для читателей и организаций, которые имеют намерения не только ознакомиться методикой вероятностного анализа надежности, но и использовать этот труд в качестве практического пособия, сообщаем данные о требованиях к компьютерному оборудованию. Для исследования надежности предлагаемыми здесь методами достаточно иметь относительно дешевый компьютер типа Pentium III (и более) с частотой не менее 1 ГГц и оперативной памятью 256 Мбайт, оснащенной системой Microsoft Windows XP. На компьютере должен быть установлен комплект офисных программ Microsoft Office, включая

Microsoft Office Excel и Microsoft Office Word. Обязательна установка средства Adobe Acrobat для чтения файлов с расширением PDF. Для решения графических задач рекомендуется применить пакет программ CorelDRAW Graphics Suite. И, наконец, на компьютер следует установить математический редактор MATHCAD с номером версии не менее 11. Рекомендуется всегда применять более качественные англоязычные варианты версий.

Исходя из многолетнего опыта использования различных версий MATHCAD, следует предупредить о возможных проблемах распознавания текстовых комментариев, записанных русским шрифтом при программировании другими исполнителями в более ранних версиях этой среды. Обнаруженную «абракадабру» вместо русского текста, как правило, можно исправить заменой стиля шрифта. Конечно, никаких проблем со шрифтами не возникнет при использовании одной и той же версии, как для программирования, так и для чтения.

Возможно возникновение проблем решения некоторых задач в новых версиях продукта, как это было с MATHCAD14. Начиная с этой версии (2007 год), производство MATHCAD перешло от компании Mathsoft к фирме PTC (Product Development Company, США) — мирового лидера в области разработки CAD/CAM/CAE/PLM (т.е. САПР) на базе решений Pro/ENGINEER и Windchill. При этом в продажу запущена только версия MATHCAD14 и на предыдущие версии лицензии больше не выдаются.

В этой связи отметим особенности приобретения лицензионных программных продуктов специализированного назначения вообще и MATHCAD — в частности. Дело в том, что большинство таких продуктов произведено в США или Канаде и купить их в обычном компьютерном магазине, тем более физическому лицу, практически не возможно. И дело здесь не только в большой их стоимости (так коммерческая версия MATHCAD 14 стандартной комплектации в 2007 году стоила более \$2500). Правом продажи (только юридическим лицам) обладает ограниченное число уполномоченных фирм, например, компания Softline (<http://www.softline.ru/>). Некоторые компании могут поставлять так называемые академические версии для вузов (и других организаций, имеющих лицензию на право осуществлять образовательную деятельность) по льготным ценам, но без права коммерческого использования продуктов (по лицензионному соглашению). Например, компания PTC была готова продавать лицензии на 25 компьютерных мест для применения в учебных аудиториях по цене, близкой к стоимости одной лицензии коммерческого продукта.

2.2. Общие положения статистической обработки информации

Рассмотренные выше показатели надежности техники не могут быть установлены без учета их вероятностной природы и без применения соответствующих методов статистической обработки опытных данных о случайных событиях.

В этой работе мы используем тот арсенал знаний о математической статистике и теории вероятности, который необходим и достаточен для решения наших, чисто практических задач. При желании эту сложную математическую науку можно изучать более подробно по соответствующим учебникам, созданным авторитетными математиками отечественной школы.

К ним, в первую очередь, следует отнести монографию проф. Р. И. Иванов-

ского [27]. Она является наиболее обстоятельным пособием по теории вероятностей для практического применения. В книге излагаются основы теории вероятностей (события, композиция независимых испытаний, случайные величины, основные законы распределения, предельные теоремы, векторные случайные величины, элементы теории случайных функций и процессов) и математической статистики (выборки и их распределения, точечные и интервальные оценки, проверка статистических гипотез, регрессионный и корреляционный анализ). Приводятся рекомендации по решению типовых задач в среде MATHCAD, предлагаются программные структуры MATHCAD, которые могут быть использованы для организации и проведения практических занятий, в процессе научных исследований. Прилагаемый компакт-диск содержит 30-дневную полнофункциональную версию MATHCAD 14, файлы решений задач и примеров, рассматриваемых в тексте, а также дополнительные материалы.

Первый этап в развитии теории вероятностей связан с именами Муавра, Лапласа, Гаусса, Пуассона (XVIII век). Далее, в XIX веке, большую роль сыграли представители Петербургской математической школы В. Я. Буняковский, П. Л. Чебышев, А. А. Марков, А. А. Ляпунов. В XX веке достижения этой науки связаны с именами российских ученых С. Н. Бернштейна, А. Я. Хинчина и др.



Карл Фридрих Гаусс
(1777 — 1855)



Андрей Николаевич
Колмогоров (1903-1987)

Среди математиков, оказавших решающее влияние на развитие теории вероятности, надо обратить внимание на следующих великих ученых.

Выдающийся немецкий математик, астроном и физик Карл Фридрих Гаусс (1777 — 1855) считается одним из величайших математиков всех времён и народов.

Следует особо отметить роль величайшего советского математика Андрея

Николаевича Колмогорова (1903—1987) в создании отечественной школы по теории вероятностей. В истории российской науки его имя стоит рядом с именами М. В. Ломоносова, Д. И. Менделеева — ученых, всей своей жизнью прославивших Россию.

2.3. Особенности предлагаемой методологии

Прежде чем приступить к рассмотрению технических приемов статистических и вероятностных вычислений, попытаемся хотя бы укрупнено классифицировать методы статистической обработки информации о случайных событиях.

К первой группе методов можно отнести простейшие вычисления средних значений наработки между какими-либо событиями, если известны суммарная наработка всех подконтрольных изделий и число рассматриваемых событий (отказов, ремонтов, мероприятий по техническому обслуживанию и т. д.) за период наблюдения. В этом случае нас интересует лишь фактическое среднее значение для рассматриваемого периода наблюдения, и поэтому оценка достоверности его расчета не всегда обязательна. Ко второй группе относятся методы расчетов средней величины какого-либо измеряемого признака X , если известна совокупность случайных величин, характеризующие совершившиеся события. При этом следует оценивать достоверность и точность расчета среднего значения для принятия решения о возможности распространения полученного результата на любой объект рассматриваемого типа. Для оценки достоверности и точности вычислений приходится применять законы распределения, что обычно и представляет наибольшие трудности. К третьей, наиболее сложной группе, относятся методы нахождения распределения вероятностей случайных величин, что необходимо для оценки средней наработки до отказа, если за период наблюдения вышла из строя только часть изделий, а также для расчета гамма-процентных ресурсов или вероятности не достижения предельного состояния.

В книге приведены методы и программы оценки указанных показателей по исходным данным в виде выборки ресурсов $t_i = X_i$ в математическом редакторе МATHCAD. В общем случае наши алгоритмы и программы состоят из следующих расчетных этапов.

Первый этап. Построение эмпирического распределения вероятности не достижения предельного состояния (ВНДПС) P_i и предварительная оценка (при наличии возможности) статистических показателей выборки — матожидания, доверительных границ и коэффициента вариации.

Второй этап. Расчет параметров функций теоретических распределений ВНДПС $\gamma(t)$, интенсивности отказов $\lambda(t)$ и плотности вероятности $f(t)$, а так же оценка искомых показателей надежности. К таким показателям относятся: гамма-процентный $R(\gamma)$, медианный $R(0.5)$ и средний $R_{ср}$ ресурсы, а так же коэффициента вариации V .

Расчеты второго этапа выполняются с помощью эмпирического распределения, полученного на первом этапе, и с проверкой согласия по коэффициенту корреляции между эмпирическим и теоретическим распределениями.

Суть нашего подхода к оценке показателей долговечности элемента машины

в редакторе MATHCAD можно пояснить рисунком 2-4, где показан итоговый график полного цикла статических исследований. На рисунке дано сравнение опытного (эмпирического) и теоретического распределений ВНДПС.

Эмпирическое распределение ВНДПС (точки) и гистограмма плотности вероятности получены на первом этапе с помощью соответствующей программы для случая большой выборки (объемом 500 точек) путем генерации случайных чисел. На втором этапе эти опытные точки распределения послужили исходными данными для расчета параметров теоретических распределений (пунктирная линия) и коэффициентов корреляции специально разработанными методами аппроксимации. В заключении были рассчитаны искомые показатели: надежности гамма - процентный $R(\gamma)$, медианный $R(0.5)$ и средний $R_{ср}$ ресурсы, а так же коэффициента вариации V . На рис. 2-4 приведены графики для закона распределения Вейбулла, хотя одновременно определялись параметры и других двухпараметрических законов распределения.

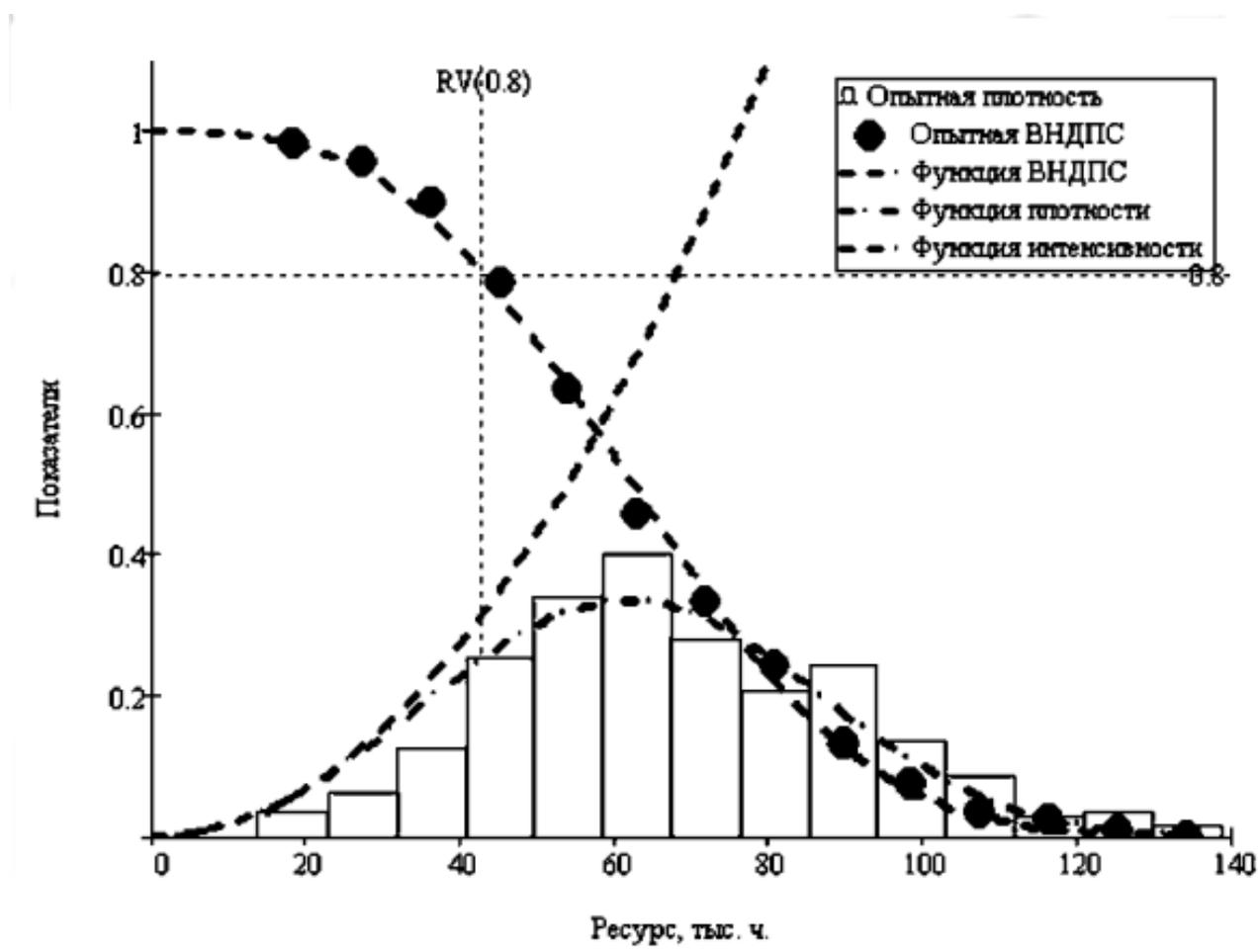


Рисунок 2-4. Результаты статистических исследований

Это видно из итоговой таблицы на рис. 2-5 (получена в редакторе MATHCAD) с результатами расчета параметров пяти законов распределений и перечисленных выше показателей.

В данном примере результаты расчета для большинства законов практически совпали друг с другом при очень высоком коэффициенте корреляции (0.999).

Это подтверждает и рис. 2-4, поскольку экспериментальные точки хорошо легли на теоретическую кривую.

Итог1 =

"Zakon"	"b"	"a"	"Korr"	"Sred"	"Var"	"R50"	"R80"
"Veyb"	3.042	72.46	0.999	63.031	0.362	62.495	42.922
"Log"	0.364	60.695	0.999	64.855	0.377	60.695	44.674
"Nor"	0.367	62.726	0.999	62.726	0.367	62.726	43.334
"Rav"	116.418	15.68	0.983	66.049	0.44	66.049	35.828
"Rls"	49.275	20.387	1	64.056	0.356	61.411	43.664

Рисунок 2-5. Итоговая таблица

Конечно, этот пример представляет собой почти идеальный случай столь высокого согласия опыта и эксперимента благодаря генерации большого объема случайных чисел по заданному закону. Но практика наших исследований показывает, что даже для менее стабильных выборок, итоговая таблица типа рис. 2-5 позволяет выбрать закон распределения с наиболее высоким коэффициентом корреляции, которые чаще всего бывает не хуже 0.98 — 0.99.

Теперь можно приступить к знакомству с методами и программами, которые позволяют получать указанные результаты на каждом из этапов статистического анализа.

2.4. Эмпирические распределения

2.4.1. Образование выборок

В основе теории вероятности и математической статистики лежит понятие о случайной величине X , которая отличается от неслучайной (детерминированной) величины тем, что она может принимать заранее непредсказуемые значения, которые, однако, имеют свое математическое ожидание X_{cp} и меру рассеивания относительно этого математического ожидания. В качестве меры рассеивания используют взаимосвязанные показатели: дисперсию σ^2 , среднеквадратичное отклонение σ и коэффициент вариации V (см. формулы (1.1)...(1.6)). На практике случайная величина X реализуется в виде выборочной совокупности (далее — выборки) этой величины.

Как уже было сказано (п.1.2.10), выборка — это совокупность величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ограниченного числа наблюдений случайной величины.

Входящее в выборку число X_i называется i -м членом выборки, а общее количество этих чисел N — объемом выборки. Выборка имеет наибольшее $X_{max} = X_n$ и наименьшее $X_{min} = X_1$ значения. Разница этих величин называется размахом выборки.

$$\Delta X = X_{max} - X_{min} \cdot \quad (2.1)$$

К способам получения выборки относятся: наблюдения за наработкой изде-

лий в эксплуатации или при испытаниях (в том числе стендовых), сбор информации по данным учетной документации, выполнение периодических измерений износов при диагностике и т.д.

В частности этой проблеме посвящен ГОСТ 27.410-87 «Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность» [14]. В этом стандарте рассматриваются 16 планов испытаний, из которых более или менее доступными для реализации можно считать первые четыре плана:

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.

2.4.2. Проблемы построения эмпирических распределений

Два первых плана [NUT] и [NUr] равноценны между собой и еще одним планом [NU(T, r)], поскольку все они завершаются после отказов не всех объектов, а лишь некоторой их части с образованием выборки объемом r . Не стоит сомневаться в том, что и остальные объекты объемом $(N-r)$ рано или поздно откажут, если мы продлим время испытаний. Но когда это произойдет, мы не знаем.

В этом случае два первых момента (среднюю и дисперсию) выборки нельзя определить по формулам (1.1)...(1.6) и тогда приходится строить эмпирическую функцию распределения.

Для строгого решения статистической задачи по планам типа [NR(T, r)] в литературе вообще трудно найти подходящую методику, поскольку объекты, попавшие в выборку после замены, будут некоторое время работать без отказов. Подобные выборки, состоящие из отказавших и еще не отказавших объектов, образуются, например, при сборе информации о серийных изделиях (судов), которые поступают в эксплуатацию не одновременно.

В работе [20] были предложены методы построения таких выборок, которые были тогда названы переменными выборками, в противовес названию «постоянная выборка» при плане испытаний [NUN] и «незавершенная выборка» при плане [NUr или T]. Затем в работах [18, 21, 46 и др.] вместо переменной выборки введено понятие «цензурированная выборка», которая состоит из наработок как до свершившихся (например, отказов), так и до еще не свершившихся событий.

Цензурирование — это фиксация известного исследователю момента времени, при котором объект еще не отказал (когда он еще «живой»).

Если выборка состоит только из работок до отказов, то она называется нецензурированной или простой выборкой. Такая выборка может быть незавершенной (далее — усеченной) в случае планов $[N_{Ur}$ или $T]$.

Главным результатом нашего исследования вероятностных расчетов в редакторе MATHCAD является создание универсальных алгоритмов и программ для корректного построения эмпирических распределений с последующим расчетом по ним параметров теоретических распределений и показателей надежности при любом плане испытаний как для простых и усеченных, так и цензурированных выборок.

При этом программы составлены в двух вариантах в зависимости от объема выборок N , которые были условно разделены на малые (при $N \leq 15 - 20$) и большие выборки (при $N > 20$).

Эмпирическое распределение для малых выборок строится по точкам по сравнительно простым формулам, т.е. без построения гистограммы эмпирической плотности вероятности. Для больших выборок разработан расчет по сгруппированным данным, что требует построения гистограммы. Однако в условиях применения современных ПК эмпирическое распределение вероятностей можно строить и по точкам, как для малых выборок. Поэтому теперь мы не будем применять термины о малых и больших выборках, а просто указывать способ их образования (по точкам или интервалам).

2.4.3. Алгоритмы и программы

Рассмотрим фрагменты следующих вариантов программ построения эмпирических распределений и расчета их статистических характеристик в зависимости от вида выборки.

Программа "PPV ТСНК" — программа для расчета простой полной выборки по точкам.

Программа «PUV ТСНК» — программа для расчета простой усеченной выборки по точкам.

Программа "PPV INT" — программа для расчета простой полной выборки по интервалам.

Программа "CV ТСНК" — программа для расчета цензурированной выборки по точкам.

Программа "CV INT" — программа для расчета цензурированной выборки по интервалам.

Перед тем как приступить к их анализу, отметим, что любая из указанных программ начинается с формулирования задачи исследования применительно и назначения допустимой ВНДПС, которую можно определить по сведениям раздела 1.6.3.

Затем излагается процедура образования векторов выборки w . В учебных целях векторы можно получить путем генерирования неранжированных случайных чисел (ГСЧ) для какого либо закона. Проще всего применить для этого генератор закона Вейбулла. На рис. 2-6 сначала показано компьютерное по-

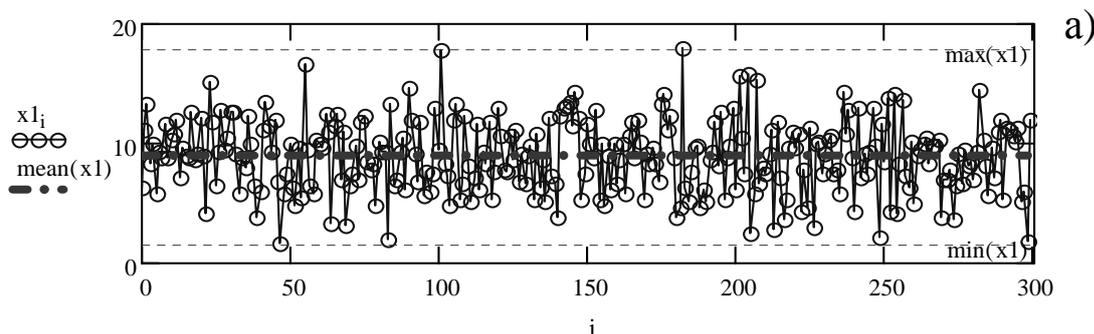
строение графика неранжированного вектора случайных чисел. Такой вектор не пригоден для решения основных вероятностных задач и его надо ранжировать по принципу возрастания путем перетасовки. Для этого следует применить оператор `sort(w)`, что показано на нижнем графике рисунка 2- 6.

Неранжированный вектор можно определить с помощью оператора ГСЧ для распределения Вейбулла

$$x1 := To \cdot rweibull\left(nh, \frac{1}{kv}\right)$$

Определим объем выборки `n := length(x1)` `n = 300` `i := 0.. n - 1`

Но члены этой выборки расположены относительно друг друга случайно (как попало), как это показано на рисунке 1



Для того, что бы можно было выполнять вероятностный анализ выборки и построить эмпирическое распределение, выборку надо ранжировать по принципу возрастания с помощью оператора `sort(x)`

$$x := \text{sort}(x1) \quad \text{Формула (2)}$$

Тогда вектор выборки будет иметь вид , как на рисунке 2.

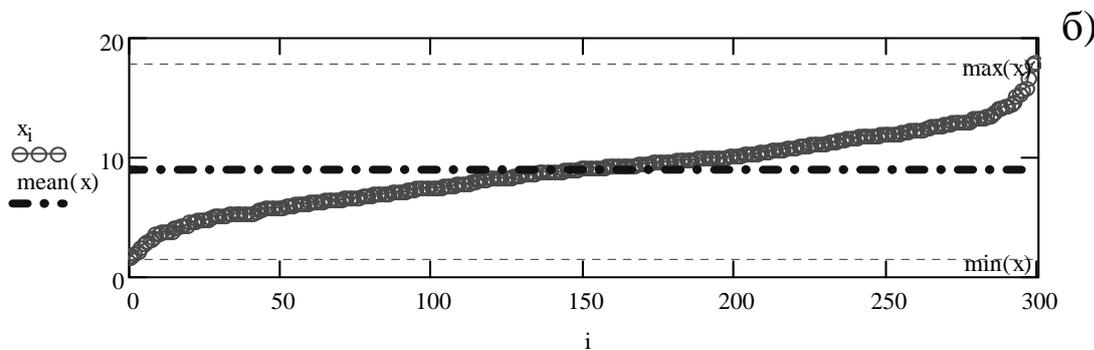


Рисунок 2-6. Графики неранжированной (а) и ранжированной (б) выборки

Если члены выборки образуются в результате испытаний или наблюдений, то в редакторе MATHCAD можно применить несколько способов образования вектора. Первый способ состоит в записи опытных величин в столбец электронной таблицы EXCEL или в любом текстовом редакторе (применяя для разделения целой и дробной части точку, вместо запятой) с последующим переносом ее копии в MATHCAD. После присвоения этому столбцу обозначения (например — `x`) и ранжирования оператором `sort(w)` этот столбец превращается в вектор.

Второй способ заключается в применении маски пустой матрицы из одного столбца с заданным числом строк. Вектор образуется после занесения туда

членов выборки, присвоения обозначения и ранжирования.

Третий способ подобен предыдущему, но с применением не маски матрицы, а пустой таблицы для записи членов выборки в один столбец. Способ имеет то преимущество, что не требует предварительного назначения объема выборки, ибо он определяется автоматически оператором $\text{length}(x)$.

Как эти способы работают на практике, будет видно из рассмотрения фрагментов программ.

2.4.4. Программа "PPV ТСНК"

По программе "PPV ТСНК" выполняется расчет простой полной выборки по точкам. Цель исследования формулируются следующим образом: оценить средний ресурс $R_{ср}$ и гамма-процентный ресурс $R(\gamma)$ объекта с помощью заданного вектора выборки наработок до свершившихся событий (отказов) x_i путем последовательного решения следующих задач

1. Задать требуемую ВНДПС $\gamma_{доп}$.

Решение задач (ведется при ORIGIN=1)									
1. Задаем требуемую вероятность не достижения предельного состояния (ВНДПС) γ . Согласно методики рекомендуется применять									
<table border="1"><thead><tr><th>"Вид отказа"</th><th>"Гамма"</th></tr></thead><tbody><tr><td>"Изнашивание"</td><td>0.8</td></tr><tr><td>"Кавитация. коррозия"</td><td>0.9</td></tr><tr><td>"Усталость металла"</td><td>0.95</td></tr></tbody></table>	"Вид отказа"	"Гамма"	"Изнашивание"	0.8	"Кавитация. коррозия"	0.9	"Усталость металла"	0.95	Принимаем $\gamma_{доп} := 0.8$
"Вид отказа"	"Гамма"								
"Изнашивание"	0.8								
"Кавитация. коррозия"	0.9								
"Усталость металла"	0.95								

Фрагмент 2-1

2. Образовать вектор ранжированной выборки x . В учебных целях выборку допускается образовать с помощью генератора случайных чисел для закона Вейбулла по условно заданным величинам математического ожидания, коэффициента вариации и объема выборки.

3. Проверить полученную выборку на отсев и при необходимости, откорректировать вектор выборки за счет отбрасывания крайних членов.

4. Получить опытное распределение ВНДПС (расчет по точкам).

5. Определить статистические характеристики полученной выборки.

6. Рассчитать параметры распределения вероятности для нескольких законов распределений, построить графики функций этих распределений и рассчитать искомые показатели надежности. Все указанные пункты программы (кроме шестого) показаны на фрагментах программы "PPV ТСНК".

На фрагменте 2-1 приводится начало программы и справочная таблица с допустимыми значениями ВНДПС. Показано выбранное значение $\gamma_{доп} = 0.8$ для случая, когда рассматривается процесс деградации износового типа.

На следующем фрагменте 2-2 дан пример двух вариантов ввода первичных членов выборки для последующего создания расчетного ранжированного вектора. Слева показан заблокированный вектор (с черной меткой), созданный на основе маски матрицы. Правее расположен вектор xx в виде таблицы. При этом оба вектора не были пока ранжированы, что произойдет позже.

Затем (фрагмент 2-3) следуют завершающие процедуры образования вектора выборки. Сначала дается подпрограмма образования третьего варианта образования выборки с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ). Для этого должны быть введены условные исходные данные (матожидание, коэффициент вариации и объем выборки). Это приведет к автоматическому образованию ранжированного вектора x по формуле

$$x := \text{sort} \left(\text{To} \cdot \text{rweibull} \left(nh, \frac{1}{kv} \right) \right)$$

Ниже этой формулы помещена очень важная подпрограмма, состоящая из скрипта с индексом a и условного перехода для выбора варианта образования выборки (случайные числа или ввод членов вручную).

На фрагменте 2-3 показан выбор варианта «вручную», когда, $a = 2$. Это значит, что для дальнейшего расчета взят исходный вектор xx из фрагмента 2-2, который был преобразован в искомый вектор x оператором

$$x := \text{if}(a = 1, x, \text{sort}(xx))$$

Под этим выражением помещены операторы для определения номера последней строки вектора и объема выборки ($n = 17$) и расчетная область вектора i . Если бы мы выбрали вариант «случайные числа», то получили бы вектор выборки объемом $n = 190$ (см. фрагмент 2-4).

После получения вектора выборки программа приступает к моментальной проверке крайних членов выборки на отсев. На фрагменте 2-5 показаны начальный и завершающий этапы этой операции.

При этом область части программы с операциями по проверке крайних членов на отсев была «захлопнута». Поэтому имеет смысл пояснить эту методику отдельно. Для решения задачи можно использовать метод Ирвина [46], согласно которому для проверки гипотезы о необходимости отбрасывания наименьшего первого члена t_1 выборки рассчитывается коэффициент α_1 по формуле

$$\alpha_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_N - t_1}. \quad (2.2)$$

Для проверки гипотезы о необходимости отбрасывания наибольшего последнего члена выборки t_N рассчитываем коэффициент α_N по формуле:

$$\alpha_N = \frac{t_N - t_{N-1}}{t_N - t_1}. \quad (2.3)$$

Полученные значения α_1 и α_N необходимо сравнить с коэффициентами 95-процентного и 99-процентного уровней достоверности (α_{95} и α_{99}), которые определяются по специальным таблицам [16].

2. Образование вектора выборки x можно выполнить путем вставки пустого вектора с соответствующим числом строк (при одной колонке) с последующим вводом туда членов выборки (вариант № 1) .или с помощью таблицы с вводом цифр с клавиатуры (вариант № 2).

вариант № 1 (матрица)

$xx :=$
 $\begin{pmatrix} 10.164 \\ 13.531 \\ 15.096 \\ 19.223 \\ 21.133 \\ 22.224 \\ 24.265 \\ 25.098 \\ 28.998 \\ 29.658 \\ 34.443 \\ 42.95 \\ 50 \\ 55 \end{pmatrix}$

вариант № 2 (таблица)

$xx :=$

11
12
15
22
34
33
26
17
55
43
33
33
22
43
12
124
200

Фрагмент 2-2

В учебных целях образуем вектор выборки с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ) по условно заданным величинам математического ожидания To , коэффициента вариации kv и объема выборки nh .

Объем
выборки

$nh := 190$

Матожидание

$To := 50$

Коэффициент
вариации

$kv := 0.55$

Тогда вектор, ранжированный по принципу возрастания выборки, можно определить по формуле с помощью оператора ГСЧ для распределения Вейбулла (справа показана верхняя часть вектора из первых 8 строк, которую показывать необязательно)

$x := \text{sort} \left(To \cdot rweibull \left(nh, \frac{1}{kv} \right) \right)$ ГСЧ

$x =$

	1
1	2.126
2	4.301
3	5.351
4	7.781
5	9.094
6	9.117
7	9.572
8	9.834

Для выбора способа использовать скрипт

$a :=$

Случайные числа
Вручную

$a = 2$

Посмотреть результат (клик)

$\underline{x} := \text{if}(a = 1, x, \text{sort}(xx))$

$n := \text{length}(x)$ $n = 17$ $i := 1..n$

Фрагмент 2-3

```

a :=
  Случайные числа
  Вручную
a = 1

Посмотреть результат (клик)

x := if(a = 1, x, sort(xx))

n := length(x)    n = 190    i := 1 .. n

```

Фрагмент 2-4

3. Проверка полученной выборки на отсев двух последних членов и ее корректировка (при необходимости) за счет их отбрасывания и уменьшения объема выборки.

Критерии оценки для отбрасывания самого крайнего члена

последнего	допустимый
$\alpha_1(n) := \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$	$\alpha_{гр}(n) := \frac{1}{\sqrt{n-1}}$
$\alpha_1(n) = 0.118$	$\alpha_{гр}(n) = 0.073$
	$x_n = 139.1$

"p\N"	"N1"	"N2"	"N3"
"n"	190	189	189
"Xn"	139.1	122.906	122.906

отсев =

Фрагмент 2-5

Корреляционный анализ этих таблиц позволил получить следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{95} &= \frac{1,3}{\sqrt{N-1}} \\ \alpha_{99} &= \frac{1,7}{\sqrt{N-1}} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Гипотеза подтверждается и проверяемый член исключается из выборки, если α_1 и (или) $\alpha_N > \alpha_{99}$. Гипотеза не подтверждается, а проверяемый член не исключается из выборки, если α_1 и (или) $\alpha_N < \alpha_{95}$.

Если коэффициент α_1 или α_N лежит между значениями α_{95} и α_{99} , то задача

является неопределенной и решается на субъективной основе.

Учитывая вероятностное происхождение этой методики, и для исключения из анализа фактора субъективности, в рассматриваемом фрагменте 2-5 коэффициенты уровня достоверности α_{95} и α_{99} были заменены одним критерием

$$\alpha_{гр}(n) = \frac{1}{\sqrt{n-1}}. \quad (2.5)$$

Попутно отметим, что задача о проверке крайних членов выборки на отсев возникает не всегда. Часто при определении параметров теоретических распределений с помощью эмпирических распределений этого не требуется, поскольку методика предусматривает автоматическое усечения правого «хвоста» распределения.

После такого «лирического» отступления все же продолжим рассмотрение программы "PPV ТСНК" на фрагменте 2-6, где приводятся операторы для расчета искомых статистических моментов.

Расчеты выполнены по всем правилам «хорошего статистического тона». Здесь определены не только матожидание, среднеквадратичная ошибка и коэффициент вариации, но и доверительные границы с учетом поправки Стьюдента для заданной односторонней доверительной вероятности.

Нам было важно показать, что редактор MATHCAD оснащен всеми инструментами для точной и моментальной оценки указанных величин без обращения к справочной математической литературе. С той же целью в нижней части фрагмента 2-6 приведен расчет тех же моментов по обычным формулам. Как и следовало ожидать, результаты этого расчета в точности совпали с основным расчетом.

Завершает рассмотрение первого этапа расчетов по программе "PPV ТСНК" небольшой по размерам, но самый важный по содержанию фрагмент 2-7 с программой построения искомого эмпирического распределения по простейшей формуле типа

$$P_i = 1 - \frac{i}{N}. \quad (2.6)$$

На том же фрагменте показана и другая корректная формула для расчета опытных ВНДПС типа

$$P_i = \prod_{i=1}^i \frac{n-i}{n-i+1}. \quad (2.7)$$

Эта формула временно заблокирована, но она дает абсолютно те же результаты, что и формула 2.6. Любознательный читатель может сам доказать это тождество путем раскрытия и преобразований данного выражения.

На графике фрагмента 2-7 показано две кривые. Пунктирной линией обозначено опытное распределение, получаемое для изначальной выборки (до отбрасывания двух членов). Вторая линия (с точками) — это завершающая кривая.

Именно для нее и будут затем производиться операции по расчету параметров теоретических распределений.

3. Определяем следующие характеристики полученной выборки:

- максимальный член выборки $\max(t) = 55$
- минимальный член выборки, $\min(t) = 11$
- математическое ожидание, $\boxed{MO := \text{mean}(t)}$ $MO = 27.4$
- среднеквадратичное отклонение $\boxed{SO := \text{Stdev}(t)}$ $SO = 13.233$
- коэффициент вариации, $\boxed{Kvar := \frac{SO}{MO}}$ $Kvar = 0.483$

3а. Расчет доверительных границ

- задаемся двухсторонней доверительной вероятностью β и определяем одностороннюю вероятность α , $\beta := 0.85$
 $\alpha := \frac{1 - \beta}{2}$ $\alpha = 0.075$
- вычисляем коэффициент Стьюдента $\boxed{sT := qt\left(\begin{matrix} \alpha \\ 1 - \alpha \end{matrix}, n - 1\right)}$ $sT = \begin{pmatrix} -1.512 \\ 1.512 \end{pmatrix}$

Доверительные границы рассчитываются по формуле

$$\boxed{M(MO, Kvar, n) := MO \cdot \left(1 + sT \cdot \frac{Kvar}{\sqrt{n}}\right)}$$

В частности нижняя доверительная граница $M(MO, Kvar, n)_1 = 22.547$ составит

В учебных целях покажем иные исходные формулы для расчета математического ожидания и среднквадратичной ошибки

$$\text{матож} := \frac{\sum t}{n2} \quad \boxed{\text{срквош} := \sqrt{\frac{\sum (t - \text{матож})^2}{n2 - 1}}}$$

или

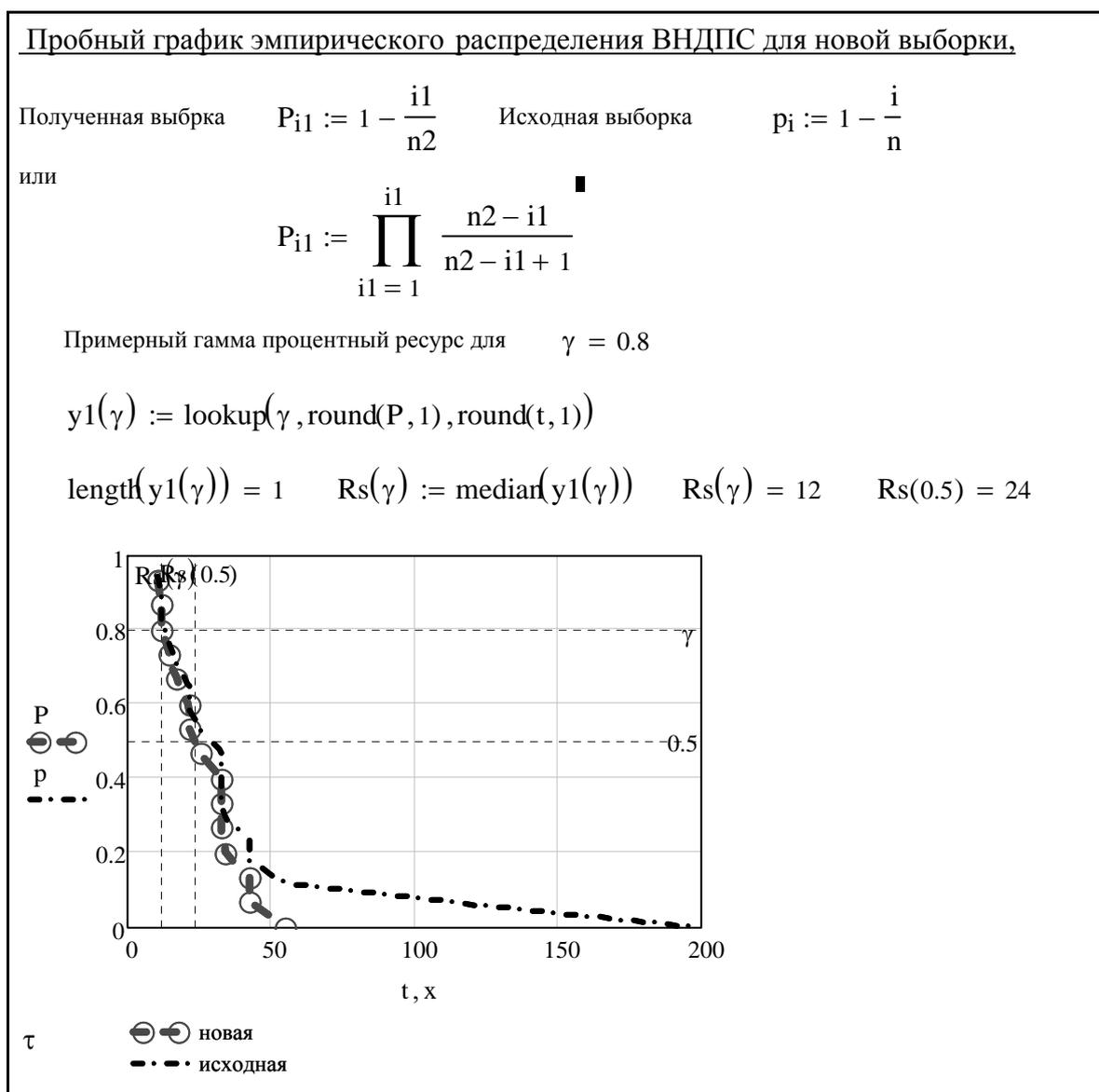
$$\boxed{\text{срквошиб} := \sqrt{\text{Var}(t)}}$$

Эти формулы дают результаты, совпадающие с основным расчетом

$$\text{матож} = 27.4 \quad \text{срквош} = 13.233 \quad \text{срквошиб} = 13.233$$

На фрагменте 2-7 приведена еще одна оригинальная программа для приближенной оценки гамма-процентного ресурса без предварительного определения закона распределения. В рассматриваемом примере 80-процентный ресурс составил примерно 12 тыс.ч, медианный ресурс (для $\gamma = 0.5$) — 24 тыс. ч.

Более точные значения этих ресурсов были определены на основе выбора теоретических законов распределений. Они составили 13 и 26 тыс.ч соответственно. Указанный способ оценки гамма-процентного ресурса можно уверенно применять только при построении эмпирического распределения по точкам при объеме выборки более 10—15 членов.



Фрагмент 2-7

2.4.5. Программа "PUV ТСНК"

По программе "PUV ТСНК" выполняется расчет простой усеченной выборки по точкам. Она является более универсальной поскольку, во-первых, предыдущая программа является ее частным случаем при плане [NUN], а во вторых она

позволяет рассчитывать усеченные выборки по планам [NУr и T]

Особенности программы PUV ТСНК можно видеть на следующих фрагментах. Фрагмент 2-8 с начальным этапом программы подобен операциям на фрагментах 2-1...2-3, но имеет следующие отличия в связи с возможным применением усеченных выборок. Во-первых, для ввода данных вручную используется только вариант ввода в таблицу, а не в матрицу. Это позволяет постепенно пополнять таблицу новыми данными по мере возникновения отказов. Во-вторых, при создании усеченных выборок xx (когда $r < N$) приходится отдельно вводить число поставленных под наблюдение объектов Nn для варианта выборки, образованной вручную, и номер последнего отказа No для учебного варианта образования вектора с помощью ГСЧ.

В следующем фрагменте 2-8 показан скрипт для выбора способа ввода чисел (в данном случае выбран вариант «вручную», когда, $a = 2$). В отличие от программы для полной выборки под этим скриптом помещен скрипт для выбора плана испытаний (показан план [NUn]). Далее следует вспомогательная программа для оценки наработки до последнего отказа.

После указанных операций следует проверка крайних членов выборки на отсев (фрагмент 2-5) и расчет статистических моментов для случая $r = N$ (фрагмент 2-6), а затем приводятся подпрограммы построения эмпирического распределения для выбранного способа образования выборки и плана испытаний (фрагмент 2-10).

Следует обратить внимание на то, что для расчета ВНДПС в данном случае выбрана формула 2.7, а не равноценная и более простая формула 2.6. Причина этого выбора станет более понятной при расчете цензурированных выборок по программе «CV ТСНК», где используется подобная, но более универсальная формула 2.12. Это замечание имеет принципиальное значение для понимания того факта, что усеченная выборка является частным (хотя и простейшим!) случаем цензурированной выборки.

Искомые графики зависимости ВНДПС от ресурса показаны на фрагменте 2-11 в двух вариантах. График а) относится к усеченной выборке, введенной в вектор xx вручную и подверженной отсеву. На графике б) показана выборка, введенная в вектор генератором случайных чисел.

Для большей наглядности на графиках построены кривые не только для усеченных, но и для полных исходных выборок. Из графиков видно, что имеются различия в методиках образования распределения ВНДПС путем ввода чисел вручную и с помощью ГСЧ.

В первом случае мы не знаем поведение распределения, если испытания будут продолжены. В случае применения ГСЧ пришлось генерировать всю выборку, а число r задавать среди уже известных точек. Однако для решения нашей задачи эти различия не имеют принципиального значения.

Напомним, что полученные эмпирические распределения являются исходными данными для выбора и определения параметров распределений по программам, которые расположены ниже выполненных расчетов. Эти программы требуют особого рассмотрения в главе 2.6.

Решение задач (ведется при ORIGIN=1)

1. Задаем требуемую вероятность не достижения предельного состояния (ВНДПС) γ . Согласно методике рекомендуется применять

"Вид отказа"	"Гамма"
"Изнашивание"	0.8
"Кавитация. коррозия"	0.9
"Усталость металла"	0.95

Принимаем

$$\gamma_{\text{доп}} := 0.8$$

2. а. Получить первичный вектор выборки x с помощью команды "добавить таблицу" с вводом и добавлением в столбец новых цифр с клавиатуры. В случае применения плана [NUr и T] установить общее число объектов, изначально поставленных под наблюдение

Поставлено под наблюдение объектов

$$N_n := 20$$

xx :=

11
12
15
22
34
33
26
17
55
43
33
33
22
43
12
124
200

2. б. В учебных целях образуем вектор выборки с помощью генератора случайных чисел по условно заданным величинам математического ожидания T_0 , коэффициента вариации k_v и объема выборки n_h

Объем выборки

$$n_h := 150$$

Матожидание

$$T_0 := 50$$

Коэффициент вариации

$$k_v := 0.333$$

Тогда вектор, ранжированный по принципу возрастания выборки, можно определить по формуле с помощью оператора ГСЧ для распределения Вейбулла (справа показана верхняя часть вектора из первых 8 строк, которую показывать необязательно)

$$x := \text{sort} \left(T_0 \cdot \text{rweibull} \left(n_h, \frac{1}{k_v} \right) \right)$$

В случае применения плана [NUr и T] установить число отказов при котором испытания были приостановлены

Требуемое число отказов для генератора чисел

$$N_o := 100$$

x =

	1
1	7.389
2	11.322
3	12.923
4	16.211
5	17.816
6	18.68
7	20.719
8	22.64

Фрагмент 2-8

Выбрать способ ввода данных а

а := Случайные числа
Вручную а = 2

Таким образом получен вектор ранжированной выборки

$x_{\text{м}} := \text{if}(a = 1, x, \text{sort}(xx))$ n := length(x) n = 17 i := 1..n

Установить план наблюдений. Посмотреть результат (клик)

План := N,U,N
N,U,n
N,U,T План = 2

Tot := $\begin{cases} x_n & \text{if } a = 2 \\ x_{N_0} & \text{otherwise} \end{cases}$ Tot = 200
Наработка до последнего отказа

Фрагмент 2-9

Построение эмпирического распределения ВНДС

$N_m := \begin{cases} \text{if } a = 2 \\ \quad \begin{cases} n_2 & \text{if План} = 1 \\ N_n & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{if } a = 1 \\ \quad \begin{cases} n_2 & \text{if План} = 1 \\ n_2 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}$	$N_0 := \begin{cases} \text{if } a = 2 \\ \quad \begin{cases} n_2 & \text{if План} = 1 \\ n_2 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{if } a = 1 \\ \quad \begin{cases} n_2 & \text{if План} = 1 \\ N_0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}$
---	---

N_m = 20 N_n = 20 N₀ = 100 N₀ = 15

Полученная выборка i1 := 1..N₀

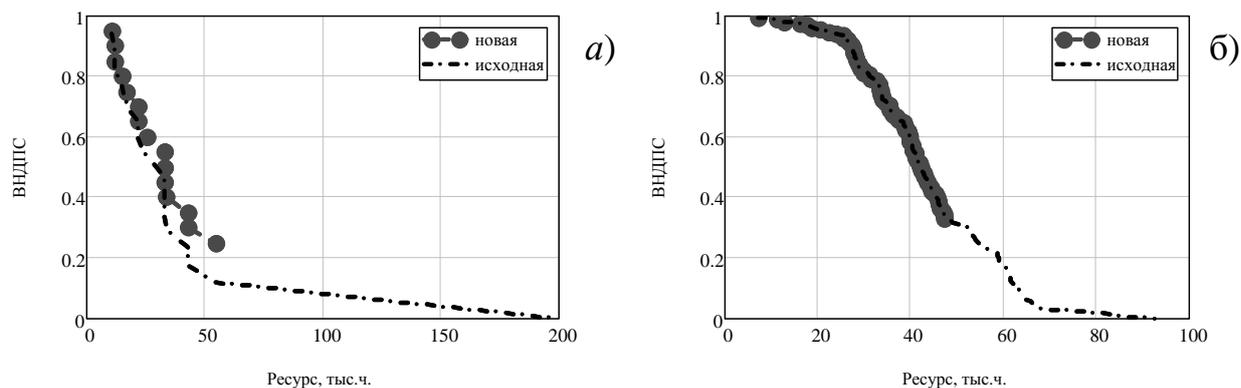
$P_{i1} := \prod_{i1=1}^{i1} \frac{N_m - i1}{N_m - i1 + 1}$	$P_i := 1 - \frac{i}{n}$	$P_{i1} := 1 - \frac{i1}{N_m}$
---	--------------------------	--------------------------------

Выборка := $\begin{cases} \text{"Случайная"} & \text{if } a = 1 \\ \text{"Ручная"} & \text{otherwise} \end{cases}$ Выборка = "Ручная"

Время наблюдения до последнего отказа

Tt := $\begin{cases} t_{N_0} & \text{if Выборка} = \text{"Случайная"} \\ t_{n_2} & \text{otherwise} \end{cases}$ До отсева Tot = 200
После отсева Tt = 55

Фрагмент 2-10



Фрагмент 2-11

2.4.6. Программа “PPV INT”

В литературе по статистике для больших по объему выборок обычно применяется методика обработки информации по интервалам, а не по точкам, как это показано в предыдущих программах. Поэтому имеет смысл и нам рассмотреть этот классический способ на примере программы "PPV INT" с алгоритмом расчета простой полной выборки по интервалам.

Постановка задачи и первая часть этой программы от ввода исходных данных до проверки выборок на отсеивание выполняется по тем же правилам, что в программе "PPV ТСНК" (фрагменты 2-1...2-5). Затем следуют операции по разбиению размаха выборки на интервалы, подсчета членов выборки для каждого интервала и построения, в конечном счете, гистограммы и эмпирического распределения ВНДПС. При разработке алгоритмов этих расчетов было учтено не существенное, на первый взгляд, различие в методах подсчета частот отказов по интервалам. Могут быть два варианта подсчета — для середины или для конца интервала. Эти варианты в литературе обычно подробно не рассматриваются и часто допускается характерная ошибка — накопленную вероятность (ВНДПС) рассчитывают для конца интервала, но ее относят к середине интервала. При очень больших выборках, например объемом $N > 500$, это не имеет существенного значения, но для выборок объемом $N < 100$ такое смещение дает заметную погрешность, соответствующую половине шага разбиения оси. В нашей программе расчет для середин интервалов выполняется с целью вычисления моментов выборки, а для построения эмпирического распределения — выполняется расчет для конца интервала.

В редакторе MATHCAD для создания гистограмм предусмотрено два оператора

$$histogram(k,t) \text{ и } hist(tt,t) , \quad (2.8)$$

где k — число интервалов между первым и последним членом выборки, t — вектор выборки, tt — вектор верхних границ интервалов.

Первый оператор *histogram* используется для оценки моментов интервальной выборки (фрагмент 2-12), а второй *hist* для получения эмпирического распределения ВНДПС (фрагмент 2-13).

Рассмотрим некоторые особенности и обоснования этих подпрограмм. Чаще всего в литературе [47] рекомендуются две формулы (2.9) и (2.10) для определения числа интервала при разбиении оси абсцисс в зависимости от объема выборки N .

$$k = 1 + 3.3 \lg N, \quad (2.9)$$

$$k = 5 \lg N. \quad (2.10)$$

Сравнительные графики этих функций, построенные на рис. 2-7, позволяют отдать предпочтение второй формуле (2.10), поскольку она лучше отражает преимущества увеличения объема выборки с точки зрения повышения достоверности исследования. Поэтому в наших трудах рекомендуется рассчитывать число интервалов по этой формуле.

Для построения эмпирического распределения по интервалам разработана и применена оригинальная методика расчета ВНДПС с помощью интенсивности отказов λ_j

$$P_j = \prod_{j=1}^j \left(\frac{1}{1 + \lambda_j} \right). \quad (2.11)$$

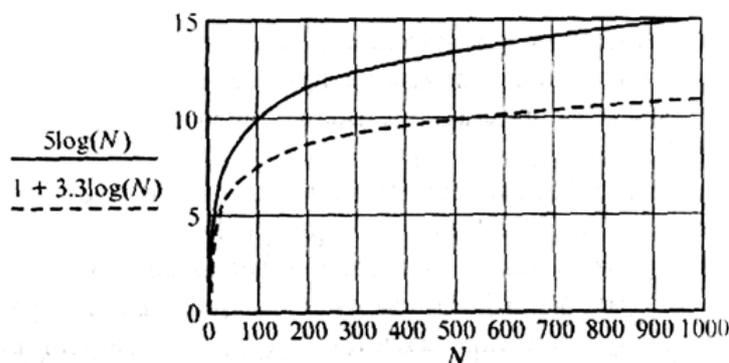


Рисунок 2-7 Сравнение вариантов расчета числа интервалов

Напомним, что интенсивность отказов λ_j — это отношение числа отказов в j -м интервале к еще «живым» объектам в этом интервале, т.е. построение графиков можно выполнить для конца интервала по формуле 2.12.

$$\lambda_j = \frac{n_j}{N - \sum_{j=1}^j n_j}. \quad (2.12)$$

3. Определяем следующие характеристики полученной выборки:

bim := ceil(5·log(m2)) bim = 7 hgr := histogram (bim, t2) j := 1.. bim

$$fu := \frac{hgr^{(2)}}{\sum hgr^{(2)} \cdot \left(\frac{t2_{m2} - t2_1}{bim} \right)} \quad \sum hgr^{(2)} = 16 \quad t2_{m2} = 74$$

$$\Delta := \frac{t2_{m2} - t2_1}{2 \cdot bim} \quad too_j := \Delta + (hgr^{(1)})_j \quad \Delta = 5$$

- максимальный член выборки
- минимальный член выборки,
- математическое ожидание интервльное
- математическое ожидание выборочное
- коэффициент вариации интервальный,

max(t2) = 74

min(t2) = 4

$SS := 2 \cdot \Delta \cdot fu \cdot hgr^{(1)}$ SS = 32.75

$MO := mean(t2)$ MO = 32.375

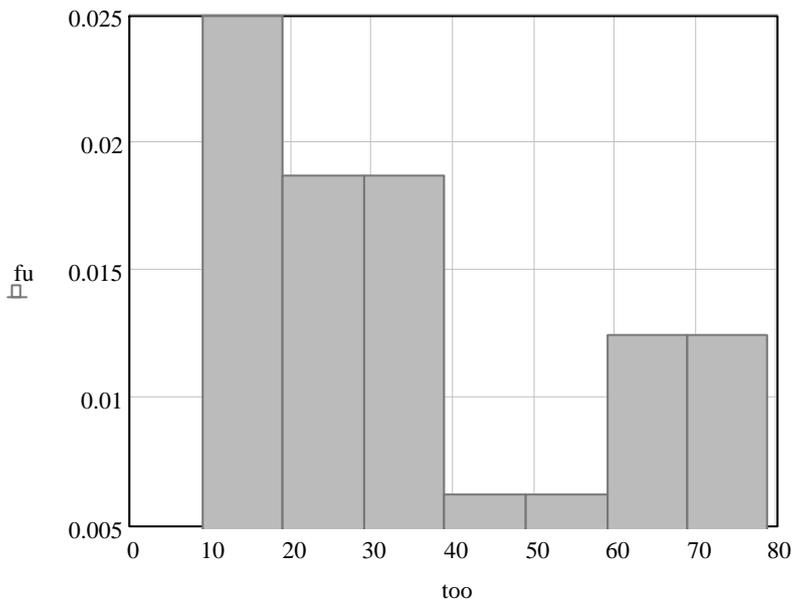
$$Kvar := \frac{\sqrt{\frac{hgr^{(2)} \cdot (hgr^{(1)} - SS)^2}{\sum hgr^{(2)} - 1}}}{SS} \quad Kvar = 0.668$$

- коэффициент вариации выборочный

$Kv := \frac{Stdev(t2)}{MO}$ Kv = 0.682

- объем выборки

$nv := \sum hgr^{(2)}$ nv = 16



Фрагмент 2-12

1. Построение эмпирического распределения по интервалам

1.1 Определяем нижнюю lower и верхнюю upper границы выборки наработки до отказа, число интервалов bin и шаг разбиения h оси времени по формулам

$$\text{lower} := \min(t2) \quad \text{upper} := \max(t2) \quad \text{bin} := \text{ceil}(5 \cdot \log(m2)) \quad h := \frac{\text{upper} - \text{lower}}{\text{bin}}$$

1.2 Рассчитываем эмпирические значения безразмерной интенсивности отказов l_k , вероятности безотказной работы P_k и плотности распределения вероятности $f2_k$

$$\text{bin} = 7 \quad h = 10 \quad \text{ch} := \text{lower} \quad \text{ch} = 4 \quad j := 1.. \text{bin} \quad \text{tt}_j := (\text{ch} + h \cdot j)$$

$$f := \text{hist}(\text{stack}(0, \text{tt}), t2) \quad \text{bin} = 7 \quad k := 1.. \text{bin} \quad \Delta = 5$$

$$cc_k := m2 - \sum_{k=1}^k f_k \quad \text{bn} := \text{if}(cc_{\text{bin}} = 0, \text{bin} - 1, \text{bin}) \quad \text{bn} = 6 \quad k := 1.. \text{bn} \quad cc_{\text{bin}} = 0$$

Безразмерная интенсивность по концам интервала

$$l_k := \frac{f_k}{m2 - \sum_{k=1}^k f_k}$$

Эмпирическая ВНДПС

$$P_k := \prod_{k=1}^k \frac{1}{1 + l_k}$$

Плотность вероятности

$$f2_k := l_k \cdot P_k$$

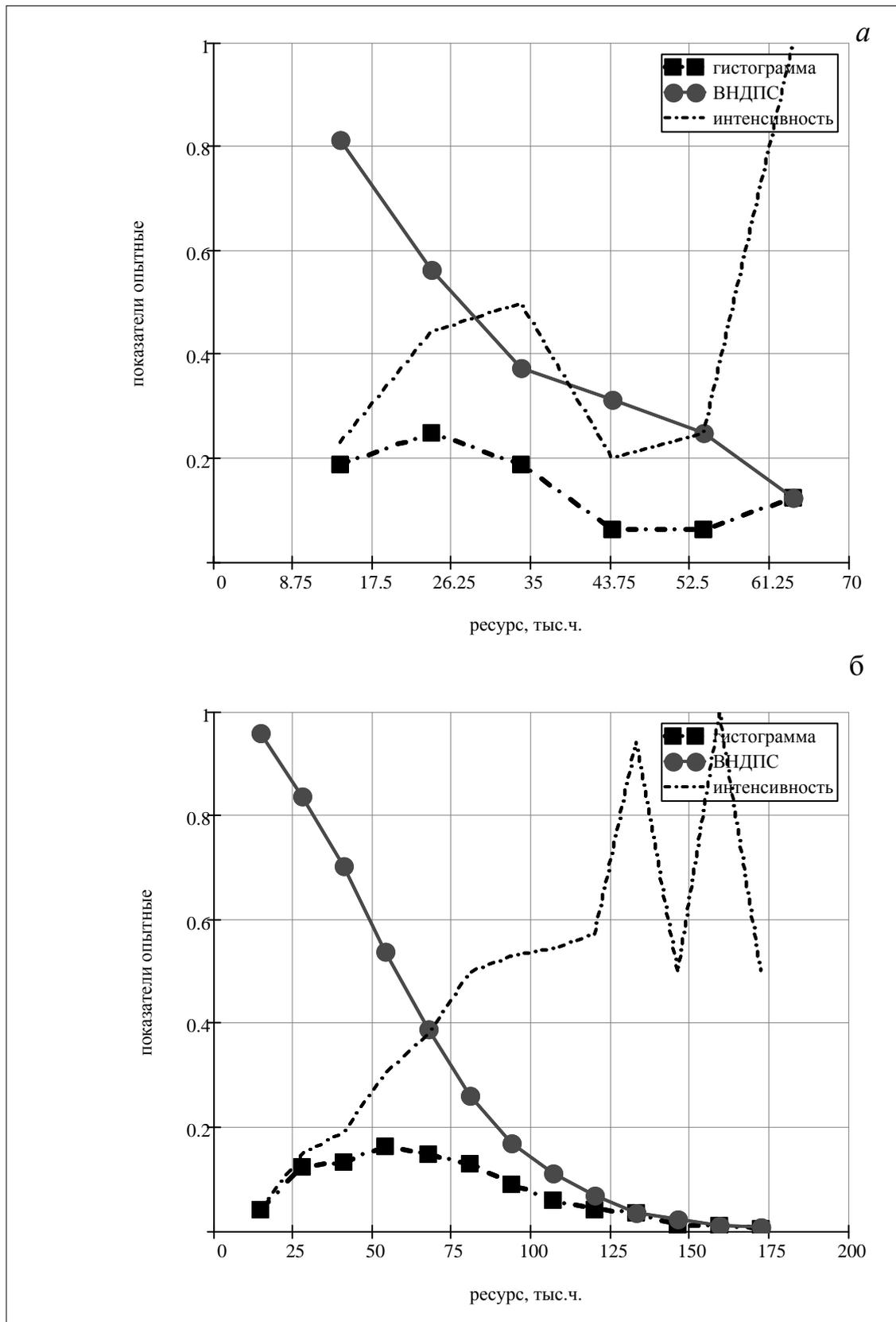
$$to_k := \text{tt}_k$$

Итоговая таблица распределения : $M_{k,1} := k$ $M_{k,2} := \text{tt}_k - \frac{h}{1}$ $M_{k,3} := \text{tt}_k$ $M_{k,4} := f_k$

$$M_{k,5} := l_k \quad M_{k,6} := f2_k \quad M_{k,7} := P_k \quad \text{mm1} := ("k" "ts" "tkr" "f" "L" "f2" "P")$$

$$\text{stack}(\text{mm1}, M) = \begin{pmatrix} "k" & "ts" & "tkr" & "f" & "L" & "f2" & "P" \\ 1 & 4 & 14 & 3 & 0.231 & 0.188 & 0.813 \\ 2 & 14 & 24 & 4 & 0.444 & 0.25 & 0.563 \\ 3 & 24 & 34 & 3 & 0.5 & 0.188 & 0.375 \\ 4 & 34 & 44 & 1 & 0.2 & 0.063 & 0.313 \\ 5 & 44 & 54 & 1 & 0.25 & 0.063 & 0.25 \\ 6 & 54 & 64 & 2 & 1 & 0.125 & 0.125 \end{pmatrix}$$

Фрагмент 2-13



Фрагмент 2-14

Формула (2.12) является частным случаем более общего выражения для интенсивности отказов.

Результаты расчета по этим формулам (в символах программы) сведены на фрагменте (2-13) в матрицу М, куда добавлена верхняя строка m1 с названия-

ми столбцов матрицы. По данным этой матрицы автоматически строится графики эмпирических распределений ВНДПС, интенсивности и плотности, показанные на фрагменте 2-14а. На фрагменте 2-14б показаны графики для случая ввода членов выборки достаточно большого объема (500 членов) с помощью ГСЧ. Сравнение этих графиков показывает позитивное влияние объема выборки на вид распределений, который лучше согласуется с теоретическим распределением (см. раздел 2.4).

Следует обратить внимание и на то, что в процессе расчета был автоматически исключен последний интервал с нулевым значением НДПС. Такое условие пришлось ввести в программу для предотвращения ее зависания при дальнейшем определении параметров теоретических распределений для некоторых законов.

2.4.7. Программа "CV ТСНК"

Приводимые далее фрагменты программы "CV ТСНК" для расчета цензурированной выборки по точкам, содержат уникальную методику оценки вероятностных показателей цензурированных выборок, которые состоят как из отказавших, так и еще не отказавших объектов.

Эта особенность проявляется уже на первом фрагменте 2-15 рассматриваемой программы, где указывается на необходимость образования не одного, а двух векторов случайных чисел, т.е. для выборок наработок до отказов и до цензурирований. Далее следуют уже знакомые операции (см. программу PPV ТСНК) по выбору способа ввода этих данных (вручную или с помощью ГСЧ) и по проверке выборки отказов на отсеивание крайних членов. После этого программа переходит сразу же к построению эмпирических распределений (фрагмент 2-15), поскольку статистические моменты для цензурированных выборок можно будет определить позже и только с помощью теоретических распределений.

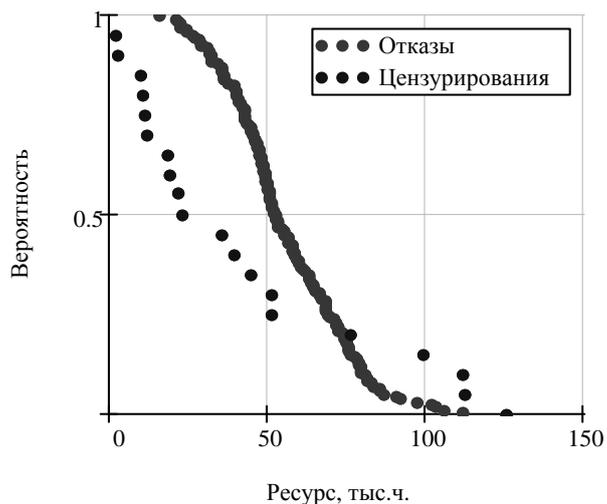
В основу построения на фрагменте 2-15 эмпирического распределения положен следующий оригинальный алгоритм подсчета числа цензурирований n_i и ВНДПС P_i для каждого i -го члена выборки наработок до отказа (формула 2.13).

$$nc = hist(stack(0, t2), t);$$

$$P_i = \prod_{i=1}^i \frac{(m2 + m0) - \left(i + \sum_{i=1}^i nc_i \right)}{(m2 + m0) - \left(i + \sum_{i=1}^i nc_i \right) + 1}. \quad (2.13)$$

Оригинальность алгоритма состоит в том, что в данном случае используется оператор *hist* для построения гистограммы вектора цензурирований, но при этом вектор выборки отказов t используется как верхняя граница неравномерного интервала между отказами.

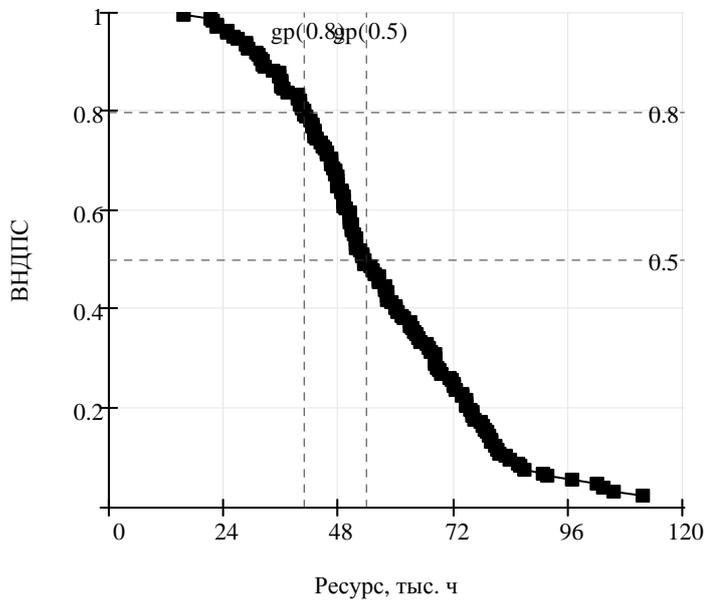
Автоматически построенный график позволяет получить первое впечатление об выборках отказов и цензурирований.



Определение эмпирических распределений вероятности безотказной работы,

$$n := \text{hist}(\text{stack}(0, t2), t0)$$

$$P_{i1} := \prod_{i1=1}^{i1} \frac{(m2 + m0) - \left(i1 + \sum_{i1=1}^{i1} n_{i1} \right)}{(m2 + m0) - \left(i1 + \sum_{i1=1}^{i1} n_{i1} \right) + 1}$$



Фрагмент 2-15

1. Построение эмпирического распределения:

1.1 Определяем нижнюю lower и верхнюю upper границы выборки наработки до отказа, число интервалов bin и шаг разбиения h оси времени по формулам

$$\text{lower} := \min(t2) \quad \text{upper} := \max(t2) \quad \text{bin} := \text{ceil}(5 \cdot \log(m2)) \quad h := \frac{\text{upper} - \text{lower}}{\text{bin}}$$

1.2 Рассчитываем эмпирические значения безразмерной интенсивности отказов λ_k ,

вероятности безотказной работы P_k и плотности распределения вероятности $f2_k$

$$\text{bin} = 11 \quad h = 8.352 \quad \text{ch} := \text{lower} \quad \text{ch} = 8.85 \quad j := 1.. \text{bin} \quad \text{tt}_j := (\text{ch} + h \cdot j)$$

$$f := \text{hist}(\text{stack}(0, \text{tt}), t2) \quad f1 := \text{hist}(\text{stack}(0, \text{tt}), t0) \quad \text{bin} = 11 \quad k := 1.. \text{bin}$$

$$cc_k := (m + m0) - \sum_{k=1}^k (f_k + f1_k) \quad \text{bn} := \text{if}(cc_{\text{bin}} = 0, \text{bin} - 1, \text{bin}) \quad k := 1.. \text{bn} \quad cc_{\text{bin}} = 6 \quad \text{bn} = 11$$

Интенсивность отказов безразмерная

$$\lambda_k := \frac{f_k}{(m + m0) - \sum_{k=1}^k (f_k + f1_k)}$$

Вероятность недостижения предельного состояния или вероятность безотказной работы

$$P_k := \prod_{k=1}^k \frac{1}{1 + \lambda_k}$$

Плотность вероятности безразмерная

$$f2_k := \lambda_k \cdot P_k$$

Итоговая таблица распределения:

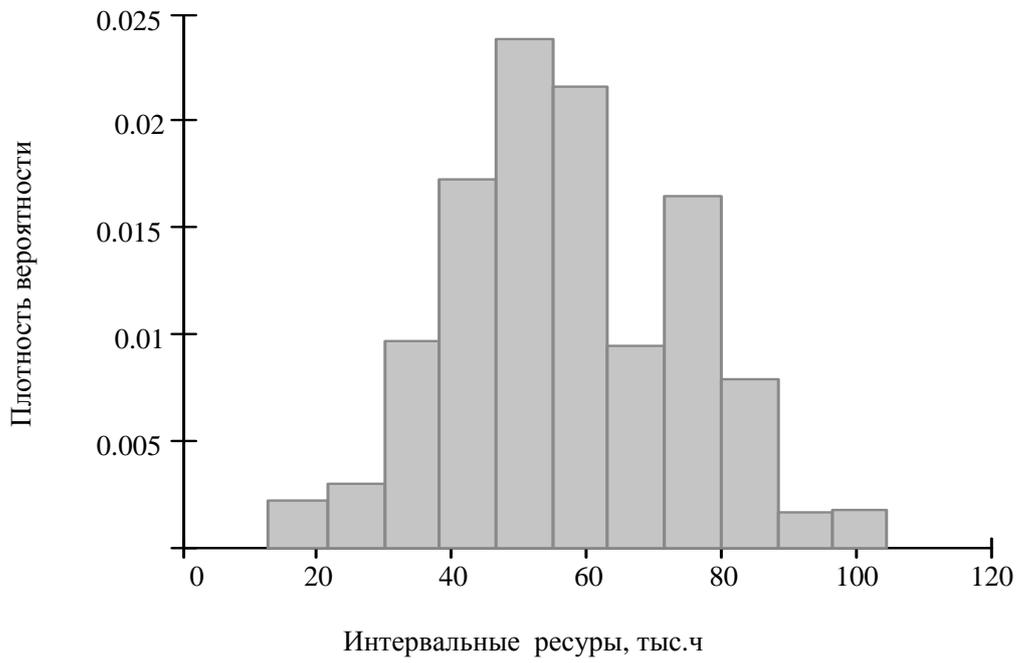
$$M_{k,1} := k \quad M_{k,2} := \text{tt}_k - \frac{h}{1} \quad M_{k,3} := \text{tt}_k \quad M_{k,4} := f_k \quad M_{k,5} := f1_k \quad M_{k,6} := \lambda_k \quad M_{k,7} := f2_k$$

$$M_{k,8} := P_k \quad \text{mm1} := ("k" \quad "ts" \quad "tkr" \quad "f" \quad "f1" \quad "лямбда" \quad "f2" \quad "P")$$

stack (mm1, M) =

"k"	"ts"	"tkr"	"f"	"f1"	"лямбда"	"f2"
1	8.85	17.203	3	4	0.018	0.018
2	17.203	25.555	4	2	0.025	0.024
3	25.555	33.907	13	3	0.092	0.081
4	33.907	42.259	23	1	0.197	0.144
5	42.259	50.612	31	3	0.373	0.199
6	50.612	58.964	28	0	0.509	0.18
7	58.964	67.316	12	1	0.286	0.079
8	67.316	75.668	21	0	1	0.137
9	75.668	84.021	10	0	0.909	0.065
10	84.021	92.373	2	0	0.222	0.013
11	92.373	100.725	2	1	0.333	0.015

Гистограмма и опытное распределения:



- ▣ Плотность (Б/р)
- ВДПС
- · - Интенсивность (Б/р)

Фрагмент 2-17

2.4.8. Программа "CV INT"

Программа "CV INT" — это программа для расчета цензурированной выборки по интервалам. Она отличается от программы "PPV INT" только тем, что в основной формуле для расчета безразмерной интенсивности отказов учитываются гистограммы как отказов, так и цензурирований. Формулы для вероятности безотказной работы и плотности вероятности имеют такой же вид. По этим формулам выполняется автоматическое построение таблицы распределений (фрагмент 2-16) и соответствующих им графиков (фрагмент 2-17).

2.5. Законы распределений вероятностей

2.5.1. Общие сведения о законах распределений

Рассмотренные выше варианты расчета опытных распределений вероятностей в редакторе MATHCAD являются лишь первым, подготовительным разделом общих программ оценки таких показателей надежности, как средний, медианный и гамма-процентный ресурсы.

Для решения этой задачи у всех программ имеется второй раздел с одинаковыми алгоритмами выбора и расчета параметров нескольких теоретических распределений. Этот раздел расположен непосредственно после фрагмента с графиком опытной ВНДПС, а содержание входящих в него оригинальных программ будет подробно рассмотрено в параграфе 2.6.7.

Здесь важно еще раз подчеркнуть, что умение оперировать законами распределений в первую очередь полезно для оценки вероятностных показателей надежности по опытным данным с максимальной достоверностью. Без них, например, вообще невозможно анализировать усеченные и цензурированные выборки. Для простых полных выборок, у которых первые два статистических момента вроде бы известны, гамма-процентный ресурс так же нельзя определить без теоретических распределений.

Теоретические распределения играют основную роль при решении другой проблемы, которая так же рассматривается в этой книге (глава 3). Проблема заключается в вероятностном моделировании процессов деградации элементов машин, что необходимо для прогнозирования и обеспечения их надежности на стадии проектирования.

Теория вероятностей предлагает много законов распределений, но лишь некоторые из них применяются в этой монографии для расчетов показателей качества и надежности техники.

К таким законам относятся следующие непрерывные двухпараметрические распределения:

- нормальное распределение (распределение Гаусса);

- логарифмически нормальное распределение (далее — логнормальное распределение);

- распределение Вейбулла;

- равномерное распределение и другие.

Двухпараметрические распределения зависят от двух параметров — масштаба a и формы b , которые связаны с моментами 1-го и 2-го порядка выборки или, что, то же самое, со средним значением и коэффициентом вариации.

Кроме этих законов в книге будут показаны некоторые другие двух параметрические распределения, полученные при моделировании надежности.

У однопараметрических распределений имеется только один параметр — параметр масштаба a . Параметр формы этих распределений, определяемый функцией для закона Вейбулла при $b = const$. Для распределения Релея $b = 2$, а для экспоненциального распределения $b = 1$.

Если в двухпараметрические распределения ввести еще один параметр C — параметр смещения, то можно получить соответствующие трехпараметрические распределения. Тогда появляется возможность «подгонять» любое теоретическое распределение к эмпирическому распределению с минимальной погрешностью, но при этом пропадает связь между их статистическими параметрами. Поэтому применение трехпараметрических распределений здесь не рассматривается.

Далее будут использоваться три вида функции распределений вероятностей от наработки t . Первый вид функции относится к интегральной оценке накопленной вероятности свершившихся событий. При исследовании показателей безотказности для этого используется показатель ВБР — «вероятность безотказной работы» $P(t)$, а для оценки долговечности ВНДПС — «вероятность не достижения предельного состояния» $\gamma(t)$. С математической точки зрения эти показатели совершенно равноценны, поскольку определяются по одинаковым алгоритмам. Поэтому далее в расчетных процедурах этот показатель чаще будем изображать в виде функции $P(t)$, но название (ВБР или ВНДПС) будем выбирать в зависимости от цели нашего исследования. Особенно это важно для расчета гамма-процентного ресурса по соответствующей функции $R(\gamma)$.

Следующий вид функции — плотность вероятности $f(t)$ в трудах ученых — математиков считается основной характеристикой совокупности случайных событий. В любой книге по статистике можно найти картинку с изображением колоколообразного графика этой функции, хотя ее рабочее назначение не совсем понятно. В нашей работе этот показатель является вспомогательным, хотя форму графика $f(t)$ иногда можно использовать для качественной оценки закона распределения.

Еще одной функцией распределения является интенсивность отказов $\lambda(t)$, которую трудно найти в математических трудах, но при исследовании надежности эта функция играет заметную роль. Например, по графику этой функции опытный специалист может судить не только о законе распределения, но и о физике деградационного процесса. При исследовании внезапных отказов, когда $\lambda(t) = \lambda = const$, этот показатель становится основным. Использование интенсивности отказов для построения опытного распределения ВНДПС было показано в предыдущем разделе 2.4.6 книги.

Рассмотренные виды распределений взаимосвязаны следующим образом.

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) \quad \text{или} \quad f(t) = \lambda(t)P(t). \quad (2.14)$$

Далее мы рассмотрим особенности наиболее популярных законов распределений (нормального, логнормального, Вейбулла и равномерного).

Нормальное распределение

Время $t := 0, 0.1.. 10$ Допустимая $\gamma := 0.8$

Дисперсия Матожидание Коэффициент вариации

$\sigma := 1.5$ $a := 5$ $b := \frac{\sigma}{a}$ $b = 0.3$

Плотность вероятности

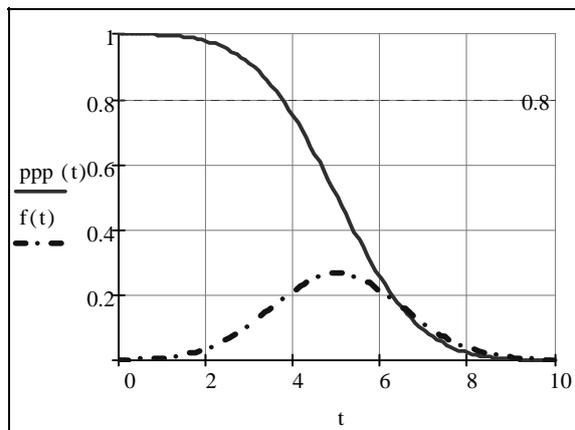
Вероятность безотказной работы

$$f(t) := \frac{e^{-\left(\frac{t-1}{a}\right)^2}}{a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}$$

$$ppp(t) := 1 - \frac{1}{a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\left(\frac{t-1}{a}\right)^2} dt$$

$f(3.738) = 0.187$

$ppp(3.738) = 0.8$



Фрагмент 2-18

Все эти законы (напомним еще раз) однозначно зависят от двух параметров. Первый параметр a называется параметром масштаба и он близок по величине к матожиданию, а второй параметр b , именуемый параметром формы, во многом зависит от коэффициента вариации выборки.

2.5.2. Нормальное распределение

При изучении высшей математики в технических Вузах, как правило, не рассматривается никаких других законов распределения, кроме нормального (закона Гаусса), хотя по ряду причин он не всегда пригоден для решения инженерных задач по надежности.

Его изучение принято начинать с рассмотрения функции плотности вероятности, которую можно рассчитать непосредственно по формуле 2.15a. Одновременно ниже приводится и интеграл вероятности 2.15b для функции распределения, который вручную, без МATHCAD, рассчитывать не удастся.

В редакторе МATHCAD можно быстро решить эти интегральные уравнения (фрагмент 2-18), но на практике применяются другие способы (фрагменте 2-19).

$$f(t) = e^{-\left(\frac{t-1}{a}\right)^2 / 2b^2} / ab\sqrt{2\pi}, \quad a),$$

$$P(t) = 1 - \left[\int_{-\infty}^t e^{-\left(\frac{t-1}{a}\right)^2 / 2b^2} dt / ab\sqrt{2\pi} \right] \quad b). \quad (2.15)$$

Для использования всех функций нам надо знать значения параметров a и b . Методы их определения будут рассмотрены позже, а сейчас следует сказать главное. У нормального закона параметр масштаба a равен математическому ожиданию t_{cp} , а параметр формы b — коэффициенту вариации выборки V .

Второй вариант для плотности `f1(t) := dnorm(t, a, a·b)`

Другие варианты для ВБР

Квантиль нормального распределения `u(t) := (t - 1) / b`

ВБР, определяемая через квантиль

`P1(t) := 1 - cnorm(u(t))` или `P2(t) := cnorm(-u(t))` $P2(4) = 0.7475$ $P1(4) = 0.7475$

ВБР, определяемая через спецфункцию `P(t) := 1 - pnorm(t, a, σ)` $P(4) = 0.7475$

Интенсивность отказов `λ(t) := f1(t) / P(t)`

Гамма - процентный ресурс

Первый вариант `Rq(γ) := qnorm(1 - γ, a, σ)` $Rq(γ) = 3.738$

Второй вариант

`Reg := 4` `Giver` `P1(Reg) = γ`

`RN(γ) := Find(Reg)` $RN(γ) = 3.738$

Фрагмент 2-19

Для определения плотности вероятности в MATHCAD имеется специальный оператор $dnorm(x, a, \sigma)$, что не требует применения громоздкой формулы 2.15а. При расчете на калькуляторе приходится пользоваться специальными таблицами из математических справочников [52].

Ясно, что и функцию ВБР никто не определяет по интегралу 2.15б. Для этого имеется несколько других способов. Основной способ заключается в предварительном определении квантиля по формуле

$$U(t) = (t - a) / \sigma = \left(\frac{t}{a} - 1 \right) / b, \quad (2.16)$$

где σ — дисперсия, $b = \sigma/a$ — параметр формы, равный коэффициенту вариации.

Для определения ВБР с помощью квантиля так же не избежать математических справочников [52 и др.]. В нашем же случае в этом нет необходимости, поскольку MATHCAD имеет оператор $cnorm(U(t))$, который моментально рассчитывает функцию $P(t)$ и строит ее график. На фрагменте 2-19 видно, что

$$P(t) = cnorm(-U(t)) = 1 - cnorm(U(t)). \quad (2.17)$$

Это означает, что у нормального закона функции ВБР и плотности вероятности симметричны.

На фрагменте 2-19 показан еще один оператор $pnorm(x, a, \sigma)$, который позволяет определять $P(t)$ без предварительной оценки квантиля. Там же даны два варианта программы расчета гамма—процентного ресурса. Более просто эта задача решается с помощью оператора $qnorm(p, a, \sigma)$ для заданной вероятности

$$p = 1 - \gamma. \quad (2.18)$$

Другой способ состоит в решении обратной задачи по расчету ВБР с применением команды Given (см. фрагмент 2-19).

В расчетной практике применяется еще один простой способ оценки гамма—процентного ресурса по известной формуле

$$R(\gamma) = a(1 - b \cdot U(\gamma)). \quad (2.19)$$

При этом применяются значения квантиля для стандартных вероятностей, например, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99 и 0.999 (см. таблицу)

γ	0.5	0.8	0.9	0.95	0.99	0.999
$U(\gamma)$	0	0.842	1.282	1.645	2.326	3.09

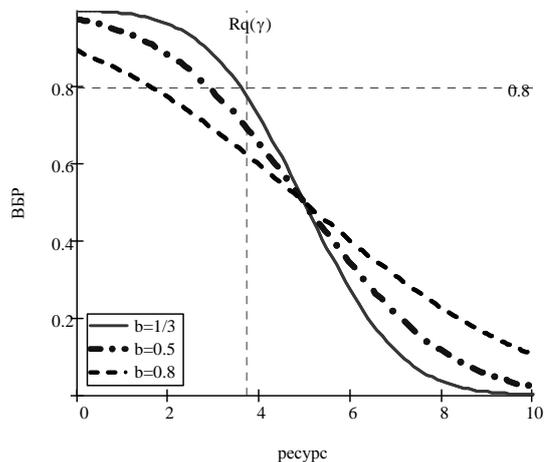


Рисунок 2-8 Зависимость нормального распределения от параметра формы

Из формулы 2.19 следует, что медианный ресурс ($\gamma = 0.5$ и $U(\gamma) = 0$) равен математическому ожиданию a .

В заключение знакомства с нормальным законом отметим его основной недостаток, связанный с проблемой применения этого закона при коэффициенте вариации $V > 1/3$. Тогда при нулевой наработке ВБР становится заметно меньше единицы, а гамма-процентный ресурс может принимать нереальные отрицательные значения (см. рис. 2-8). Поэтому этот закон не следует применять для случайных процессов с большими дисперсиями. Фактические распределения ВБР для этих процессов, чаще всего, несимметричны с левосторонней асимметрией, что так же не соответствует нормальному закону.

2.5.3. Логнормальное распределение

Если рассматривается распределение не самого значения X , а его логарифма, то из нормального закона получается логарифмически-нормальное (логнормальное) распределение, которое широко применяется при расчетах надежности.

Логнормальное распределение

Ввести исходные данные

Время $t := 0, 0.01.. 10$ Допустимая $\gamma := 0.8$

Дисперсия $\sigma := 1.5$ Матожидание $T_s := 5$ Коэффициент вариации $Vl := \frac{\sigma}{T_s} = 0.3$

Параметры распределения

$b := \sqrt{\ln(1 + Vl^2)}$ $b = 0.294$ $a := T_s \cdot e^{\frac{-b^2}{2}}$ $a = 4.789$

Фрагмент 2-20

Варианты для плотности вероятности

$$f_L(t) := \text{dlnorm}(t, \ln(a), b)$$

или

$$f_L(t) := \frac{\text{dnorm}(\ln(t), \ln(a), b)}{t}$$

Варианты для ВБР

Квантиль логнормального распределения

$$\text{ул}(t, a, b) := \frac{\ln(t) - \ln(a)}{b}$$

ВБР, определяемая через квантиль

$$P_L(t) := 1 - \text{cnorm}(\text{ул}(t, a, b))$$

или

$$P_{L2}(t, a, b) := \text{cnorm}(-\text{ул}(t, a, b))$$

$$P_L(0.000001) = 1$$

ВБР, определяемая через спецфункцию

$$P_L(t) := 1 - \text{pnorm}(\ln(t), \ln(a), b)$$

$$P_L(t) := 1 - \text{plnorm}(t, \ln(a), b)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda_L(t) := \frac{f_L(t)}{P_L(t)}$$

Гамма - процентный ресурс

Первый вариант

$$R_L(\gamma) := \text{qlnorm}(1 - \gamma, \ln(a), b)$$

$$R_L(\gamma) = 3.741$$

Второй вариант

$$\text{Reg} := 4$$

$$\text{Giver}$$

$$P_L(\text{Reg}) = \gamma$$

$$R_L(\gamma) := \text{Find}(\text{Reg})$$

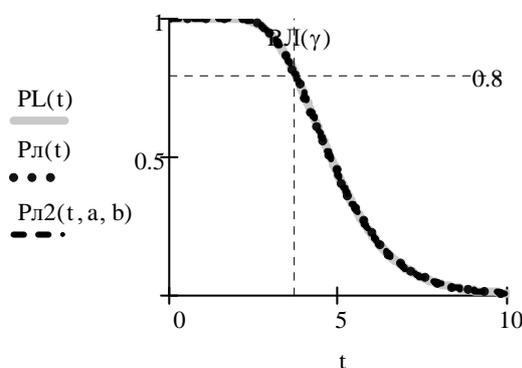
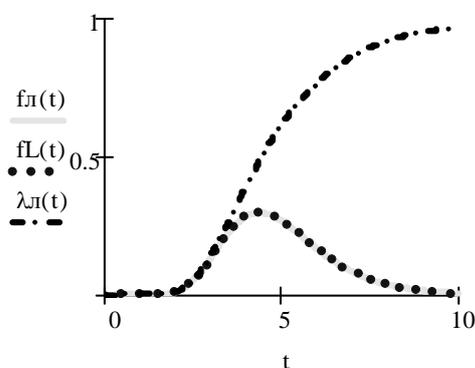
$$R_L(\gamma) = 3.741 \quad R_N(\gamma) = 3.738$$

Третий вариант

$$R_{Lg}(\gamma) := a \cdot e^{b \cdot \text{UU}(1-\gamma)}$$

$$R_{Lg}(\gamma) = 3.741$$

$$R_{Lg}(0.5) = 4.789$$



Фрагмент 2-21

Расчет следует начинать с определения параметров этого распределения a и b по данным о матожидании T_s и коэффициента вариации V_I (фрагмент 2-20). Как видно из фрагмента, параметры логнормального распределения не совпадают в точности с моментами выборки, хотя при небольших коэффициентах вариации (< 0.2) мало от них отличаются.

Далее, при программировании в редакторе MATHCAD можно применять два способа расчетов. Во-первых, можно использовать операторы, созданные для нормального закона, куда подставляются не сами величины, а их логарифмы. Кроме того в арсенале инструментов этой среды имеются специальные операторы

ры $\text{dlnorm}(\cdot, \cdot, \cdot)$ для расчета плотности вероятности, $\text{plnorm}(\cdot, \cdot, \cdot)$ для расчета ВБР и $\text{qlnorm}(\cdot, \cdot, \cdot)$ для расчета гамма - процентного ресурса.

Эти способы показаны на фрагменте 2-21. Графики этого фрагмента показывают полное совпадение результатов расчета показателей всеми примененными способами при одинаковых исходных данных.

Этот закон дает возможность рассчитывать надежность при любых значениях коэффициента вариации. При нулевой наработке ВБР равна единице, что исключает отрицательные значения гамма - процентного ресурса.

Плотность вероятности этого закона имеет явно выраженную левостороннюю асимметрию. Поэтому он часто находится в хорошем согласии с эмпирическими распределениями при больших дисперсиях.

На этом законе базируются многие вероятностные модели со степенными функциями изменения диагностического параметра (глава 3).

2.5.4. Закон распределения Вейбулла

Общий случай. Закон Вейбулла является наиболее востребованным распределением при исследовании надежности техники во всех отраслях промышленности и транспорта. Для этого имеется много весомых причин и, прежде всего, благодаря наилучшим аппроксимирующим свойствам при изменении коэффициента вариации [20]. Как уже было сказано, этот закон переходит в экспоненциальное распределение при $b = 1$, в закон Релея при $b = 2$, а при $b < 3$ становится похожим на нормальное распределение.

Распределение Вейбулла задается функцией ВБР вида

$$P(t) = e^{-[t/a]^b} \quad (2.20)$$

и характеризуется степенной функцией распределения интенсивности отказов

$$\lambda(t) = (b/a)(t/a)^{b-1}. \quad (2.21)$$

Отсюда, с учетом формулы 2.14, следует функция распределения плотности вероятности:

$$f(t) = (b/a)(t/a)^{b-1} e^{-[t/a]^b}. \quad (2.22)$$

Если моменты выборки известны, то с их помощью можно оценить параметры теоретического распределения. В первом приближении параметр формы b соответствует обратной величине коэффициента вариации выборки V , а точное значение можно получить по программе на фрагменте 2-22 или по специальным таблицам [52].

Распределение Вейбулла

Ввести исходные данные

Время $t := 0, 0.01.. 10$ Допустимая $\gamma_{\text{дв}} := 0.8$

Дисперсия Матожидание Коэффициент вариации

$\sigma_0 := 1.5$ $t_s := 5$ $V_v := \frac{\sigma_0}{T_s}$ $V_v = 0.3$

Параметры распределения

Параметр формы

$$bv1 := \frac{1}{V_v} \quad \text{Given} \quad \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{bv1}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{bv1}\right)^2}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{bv1}\right)}} = V_v \quad \boxed{bv := \text{Find}(bv1)}$$

$bv = 3.714$

Параметр масштаба

$$K_v := \Gamma\left(1 + \frac{1}{bv}\right) \quad av := \frac{t_s}{K_v} \quad K_v = 0.903 \quad av = 5.539$$

Вероятность недостижения
предельного состояния

$$P_v(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{av}\right)^{bv}\right] \quad P_v(3.699) = 0.8$$

Интенсивность отказов

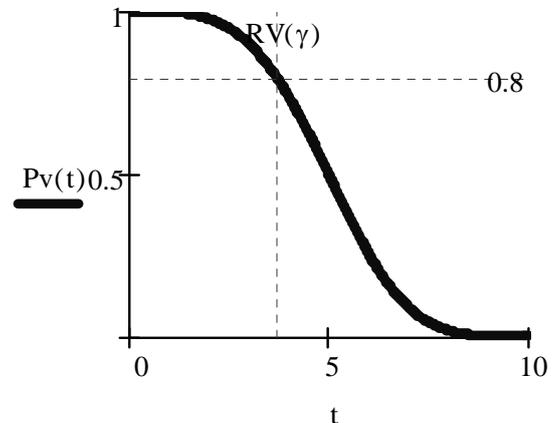
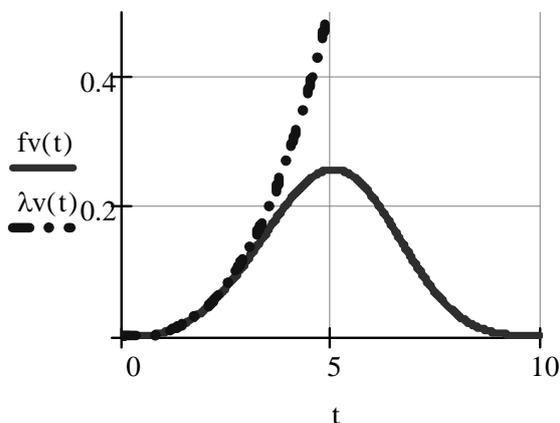
$$\lambda_v(t) := \frac{bv}{av} \cdot \left(\frac{t}{av}\right)^{bv-1}$$

Плотность вероятности

$$f_v(t) := P_v(t) \cdot \lambda_v(t)$$

Гамма - процентный ресурс

$$RV(\gamma) := av \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{bv}} \quad RV(\gamma) = 3.699$$



Фрагмент 2-22

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ЗАКОНА И ЗАКОНА РЕЛЕЯ

$$v(b) := \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}$$

$$Ko(b) := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

$$aV(b) := \frac{ts}{Ko(b)}$$

Закон	Экспоненциальный	Релея
Коэффициент вариации	$v(1) = 1$	$v(2) = 0.523$
Коэффициент формы	$Ko(1) = 1$	$Ko(2) = 0.886$
Параметр масштаба	$aV(1) = 5$	$aV(2) = 5.642$

ВБР

$$Pv1(t) := \exp\left(-\frac{t}{aV(1)}\right)$$

$$Pv2(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{aV(2)}\right)^2\right]$$

Интенсивность

$$\lambda v1(t) := \frac{1}{aV(1)}$$

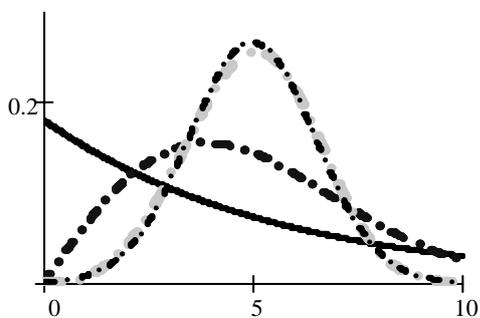
$$\lambda v2(t) := \frac{2 \cdot t}{aV(2)^2}$$

Плотность

$$fv1(t) := \frac{1}{aV(1)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{aV(1)}\right)$$

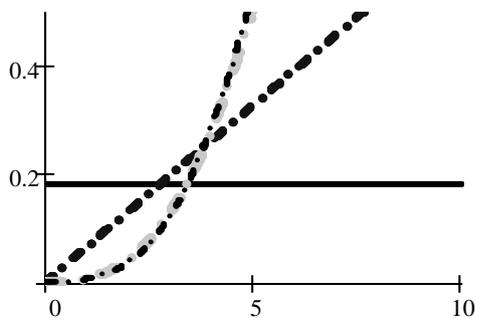
$$fv2(t) := \frac{2 \cdot t}{aV(2)^2} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{aV(2)}\right)^2\right]$$

График плотности вероятности



- Экспоненциал v=1
- Релея v=2
- Вейб при V=0.3
- Нормальный при V=0.3

График интенсивности отказов



- Экспоненциал v=1
- Релея v=2
- Вейб при V=0.3
- Нормальный при V=0.3

Фрагмент 2-23

Параметр масштаба этого распределения несколько отличается от матожидания выборки T_s за счет коэффициента $K(b)$, зависящего от гамма-функции

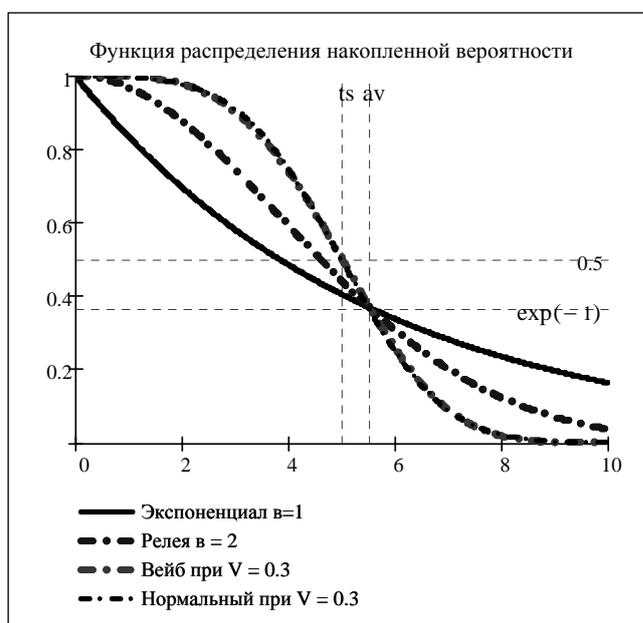
$$a = T_s / K(b), \quad K(b) = \Gamma(1 + (1/b)) \quad (2.23)$$

Как видно из фрагмента 2-22, программа расчета указанных выше параметров проще программ, основанных на квантилях нормального закона. Основные операции даже не требуют наличия компьютера и гамма-процентный ресурс можно оценить по простой формуле.

$$R(\gamma) = a \ln(1/\gamma)^{1/b} \quad (2.24)$$

Частные случаи. На фрагменте 2-23 приведены основные формулы для двух однопараметрических распределений Вейбулла при $b = 1$ (экспоненциальный закон) и $b = 2$ (закон Релея). Различия этих и некоторых других распределений при $b = const$ показаны на графиках этого фрагмента, что позволяет отметить следующие закономерности.

На графике интенсивности отказов видно, что при экспоненциальном распределении с максимальным коэффициентом вариации ($V = 1$) интенсивность отказов является постоянной величиной, т.е. не зависит от возраста объекта. Поэтому этот закон широко используется для расчета показателей безотказности техники с учетом внезапных отказов.



Фрагмент 2-24

Тот же график демонстрирует возможность изучения постепенных отказов и повреждений с помощью закона Релея ($b = 2$ и $V = 0.523$), поскольку у него интенсивность отказа линейно возрастает со временем. При этом плотность вероятности уже имеет колоколообразный вид с некоторой левосторонней асимметрией. На этих графике так же построены кривые для распределений Вейбулла и нормального закона при одинаковых коэффициентах вариации $V = 0.3$. Их графики практически полностью совпали друг с другом, что подтверждает универсальность закона Вейбулла. Это значит, что при малой дисперсии, вышка плотности вероятности имеет форму нормального закона.

Аналогичные выводы следуют и из графика накопленной вероятности фрагмента 2-24, где показано еще одно общее свойство распределения Вейбулла. Параметр масштаба этого распределения, a всегда соответствует накопленной вероятности $P(a) = \exp(-1) = 0.368$. При этом, параметр a закона не совпадает ни с медианным, ни со средним ресурсом. Напомним, что у нормального распределения $P(a) = 0.5$.

Были разработаны программы расчета показателей надежности для некоторых других искусственных распределений, образованных путем введения в однопараметрическое распределение параметра смещения. Однако опыт их применения не выявил преимуществ по сравнению с классическими вариантами.

Некоторые другие распределения образованы ниже в главе 3 при разработке вероятностных моделей.

2.5.5. Равномерное распределение

Среди известных законов двухпараметрических распределений равномерное распределение занимает особое место. В отличие от других законов оно не имеет бесконечных «хвостов» и ограничено справа величиной c , а слева — величиной d , при этом $d > c$. В указанных границах плотность распределения $f(t) = f = const$, интегральные функции $F(t)$ и $P(t)$ — линейны, а интенсивность отказов — возрастает от величины f до бесконечности.

По аналогии с предыдущими разделами будем полагать, что изначально нам известны матожидание t_s и коэффициент вариации V выборки. Тогда граничные величины распределения можно оценить так

$$d = t_s (1 + V \sqrt{3}), \quad c = t_s (1 - V \sqrt{3}). \quad (2.25)$$

Рассмотрим два варианта формул этого распределения. При использовании первого варианта будем применять величины c и d , а при втором варианте параметры t_s и V . Далее рассматриваются такие формулы

Для плотности вероятности — (2.26), для ВБР — (2.27), для интенсивности отказов — (2.28).

$$f(t) = \left. \begin{array}{l} 1/(d-c) \text{ при } c < t < d \\ 0 \text{ - в остальных случаях;} \end{array} \right\} \quad (2.26)$$

$$f(t) = \left. \begin{array}{l} 1/t_s V \sqrt{12} \text{ при } c < t < d \\ 0 \text{ - в остальных случаях.} \end{array} \right\}$$

$$P(t) = \left. \begin{array}{l} 1 \text{ при } t \leq c \\ (d-t)/(d-c) \text{ при } c < t < d, \\ 0 \text{ - при } t > d \end{array} \right\}$$

$$P(t) = \left. \begin{array}{l} 1 \text{ при } t \leq c \\ 0.5 + \left(\left[1 - (t/t_s) \right] / V \sqrt{12} \right) \text{ при } c < t < d \\ 0 \text{ - при } t > d. \end{array} \right\} \quad (2.27)$$

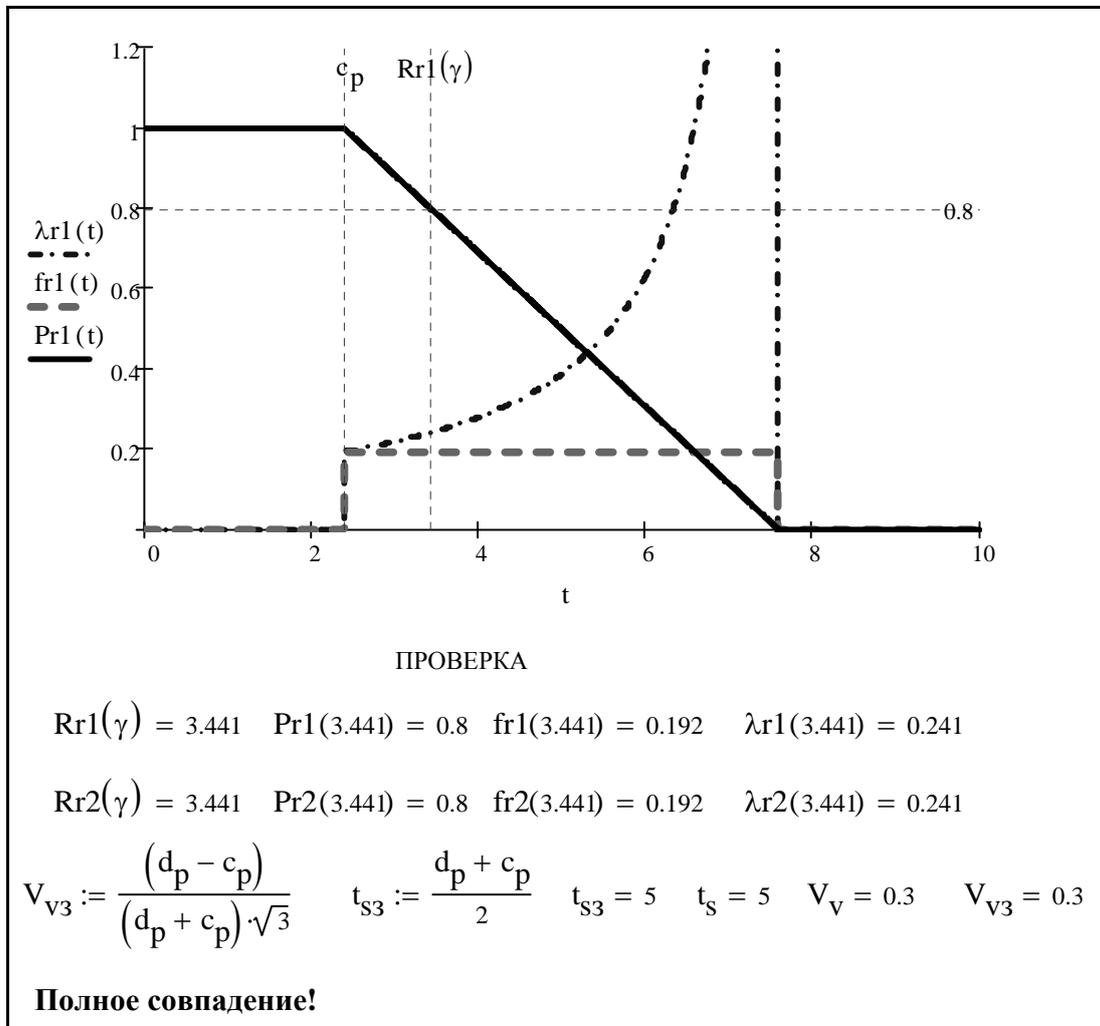
$$\lambda(t) = \left. \begin{array}{l} 1/(d-t) \text{ при } c < t < d \\ 0 \text{ - в остальных случаях;} \end{array} \right\}$$

$$\lambda(t) = \left. \begin{array}{l} 1/t_s \left(1 + V \sqrt{3} - (t/t_s) \right) \text{ при } c < t < d \\ 0 \text{ - в остальных случаях.} \end{array} \right\} \quad (2.28)$$

Таблица 2.1

Функции равномерного распределения

Характеристика	Функция
Среднее	$t_s = (c + d)/2$
Медиана	$t_{50} = (c + d)/2$
Дисперсия	$\sigma^2 = (d - c)^2 / 12$
Коэффициент вариации	$V = (d - c) / \sqrt{3} (d + c)$



Фрагмент 2-25

Свойства равномерного распределения характеризуются формулами табл. 2.1 и графиками фрагмента 2-25.

Расчет гамма-процентного ресурса выполняется по формулам

$$R(\gamma) = d - (d - c)\gamma, \quad R(\gamma) = t_s \left(1 - (\gamma - 0.5) V \sqrt{12} \right). \quad (2.29)$$

Это распределение симметрично относительно среднего t_{cp} , которое определяется полусуммой крайних членов выборки. Важным свойством равномерного распределения является узкий диапазон изменения коэффициента вариации в границах от нуля до значения $V \rightarrow 1/\sqrt{3} = 0.5773$ при увеличении отношения d/c .

Данный закон удобно применять для оценки точности контроля различных физических величин с фиксированными границами их значений.

Простота рассмотренного закона также позволяет использовать его для оперативной оценки в первом приближении математического ожидания и дисперсии по данным о крайних членах выборки (см. табл. 2.1).

Равномерное распределение

Ввести исходные данные

Время $t := 0, 0.01.. 10$ Допустимая $\gamma_{\text{дв}} := 0.8$

Дисперсия Матожидание Коэффициент вариации

$$\sigma_p := 1.5 \quad t_s := 5 \quad V_v := \frac{\sigma_p}{t_s} \quad V_v = 0.3$$

Параметры распределения

$$c_p := t_s \cdot (1 - V_v \cdot \sqrt{3}) \quad d_p := t_s \cdot (1 + V_v \cdot \sqrt{3}) \quad c_p = 2.402 \quad d_p = 7.598$$

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДВУХ ВАРИАНТОВ РАСЧЕТА

Вариант Через c_p и d_p

Через t_s и V_v

ВБР

$$\text{Pr1}(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } t \leq c_p \\ \frac{(d_p - t)}{(d_p - c_p)} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Pr2}(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } t \leq c_p \\ 1 - \frac{t}{t_s} & \\ 0.5 + \frac{1 - \frac{t}{t_s}}{V_v \cdot \sqrt{12}} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Плотность

$$\text{fr1}(t) := \begin{cases} \frac{1}{d_p - c_p} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{fr2}(t) := \begin{cases} \frac{1}{t_s \cdot V_v \cdot \sqrt{12}} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Интенсивность

$$\lambda r1(t) := \begin{cases} \frac{1}{d_p - t} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\lambda r2(t) := \begin{cases} \frac{1}{t_s \cdot (1 + V_v \cdot \sqrt{3}) - t} & \text{if } d_p > t > c_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Гамма - процентный ресурс

$$\text{Rr1}(\gamma) := d_p - (d_p - c_p) \cdot \gamma \quad \text{Rr2}(\gamma) := t_s \cdot [1 - (\gamma - 0.5) \cdot V_v \cdot \sqrt{12}]$$

Фрагмент 2-26

Справедливость приведенных выше функций равномерного распределения подтверждается фрагментами 2-25 и 2-26 программы.

2.5.6. Логарифмически равномерное распределение

Это распределение было разработано и подробно изучено автором в работе

[46]. По аналогии с известным логнормальным распределением это распределение получается в том случае, если в качестве случайной величины рассматривается не величина t , а ее логарифм $\ln(t)$.

Тогда основные функции распределения величины t вытекают непосредственно из приведенных выше функций равномерного распределения с учетом известных положений теории надежности.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \leq c \\ \ln\left(\frac{d}{t}\right) / \ln\left(\frac{d}{c}\right) & \text{при } c < t < d \\ 0 & \text{при } t \geq d. \end{cases} \quad (2.30)$$

Плотность вероятности

$$f(t) = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = \begin{cases} 1/t(\ln(d) - \ln(c)) = 1/t \ln\left(\frac{d}{c}\right) & \text{при } c < t < d \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2.31)$$

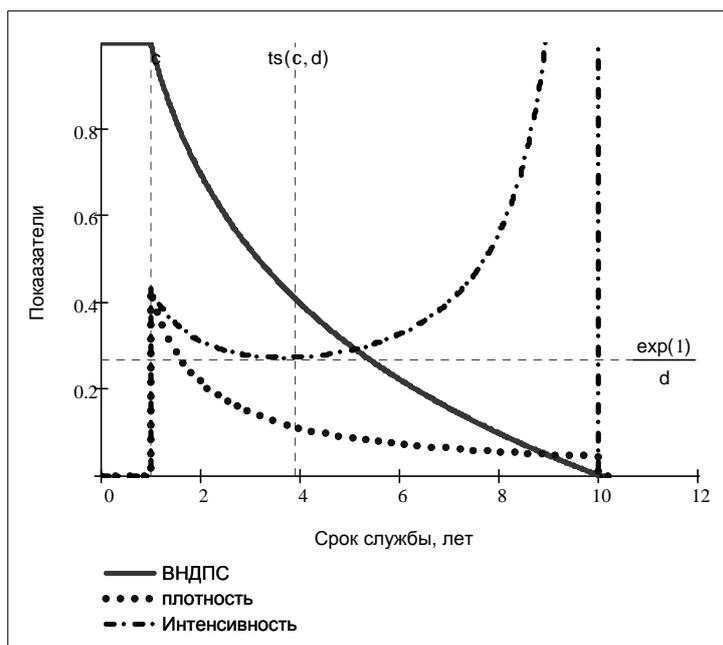
Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \begin{cases} 1/t \ln\left(\frac{d}{c}\right) & \text{при } c < t < d \\ 0 & \text{при } d \leq t \leq c. \end{cases} \quad (2.32)$$

Формула для определения гамма-процентного ресурса $R(\gamma)$ (при допустимой вероятности безотказной работы γ). следует из формулы (2.30) и имеет вид

$$R(\gamma) = \exp\left[\ln(d) - \gamma \ln\left(\frac{d}{c}\right)\right] = d \left(\frac{c}{d}\right)^\gamma. \quad (2.33)$$

С помощью общих положений теории вероятности были установлены выражения для математического ожидания t_s , дисперсии σ^2 , коэффициента вариации V и медианы t_{50} (см. табл. 2.2). На фрагменте 2-27 показаны зависимости функций этого распределения от относительного срока службы $T(t) = t/c$



Фрагмент 2-27

Хотя, область применения логравномерного распределения еще требует своего специального изучения, приведенные выше зависимости позволили выявить ряд интересных особенностей.

Таблица 2.2

Функции логравномерного распределения

Характеристика	Функция
Среднее	$t_s = \frac{d - c}{\ln\left(\frac{d}{c}\right)}$
Медиана	$t_{50} = \sqrt{cd}$
Дисперсия	$\sigma^2 = t_s^2 \left(\frac{d + c}{2} + t_s \right)$
Коэффициент вариации	$V = \sqrt{\frac{d + c}{2t_s} - 1} = \sqrt{\ln\left(\sqrt{\frac{d}{c}}\right) \frac{\left(\frac{d}{c} + 1\right)}{\left(\frac{d}{c} - 1\right)}}$
Минимальная интенсивность отказов	$\lambda_{\min} = e/d$ при $t_{\min} = d/e$

Прежде всего, отметим, что поведение функций этого распределения явно зависит от соотношения параметров d/c .

На рис. 2-9 показаны зависимости коэффициентов вариации равномерного и логравномерного распределений от d/c . Анализ этих графиков показывает, что

при небольших значениях ($d/c < 2$) коэффициенты вариации не превышают 0.2 и мало отличаются друг от друга. Но с повышением d/c от 5 до 100 коэффициент вариации логравномерного распределения превышает 1 (при $x = 46.5$), резко отклоняясь от того же показателя равномерного распределения (который асимптотически приближается к 0.577).

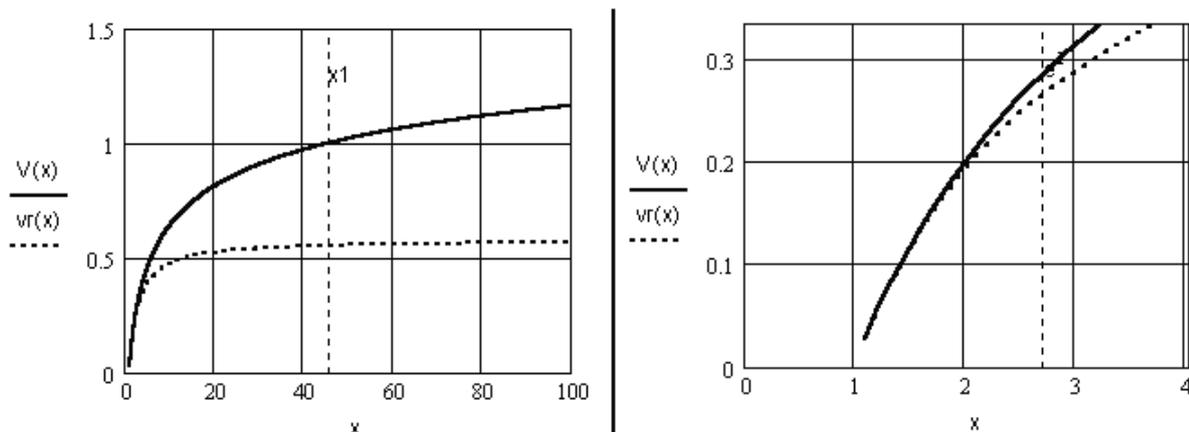
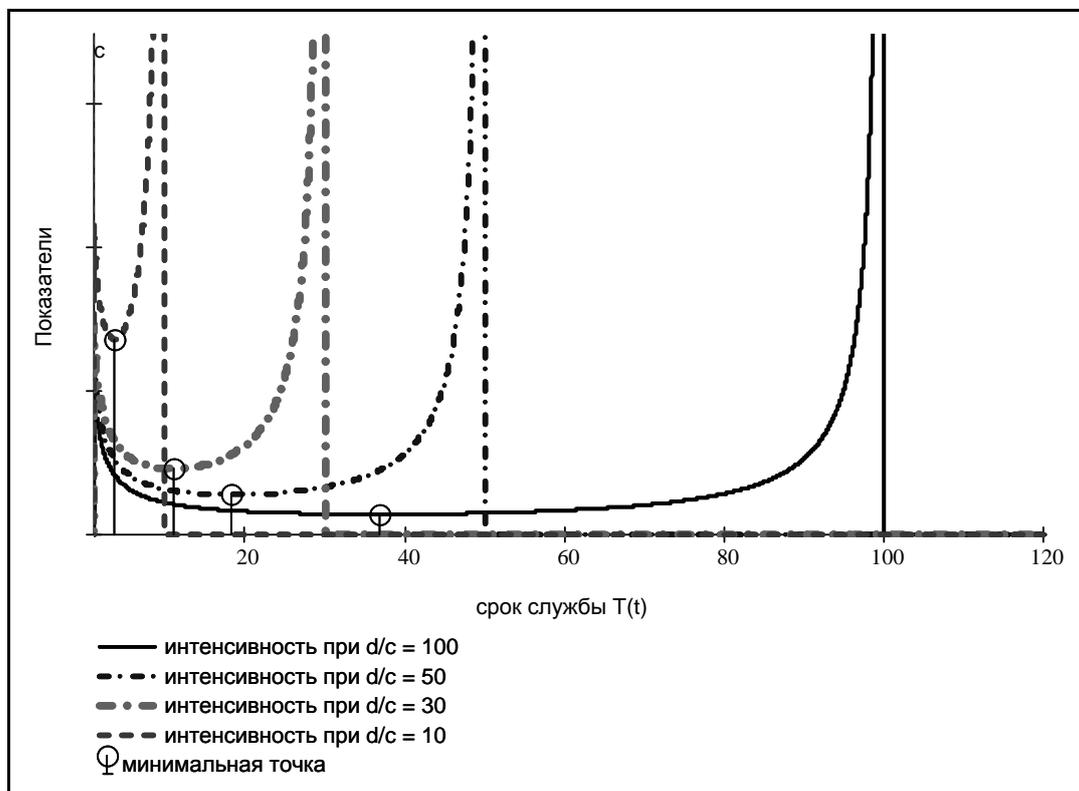


Рисунок 2-9 Зависимость коэффициентов вариации логравномерного распределения $V(c,d)$ и равномерного распределения $vr(c,d)$ от $x = d/c$ для двух диапазонов его изменения.

Особенностью этого распределения является поведение функции интенсивности отказов. Напомним физический смысл понятия об интенсивности отказов. Это есть отношение числа отказавших (погибших) объектов к объектам, которые еще не отказали (остались «живыми») в заданном интервале времени. При $t = c$ эта величина равна плотности распределения $1/c \ln(d/c)$.



Фрагмент 2-28

Установлено, что функция $\lambda(t)$ так же зависит от отношения d/c .

При $d/c > e = 2.718$ с увеличением t образуется седловина. При этом сначала наблюдается снижение интенсивности отказов до минимума $\lambda_{\min} = e/d$ при $t = d/e$, а затем интенсивность начинает возрастать сначала медленно, а затем, по мере приближения к d — очень быстро (см. фрагмент 2-28).

График интенсивности отказов при очень больших отношениях d/c (например, 50 и более) напоминает хорошо известную из теории надежности характеристику интенсивности отказов в течение жизненного цикла объекта исследования (в том числе в период жизни человека). Ввиду не стандартности вида этих функций, они не будут включены в программы оценки показателей надежности по опытным данным (раздел 2.6.7)

2.5.7. Другие двухпараметрические распределения

Рассмотренные в этом разделе двухпараметрические распределения не отражают содержание полного перечня всех возможных законов. Однако, они относятся к необходимому и достаточному минимуму видов распределений, необходимых для достоверной оценки показателей надежности по опытным данным.

Наиболее простым способ образования дополнительных двухпараметрических распределений является введения параметра смещения T_o в функции однопараметрических распределений с постоянным параметром формы b . Тогда справедливы следующие соотношения между моментами двух— и однопараметрического распределения. При формировании нового распределения будем называть однопараметрическое распределение — первичным распределением, а двухпараметрическое — вторичным. Тогда между ними можно установить такие соотношения

$$T_2 = T_1 + T_o, \quad (2.34)$$

$$V_2 = V_1(T_1/T_2) = V_1 \left[T_1 / (T_1 + T_o) \right]. \quad (2.35)$$

где T_2 и T_1 — математическое ожидание вторичного и первичного распределения, V_2 и V_1 — коэффициенты вариации вторичного и первичного распределения.

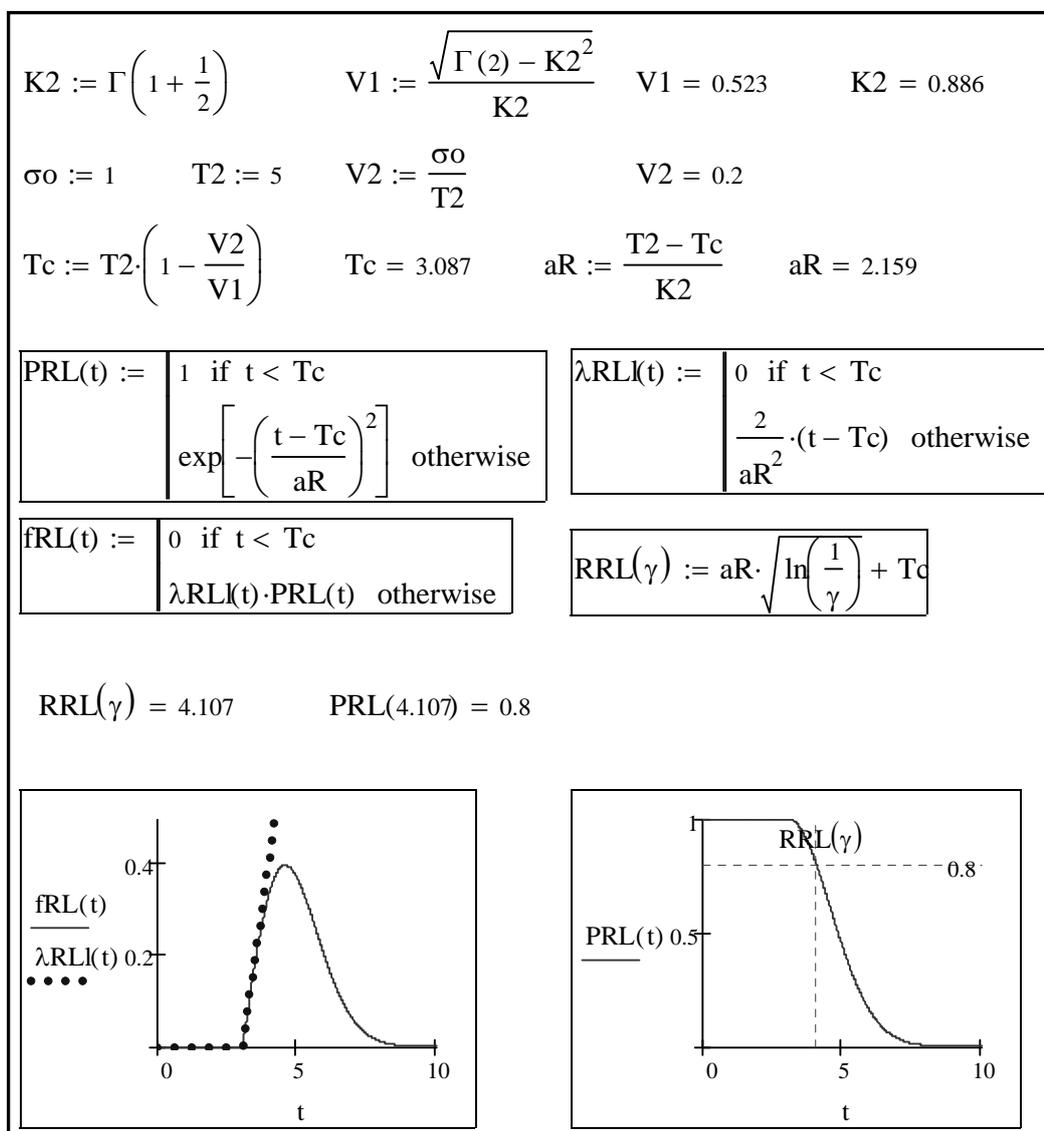
Из формул 2.34 и 2.36 следуют выражения для расчета параметров смещения и масштаба для вторичного закона

$$\begin{aligned} T_o &= T_2 \left[1 + (V_2/V_1) \right], \\ a &= V_1 \left[(T_2 - T_o) / K(b) \right]. \end{aligned} \quad (2.36)$$

где $K(b)$ — вспомогательный коэффициент, зависящий от показателя формы b заданного первичного распределения.

Известно что, для закона Релея он равен 0.886, а для нормального закона $K(b) = 1$.

При этом нам всегда известен и коэффициент вариации первичного распределения. Для закона Релея (при $b = 2$), имеем $V_1 = 0.523$ (см. фрагмент 2-22), а при нормальном законе он равен заданному V_1 .



Фрагмент 2-29

Общим недостатком таких распределений является возможность появления ВБР меньшей единицы при нулевой наработке в случае больших дисперсий. Логнормальный закон не всегда пригоден для таких процедур из-за недопустимости логарифмирования отрицательных чисел. Поэтому, на практике, этот способ применяется только для закона Релея (см. фрагмент 2-28).

2.6. Оценка параметров теоретических распределений

Исходными данными для определения параметров теоретического распределения являются элементы эмпирического распределения. В теории вероятностей

можно найти несколько методов решения этой задачи, некоторые из которых приведены в государственных стандартах.

2.6.1. Метод моментов

Метод моментов — это самый простой метод, который заключается в приравнивании теоретических моментов распределения к эмпирическим моментам соответствующего порядка. Например, у нормального распределения параметр масштаба a соответствует среднему арифметической выборки, а параметр формы b — ее дисперсии.

У распределения Вейбулла параметр формы зависит от коэффициента вариации выборки (точнее от его обратной величины) и определяется с помощью гамма функции (формулы 2.23) или по рис. 2-11. Параметр масштаба этого распределения определяется по формулам 2.23.

Зависимости параметров a и b от моментов двух первых порядков выборки установлены и для других двухпараметрических законов распределений, что демонстрируется фрагментами программ в разделе 2.5.4. Метод моментов можно использовать только для оценки параметров простых полных выборок при плане испытаний [NUN], но для усеченных и цензурированных выборок он не пригоден.

2.6.2. Метод максимального правдоподобия

Метод максимального правдоподобия (метод наибольшего правдоподобия, метод максимума правдоподобия) [42] считается более точным, но и более сложным методом. Он позволяет получить оценки параметров распределения не только для полных, но и для усеченных и многократно усеченных выборок.

Для получения оценки максимального правдоподобия приравнивают нулю частные производные от логарифма функции максимального правдоподобия.

Для цензурированной выборки используют методику, по которой ее сначала приводят к простой усеченной выборке с помощью специальных методов (обычно с помощью метода Джонсона). Затем уже для усеченной выборки одним из возможных методов оценивают параметры распределения.

Расчет ведется в табличной форме путем предварительного расчета функции правдоподобия для разных значений параметров искомого закона распределения до тех пор, пока не будет достигнуто нулевое значение функции. Для сокращения времени поиска корней функции правдоподобия, применяют графические построения.

Недостатком этого метода является не только его трудоемкость, но и необходимость применения процедур проверки согласия с эмпирическим распределением уже после определения параметров теоретического распределения. При этом приходится применять графические методы, что снижает точность оценки. Поэтому, в своих работах автор этот метод не применяет.

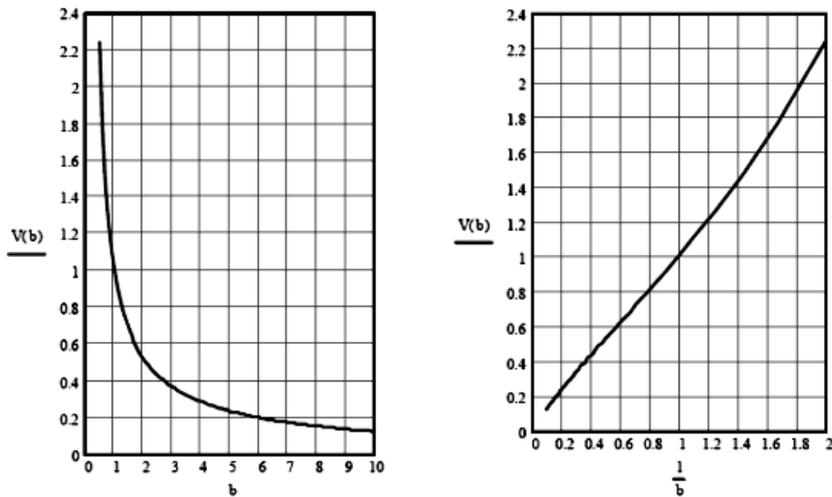


Рисунок 2-10. Зависимость параметра формы b от коэффициента вариации V

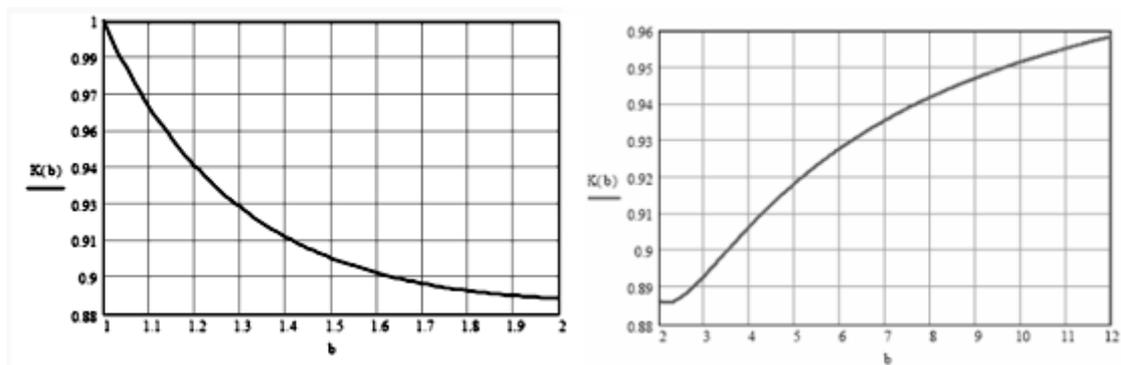


Рисунок 2-11 Определение коэффициента $K(b)$

2.6.3. Метод квантилей или разделяющих разбиений

Метод квантилей или разделяющих разбиений [20] заключается в том, что эмпирические квантили приравнивают к квантилям теоретического распределения и составляют столько уравнений, сколько параметров выбранного распределения необходимо определить. Для двухпараметрических распределений требуется решать уравнение с двумя неизвестными, которые составлены для двух значений вероятности $P(t_1)$ и $P(t_2)$, снятых с эмпирического распределения. Например, для решения таких уравнений при логнормальном распределении следует сначала для $P(t_1)$ и $P(t_2)$ найти соответствующие им квантили U_1 и U_2 , а затем рассчитать искомые параметры по формулам

$$b = \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{U_2 - U_1} \quad \text{и} \quad a = t_2 \exp(bU_2). \quad (2.37)$$

Аналогичные формулы составлены для всех двухпараметрических законов распределений [20].

По методу квантилей можно определять параметры распределения для выбо-

рок любого типа, поскольку в качестве исходных данных используются элементы эмпирического распределения. Недостатком этого метода можно считать возможную нестабильность полученных результатов из-за субъективности выбора величин $P(t1)$ и $P(t2)$. Он менее точен, чем рассмотренный ниже метод наименьших квадратов и поэтому его применять не рекомендуется.

2.6.4. Графоаналитический метод

Графоаналитический метод [25] с использованием вероятностной бумаги можно применять для оценки параметров распределений, как для полных, так и для усеченных выборок.

При использовании графоаналитического метода можно руководствоваться ГОСТ 11.008-75, который устанавливает правила построения и применения вероятностных бумаг при статистической обработке опытных данных.

Суть метода состоит в проведении прямой линии среди опытных точек, построенных в координатах, которые соответствующим образом связаны с исследуемой функцией распределения.

Например, при нормальном распределении по оси абсцисс откладывают измеряемый признак (в нашем случае время t), а по оси ординат — квантиль $U(P)$. При этом, против засечек для квантиля записываются соответствующие значения вероятности P . Аналогично строят вероятностную бумагу для логнормального распределения с использованием логарифмической шкалы оси абсцисс.

Построение вероятностных бумаг для всех законов, включая распределение Вейбулла и равномерное распределение, можно выполнять по формулам, которые используются в методе наименьших квадратов (см. п. 2.6.6).

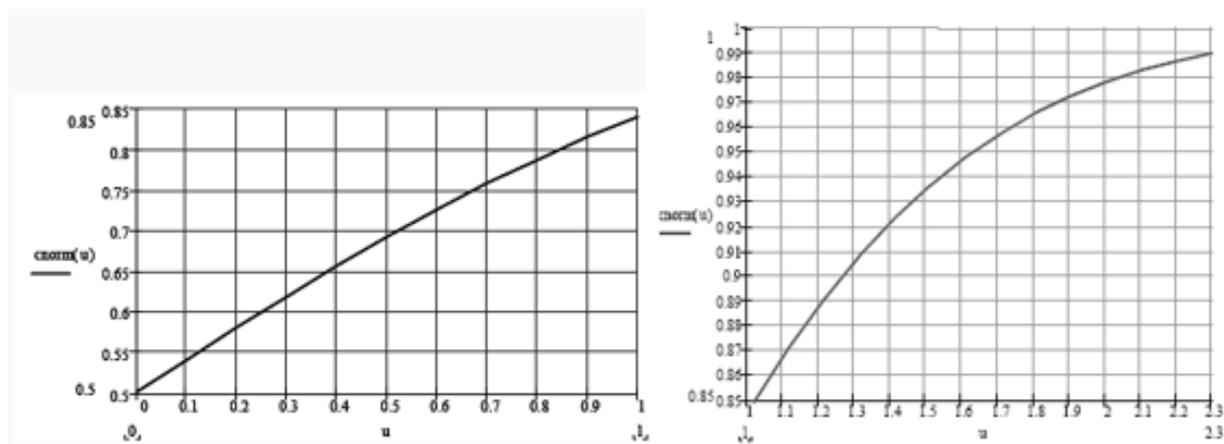


Рисунок 2-12. Зависимость вероятности от квантиля нормального распределения ($P(t) = cnorm(u)$)

При равномерном распределении дополнительных построений выполнять не требуется, что следует из самой функции (2-27) для $P(t)$.

2.6.5. Проверка согласия распределений

После того как определены параметры теоретических распределений, необходимо определить, какой из исследуемых законов находится в наилучшем согласии с эмпирическим распределением. Если выборка постоянна и однород-

на, то согласно ГОСТ 11006-74 формальная проверка согласия эмпирического и теоретического распределений может выполняться по критерию Колмогорова, критерию χ^2 или критерию ω^2 .

Наименее трудоемкой можно считать процедуру проверки согласия по критерию Колмогорова D , равному наибольшей разнице теоретического и эмпирического распределений вероятностей. Полученную величину сравнивают с допустимым значением Dn при заданной доверительной вероятности p . Если фактическое значение D не превышает допустимого значения Dn , то согласие признают хорошим. При отсутствии под рукой этих таблиц [52] можно применить следующую формулу или рис. 2-13.

$$D_n = \left[0.805 + 0.177 \ln(1/\ln(1/p)) \right] / \sqrt{n+1}, \quad (2.38)$$

где n — объем выборки, p — доверительная вероятность.

Эта формула получена нами путем корреляционного анализа табулированных функций для критерия Колмогорова при очень высоком коэффициенте корреляции $R_{xy} = 0.999$. Обеспечивается практически полное совпадение результатов расчета по данной формуле или таблицам [52].

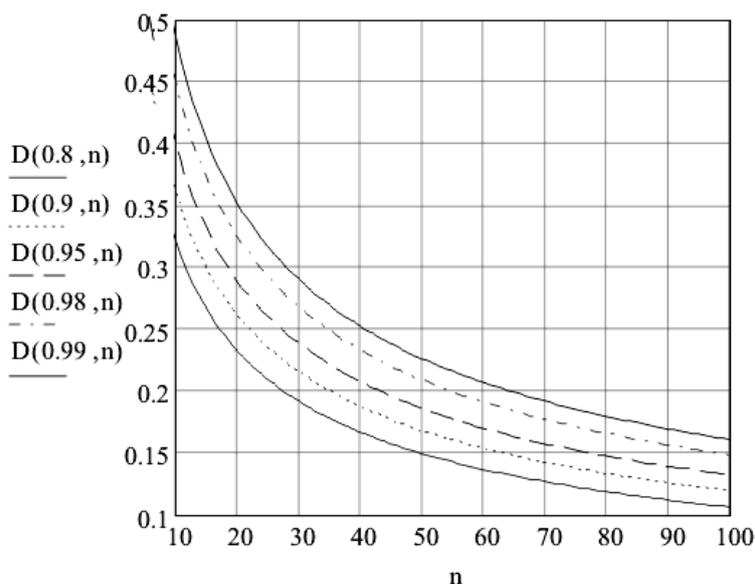


Рисунок 2-13. Критерий Колмогорова

Для решения обратной задачи из формулы следует такая зависимость

$$p = \exp \left[- \exp \left[- \left(5.65 D_n \sqrt{n+1} \right) - 4.548 \right] \right]. \quad (2.39)$$

Исследования критерия Колмогорова показывает, что при относительно небольших объемах выборки (< 50), критерий Dn принимает весьма большие значения (0.1 — 0.4), что снижает достоверность оценки. Поэтому по критерию Колмогорова можно ошибочно подтвердить согласие даже явно несовместимых

распределений.

Имеет свои недостатки и критерий Пирсона (χ^2)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - M_i)^2}{M_i}, \quad (2.40)$$

где k — число интервалов разбиения; m_i — число отказов, попавших в i -й интервал; M_i — математическое ожидание числа отказов в i -м интервале при принятой гипотезе.

В литературе по надежности утверждается, что наиболее мощным критерием является величина $n\omega^2$, которая характеризуется среднеквадратичным отклонением накопленных частот от теоретического распределения и оценивается с учетом доверительной вероятности по специальным таблицам в ГОСТ 11.006-74. Для вычисления этого критерия в работе [43] приводится такая зависимость, которая, по-видимому, относится к вариационному, а не интервальному ряду.

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F(x_i) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2, \quad (2.41)$$

где n — число реализаций, $F(x_i)$ — накопленная частота случаев.

Признавая преимущества критерия $n\omega^2$ по сравнению с критерием χ^2 , следует отметить, что далее мы будем использовать не его, а еще более мощный критерий проверки согласия. При этом не требуется субъективно задаваться доверительной вероятностью, что обесценивает саму идею проверки согласия распределений по критериям Колмогорова, χ^2 , ω^2 и по другим критериям.

Таким критерием является обычный коэффициент корреляции между теоретическим и эмпирическим распределением, который определяется одновременно с расчетом параметров распределения следующими двумя оригинальными методами.

2.6.6. Методы корреляции распределений вероятностей

В этой работе, наряду с методом моментов, применяются еще два метода, которые позволяют решать статистическую задачу для любых выборок, в том числе для усеченных и цензурированных выборок.

Первый метод основан на анализе корреляционной связи между эмпирическим и теоретическим распределением с применением метода наименьших квадратов. Он состоит из следующих операций [20], которые демонстрируются на примере закона Вейбулла (см. формулу 2.20)

Выполняется преобразование (анаморфоза) координат исследуемой эмпирической зависимости с целью ее приведения к линейному виду

$$y = A + Bx, \quad (2.42)$$

где $x = f(t)$ и $y = f(P)$ — функции анаморфозы, A и B — постоянные уравнения регрессии.

В данном случае применяется следующая анаморфоза:

$$x_j = \ln(t_j), \quad y_j = \ln\left[1/\ln(1/P_j)\right]. \quad (2.43)$$

Далее следуют стандартные процедуры МНК по расчету коэффициента корреляции r_{xy} , а так же постоянных A и B уравнения регрессии, что позволяет оценить искомые параметры распределения a и b .

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x S_y}}; \quad B = r_{xy} \sqrt{\frac{S_y}{S_x}}; \quad A = Y_{cp} - B X_{cp}; \quad (2.44)$$

тогда параметры распределения $b = -B$ и $a = \exp\left(-\frac{A}{B}\right)$.

Расчеты параметров и показателей надежности для разных законов распределений

Корректировка объема выборки	$bn := \text{if}(P_{N0} = 0, N0 - 1, N0)$	$bn = 148$
Диапазон нумерации выборки	$k := 1..bn$	$Nm = 149$
Вектора случайных членов по осям	$to_k := t_k$	$Po_k := P_k$
Диапазон расчета функций	$mma := \text{ceil}(t_{n2})$	$t3 := 0, mma \cdot 0.01 .. mma$

Распределение Вейбулла

Метод наименьших квадратов (только для этого закона)

Аномарфозы	$xv_k := \ln(to_k)$	$yvk := \ln\left(\frac{1}{\ln\left(\frac{1}{Po_k}\right)}\right)$	
Коэффициент корреляции	$rv := \text{corr}(xv, yv)$	$rv = -0.989$	
Расчет параметров распределения с помощью линейной корреляции	$A0 := \text{line}(xv, yv)$	$A0_1 = 12.651$	$A0_2 = -3.254$
Тогда параметр формы найдем по схеме $b = -B$, а параметр масштаба $a = \exp(-A/B)$		$av := e^{-\frac{A0_1}{A0_2}}$	$bv := -A0_2$
	<input type="text" value="av = 48.803"/>	<input type="text" value="bv = 3.254"/>	

Второй равноценный вариант (заблокирован)

$bv := -\text{slope}(xv, yv)$ ■	$av := e^{\frac{\text{intercept}(xv, yv)}{bv}}$ ■
---------------------------------	---

Фрагмент 2-30

Метод оценки на основе оператора

Minerr(bv, av) (далее для всех законов)

$$Pp(t, bv, av) := \exp\left[-\left(\frac{t}{av}\right)^{bv}\right]$$

$$bv = 3.254 \quad av = 48.803$$

$$res(bv, av) := Po - Pp(to, bv, av)$$

$$\text{Given} \quad 0 = res(bv, av)$$

$$\begin{pmatrix} b1 \\ a1 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(bv, av) \quad \begin{pmatrix} b1 \\ a1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.289 \\ 48.214 \end{pmatrix}$$

Требуемый вид функции с заданными переменными

Задаемся ожидаемыми параметрами

Условие минимизации различия теоретического распределения Pp(to, bv, av) от эмпирического Po

Решение. Определение точного значения параметры

Получаем уточненные параметры, несколько отличаются от заданных

$$b1 = 3.289 \quad a1 = 48.214$$

Коэффициент вариации

$$Vv := \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b1}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{b1}\right)^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b1}\right)} \quad Kb := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b1}\right)$$

Математическое ожидание

$$Rvs := a1 \cdot Kb \quad Vv = 0.335 \quad Rvs = 43.241$$

Искомые функции

$$\text{ВНДПС} \quad PV(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{a1}\right)^{b1}\right] \quad \text{Гамма-процентный ресурс} \quad RV(\gamma) := a1 \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b1}}$$

$$\lambda V(t) := \frac{b1}{a1} \cdot \left(\frac{t}{a1}\right)^{b1-1} \quad \text{Плотность} \quad fV(t) := PV(t) \cdot \lambda V(t)$$

$$\text{Результаты} \quad rv = -0.989 \quad b1 = 3.289 \quad a1 = 48.214 \quad Kb = 0.897$$

$$Vv = 0.335 \quad Rvs = 43.241 \quad RV(.5) = 43.13 \quad RV(\gamma_{\text{доп}}) = 30.558$$

Общий коэффициент корреляции в натуральных единицах

$$P2V_k := PV(t_k) \quad CoV := \text{corr}\left(\overrightarrow{P2V}, Po\right) \quad CoV = 0.995$$

Фрагмент 2-31

В этих формулах использованы средние значения X_{cp} и Y_{cp} , вариации S_x и S_y , которые вычисляют по осям координат, а также ковариация S_{xy} . Во времена написания книг [18, 20] с указанным методом, вычисления по формулам (2.43) даже на калькуляторе были достаточно трудоемкими. Теперь, при использовании редактора MATHCAD данная задача решается значительно проще и быстрее с помощью всего двух операторов для расчета коэффициента линейной корреля-

ции $r_{xy} = rv = corr(x, y)$ и постоянных $A = AO_1$ и $B = AO_2$ (см. фрагмент 2-30).

Согласие между теоретической функцией и опытными точками оценивается по абсолютной величине коэффициента корреляции $|r_{xy}| = |rv|$, который в этой задаче имеет знак минус. Чем ближе полученное абсолютное значение к единице, тем выше степень согласия этих распределений.

Хорошему согласию соответствуют значения $|r_{xy}| > 0.98$. При интервальном построении эмпирического распределения обычно наблюдается более высокие значения $|r_{xy}|$.

Второй метод [23] является еще более эффективным и точным. Он реализуется в редакторе MATHCAD с помощью оператора *Minerr* по условию стремления к нулю разницы опытного и теоретического распределений. Этот оператор выполняет нелинейный подбор методом наименьших квадратов параметров заданной нами функции, которая обычно находится в наилучшем согласии с экспериментальными точками. На фрагменте 2-31 показаны основные операции этого метода (сверху вниз) применительно к закону распределения Вейбулла.

1. Изображается требуемый вид функции с указанием искомых параметров (bv и av) и приводятся их предполагаемые значения. В этом примере в качестве таковых используются результаты их предварительного расчета методом наименьших квадратов.

2. Записывается уравнение разницы опытной и теоретической функции, которое решается командой *Given* по условию ее равенства нулю.

3. Записывается и решается уравнение *Minerr*, что приводит к определению искомых параметров в измененных обозначениях $b1$ и $a1$. Из фрагмента видно, что полученные величины несколько отличаются от заданных ранее параметров bv и av .

4. Полученные параметры позволили (в нижней части фрагмента) определить математическое ожидание Rvs и коэффициент вариации Vv , а так же получить выражения для расчета ВНДПС $PV(t)$, интенсивности отказов $\lambda V(t)$, плотности распределения $fV(t)$ и гамма - процентного ресурса $RV(\gamma)$.

5. Последняя строка фрагмента 2-31 представляет собой выражение для оценки коэффициента корреляции $CoV = corr(PV, Po)$ между эмпирическим Po и теоретическим PV распределением ВНДПС в реальных координатах. Важно отметить, что величина $CoV = 0.995$ оказалась более высокой, чем коэффициент линейной корреляции $|r_{xy}| = 0.989$.

Опыт применения второго метода показал его универсальность, высокую эффективность и простоту использования. Поэтому он выбран в качестве основного метода определения параметров распределений, что будет далее показано на конкретных примерах.

2.6.7. Типовая программа

В разделе 2.4 этой книги были показаны фрагменты программ с алгоритмами построения эмпирических распределений выборок основных видов. Напомним, что их построение не являлось самоцелью, а было необходимо для последующего расчета параметров теоретических распределений показателей надежности.

Логнормальное распределение

$$PL(t, aL, bL) := \text{cnorm}\left(-\frac{\ln(t) - \ln(aL)}{bL}\right)$$

$$Al := Rvs \quad Bl := Vv$$

$$rs(Al, Bl) := Po - PL(to, Al, Bl)$$

$$\text{Given} \quad 0 = rs(Al, Bl)$$

$$\begin{pmatrix} Ao \\ Bo \end{pmatrix} := \text{Minerr}(Al, Bl) \quad \begin{pmatrix} Ao \\ Bo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 42.28 \\ 0.339 \end{pmatrix}$$

Требуемый вид функции
с заданными переменными
Задаемся ожидаемыми параметрами

Условие минимизации различия
теоретического распределения
PL(to, Al, Bl) от эмпирического Po

Решение. Определение точного
значения параметров

Получаем уточненные параметры,
несколько отличаются от заданных

$$Ao = 42.28 \quad Bo = 0.339$$

Коэффициент
вариации

$$VL := \sqrt{\exp(Bo^2) - 1}$$

$$VL = 0.349$$

Математическое
ожидание

$$RLs := Ao \cdot \exp\left(\frac{Bo^2}{2}\right)$$

$$RLs = 44.785$$

Искомые функции

$$\text{ВНДПС} \quad PL(t) := \text{cnorm}\left(-\frac{\ln(t) - \ln(Ao)}{Bo}\right)$$

$$PL(5) = 1$$

$$\text{Плотность} \quad fL(t) := \frac{\text{dnorm}(\ln(t), \ln(Ao), Bo)}{t}$$

$$\text{Интенсивность} \quad \lambda_L(t) := \frac{fL(t)}{PL(t)}$$

Гамма-процентный
ресурс

$$RL(\gamma) := \text{qlnorm}(1 - \gamma, \ln(Ao), Bo)$$

$$RL(\gamma_{\text{доп}}) = 31.776 \quad RL(0.5) = 42.28$$

Результаты

$$Ao = 42.28 \quad Bo = 0.339 \quad VL = 0.349$$

$$RLs = 44.785 \quad RL(\gamma_{\text{доп}}) = 31.776 \quad RL(0.5) = 42.28$$

Общий коэффициент корреляции в натуральных единицах

$$P2L_k := PL(t_k) \quad CoL := \text{corr}\left(\overrightarrow{P2L}, Po\right) \quad CoL = 0.997$$

Фрагмент 2-32

Нормальное распределение

$$P_{No}(t, aN, bN) := c_{norm} \left(\frac{\frac{t}{aN} - 1}{bN} \right)$$

$$A2 := Rvs \quad B2 := Vv$$

$$nis(A2, B2) := Po - P_{No}(to, A2, B2)$$

Given

$$0 = nis(A2, B2)$$

$$\begin{pmatrix} An \\ Bn \end{pmatrix} := \text{Miner}(A2, B2) \quad \begin{pmatrix} An \\ Bn \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 43.116 \\ 0.34 \end{pmatrix}$$

Требуемый вид функции
с заданными переменными
Задаем ожидаемыми параметрами
Условие минимизации различия
теоретического распределения
 $PIL(to, A1, B1)$ от эмпирического Po

Решение. Определение точного
значения параметры

Получаем уточненные параметры,
несколько отличаются от заданных

$$An = 43.116 \quad Bn = 0.34$$

Коэффициент
вариации

$$Vn := Bn \quad Vn = 0.34$$

Математическое
ожидание

$$RN_s := An \quad RN_s = 43.116$$

Искомые функции

$$\text{ВДПС} \quad PN(t) := c_{norm} \left(\frac{\frac{t}{An} - 1}{Bn} \right) \quad PN(30.774) = 0.8$$

$$\text{Плотность} \quad fN(t) := d_{norm}(t, An, Bn \cdot An) \quad \text{Интенсивность} \quad \lambda N(t) := \frac{fN(t)}{PN(t)}$$

Гамма-процентный
ресурс

$$RN(\gamma) := q_{norm}(1 - \gamma, An, Bn \cdot An)$$

Результаты $An = 43.116 \quad Bn = 0.34 \quad VL = 0.349$

$$RN_s = 43.116 \quad RN(\gamma_{доп}) = 30.774 \quad RN(0.5) = 43.116$$

Общий коэффициент корреляции в натуральных единицах

$$P2N_k := PN(t_k) \quad CoN := \text{corr} \left(\overrightarrow{P2N}, Po \right) \quad CoN = 0.995$$

Фрагмент 2-33

Равномерное распределение

$$\text{Por}(t, \text{dor}, \text{cor}) := \frac{\text{dor} - t}{\text{dor} - \text{cor}} \quad \text{Требуемый вид функции с заданными переменными}$$

$$\text{cor} := \text{Rvs} \cdot (1 - \text{Vv} \cdot \sqrt{3}) \quad \text{dor} := \text{Rvs} \cdot (1 + \text{Vv} \cdot \sqrt{3}) \quad \text{Задаемся ожидаемыми параметрами}$$

$$\text{cor} = 18.179 \quad \text{dor} = 68.304$$

$$\text{ris}(\text{dor}, \text{cor}) := \text{Po} - \text{Por}(\text{to}, \text{dor}, \text{cor})$$

Условие минимизации различия теоретического распределения $\text{PIL}(\text{to}, \text{A1}, \text{B1})$ от эмпирического Po

Given

$$0 = \text{ris}(\text{dor}, \text{cor})$$

$$\begin{pmatrix} \text{DD} \\ \text{CC} \end{pmatrix} := \text{Minerr}(\text{dor}, \text{cor}) \quad \begin{pmatrix} \text{DD} \\ \text{CC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 68.603 \\ 18.604 \end{pmatrix} \quad \text{Решение. Определение точного значения параметра}$$

Математическое ожидание

$$\text{Rrs} := \frac{\text{DD} + \text{CC}}{2}$$

Коэффициент вариации

$$\text{Vr} := \frac{\text{DD} - \text{CC}}{\text{DD} + \text{CC}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Искомые функции

ВНДПС

$$\text{Pr}(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } t < \text{CC} \\ \frac{\text{DD} - t}{\text{DD} - \text{CC}} & \text{if } \text{CC} \leq t \leq \text{DD} \\ 0 & \text{if } t > \text{DD} \end{cases}$$

Плотность

$$\text{fr}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < \text{CC} \\ \frac{1}{\text{DD} - \text{CC}} & \text{if } \text{CC} \leq t \leq \text{DD} \\ 0 & \text{if } t > \text{DD} \end{cases}$$

Интенсивность

$$\lambda_r(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < \text{CC} \\ \frac{1}{\text{DD} - t} & \text{if } \text{CC} \leq t \leq \text{DD} \\ 0 & \text{if } t > \text{DD} \end{cases}$$

Гамма-процентный ресурс

$$\text{Rr}(\gamma) := \text{DD} - (\text{DD} - \text{CC}) \cdot \gamma$$

Результаты

$$\text{Rrs} = 43.603 \quad \text{Vr} = 0.331 \quad \text{Pr}(28.603) = 0.8$$

$$\text{Rr}(\gamma_{\text{доп}}) = 28.603 \quad \text{Rr}(.5) = 43.603 \quad \text{Rrs} = 43.603$$

Общий коэффициент корреляции в натуральных единицах

$$\text{P2R}_k := \text{Pr}(t_k) \quad \text{CoR} := \text{corr}(\overrightarrow{\text{P2R}}, \text{Po}) \quad \text{CoR} = 0.991$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЛЛЕЯ СО СМЕЩЕНИЕМ

$$PRL(t, arl, crl) := \exp\left[-\left(\frac{t - crl}{arl}\right)^2\right]$$

Требуемый вид функции с заданными переменными

$$arl := Rvs \quad crl := 0.1 \cdot arl$$

Задаем ожидаемыми параметрами

$$rrl(arl, crl) := Po - PRL(to, arl, crl)$$

Условие минимизации различия теоретического распределения

Given $0 = rrl(arl, crl)$

PIL(to, A1, B1) от эмпирического Po

$$\begin{pmatrix} aR \\ cR \end{pmatrix} := \text{Minerr}(arl, crl) \quad \begin{pmatrix} aR \\ cR \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 31.309 \\ 16.494 \end{pmatrix}$$

Решение. Определение точного значения параметров

Искомые функции

ВНДПС

Интенсивность

$$PRL(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } t < cR \\ \exp\left[-\left(\frac{t - cR}{aR}\right)^2\right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\lambda R L(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < cR \\ \frac{2}{aR^2} \cdot (t - cR) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Плотность

Гамма-процентный ресурс

$$fRL(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < cR \\ \lambda R L(t) \cdot PRL(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$RRL(\gamma) := aR \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right) + cR}$$

$$K2 := \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) \quad V2 := \frac{\sqrt{\Gamma(2) - K2^2}}{K2} \quad K2 = 0.886 \quad V2 = 0.523$$

Математическое ожидание

Коэффициент вариации

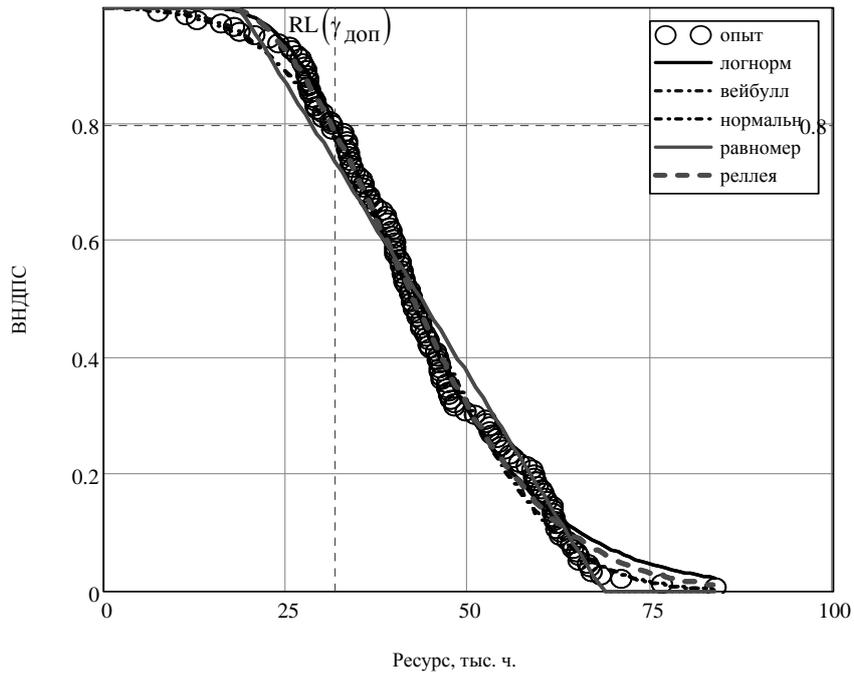
$$RRs := aR \cdot K2 + cR \quad RRs = 44.241 \quad VR1 := \frac{aR \cdot K2}{RRs} \cdot V2 \quad VR1 = 0.328$$

Общий коэффициент корреляции в натуральных единицах

$$P2RL_k := Pr(t_k) \quad CoRL := \text{corr}\left(\overrightarrow{P2RL}, Po\right) \quad CoRL = 0.991$$

Фрагмент 2-35

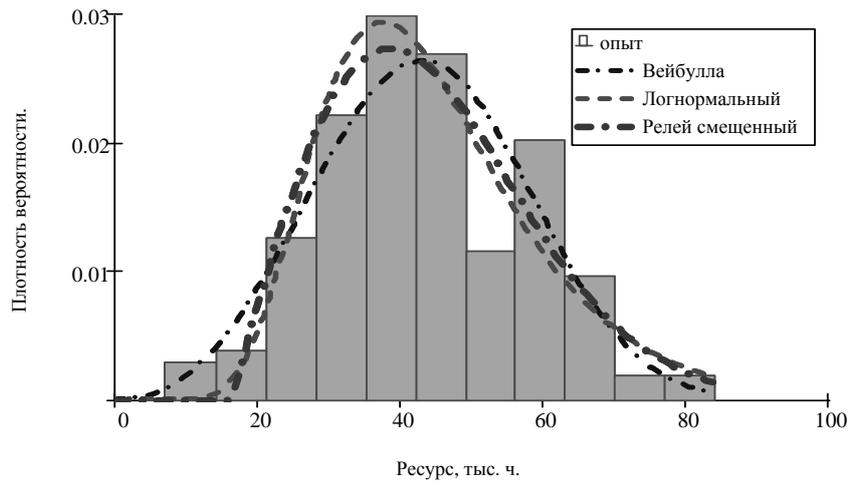
СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

bin := ceil(5·log(n2)) bin = 11 hgr := histogram(bin, t) j := 1 .. bin

$$f_u := \frac{hgr^{(2)}}{\sum hgr^{(2)} \cdot \left(\frac{t_{n2} - t_1}{bin}\right)} \quad \sum hgr^{(2)} = 149 \quad t_{n2} = 83.894$$



Фрагмент 2-36

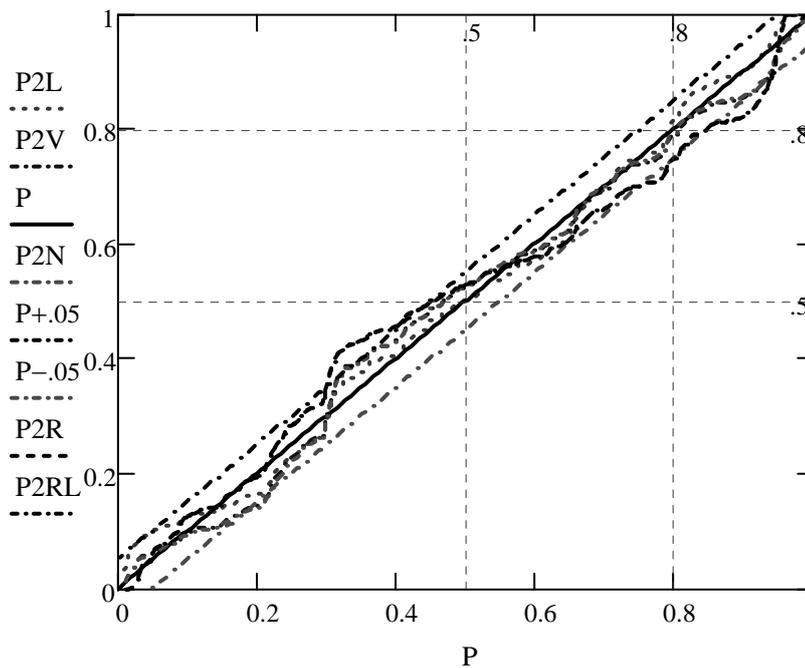
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕУЛЬТАТОВ

"Obs"	Исходная выборка
"Veyb"	Закон Вейбулла
"Log"	Лонормальный закон
"Nor"	Нормальный закон
"Rav"	Ровномерное распределение
"Rls"	Закон Реллея со смещением

Возврат в начало программы

Итог1 =

"Zakon"	"b"	"a"	"Korr"	"Sred"	"Var"	"R50"	"R80"
"Veyb"	3.254	48.803	0.995	43.241	0.335	43.13	30.558
"Log"	0.339	42.28	0.997	44.785	0.349	42.28	31.776
"Nor"	0.34	43.116	0.995	43.116	0.34	43.116	30.774
"Rav"	68.603	18.604	0.991	43.603	0.331	43.603	28.603
"Rls"	31.309	16.494	0.991	44.241	0.328	42.56	31.283



Корреляционный график

Фрагмент 2-37

Это позволяет перейти к рассмотрению фрагментов общей программы расчета параметров различных теоретических распределений, которые входят в состав каждой из программ раздела 2.4 и располагается сразу же (ниже) после векторов и графиков эмпирических распределений.

На фрагменте 2-30 рассматривается программа для расчета закона распределения Вейбулла методом наименьших квадратов.

На фрагменте 2-31 рассматривается программа для расчета закона распределения Вейбулла с применением функции *Minerr*.

На фрагменте 2-32 рассматривается программа для расчета логнормального закона с применением функции *Minerr*.

На фрагменте 2-33 рассматривается программа для расчета нормального закона с применением функции *Minerr*.

На фрагменте 2-34 рассматривается программа для расчета равномерного распределения с применением функции *Minerr*.

На фрагменте 2-36 рассматривается программа для расчета закона Релея со смещением с применением функции *Minerr*.

После последовательного расчета всех перечисленных распределений производится их сравнительный анализ. На фрагменте 2-36 показаны графики распределений в сочетании с эмпирическим распределением, которые строятся автоматически. Они позволяют получить первое представление о согласии теории и эксперимента. Однако для более объективного выбора закона, который находится в наилучшем согласии с экспериментом следует рассмотреть коэффициенты корреляции, которые вместе с другими показателями включены в итоговую таблицу на фрагменте 2-37. В данном примере предпочтение следует отдать логнормальному распределению (при коэффициенте корреляции 0.997), хотя близкие результаты получены и для нормального закона и закона Вейбулла). На этом все процедуры завершаются.

2.6.8. Определение числа объектов при испытаниях

Минимальное число N объектов наблюдений при известном законе распределения определяется по ГОСТ 17510 -72 [7]. Однако перед началом испытаний, как правило, никаких предположений о законе распределения не имеется. Для таких случаев можно воспользоваться результатами исследований доверительных границ при различных распределениях, приведенных в работе [52], а также принять во внимание, что в ГОСТ 17510-72 минимальное число N объектов наблюдений принято определять с помощью формул для верхней доверительной границы. На этом основании, если неизвестен закон распределения, предлагается использовать нормальное распределение для коэффициента вариации $V \leq 0.3$ и распределение Вейбулла для коэффициента вариаций $V > 0.3$.

При изучении показателей безотказности (наработка на отказ, коэффициент готовности и др.) допускается принимать доверительную вероятность $\beta = 0.8$, относительную ошибку $\delta = 0.2$ и экспоненциальное распределение. Если рассматриваются неремонтируемые объекты, то при указанных условиях получаем $N = 27$ ед. При изучении ремонтируемых изделий их минимальное число можно находить из условия

$$\left[\sum_{i=1}^N t_i \right]_{\min} \geq 30t_o, \quad (2.45)$$

где t_i — наработка i -го подконтрольного изделия, ч, t_o — предполагаемая

наработка на отказ, ч.

Условие (2.45) означает, что достоверность оценки безотказности изделия будет достаточной, если в период эксплуатации за суммарную наработку возникнет не менее 30 отказов. Тогда, располагая данными о числе объектов N и наработке на отказ t_o , можно определить минимальную продолжительность наблюдений

$$t_{\min} \geq 30t_o/N. \quad (2.46)$$

Если мы ограничены продолжительностью испытаний t_{\min} , то число подконтрольных ремонтируемых объектов

$$N \geq 30 t_o/t_{\min}. \quad (2.47)$$

При отсутствии обоснованных предположений о t_o продолжительность наблюдений за безотказностью должна соответствовать ресурсу до первого заводского ремонта судна, но составлять не менее трех лет. При этом текущая оценка безотказности судов и их оборудования производится ежегодно.

При планировании наблюдений с целью расчета показателей долговечности и ремонтпригодности зачастую бывает неизвестен не только закон распределения, но и коэффициент вариации. Для выхода из затруднительного положения в подобных ситуациях предлагается пользоваться ориентировочными данными, приведенными в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Определение минимального числа подконтрольных объектов

Исследуемая величина	V	δ	Число N при P =		
			0.8	0.9	0.95
Ресурс до планового ремонта в соответствии с графиками ППР и ППО	0.3 — 0.4	0.1	8	20	30
		0.2	3	6	16
Продолжительность и объем ремонта в соответствии с графиками ППР и ППО	0.3 — 0.4	0.1	8	20	30
		0.2	3	6	16
Скорость износа или износостойкость	0.5 — 0.6	0.1	25	50	85
		0.2	9	17	26
Нарботка до всех видов повреждений, обнаруженных при плановых ремонтах	0.3 — 0.7	0.1	25	50	85
		0.2	9	17	26
Нарботка на отказ	1.0	0.1	80	200	300
		0.2	27	55	90

3. Вероятностные модели надежности элементов техники

К актуальным проблемам машиностроения и приборостроения следует отнести прогнозирование надежной работы машин и приборов (далее — изделий) на всех этапах их жизненного цикла. Главная цель таких исследований состоит в предотвращении отказов разной степени тяжести (от мелких повреждений до катастроф) в период эксплуатации.

На стадии создания изделий проектант должен установить сроки службы (ресурсы) до ремонтов и списания изделия и принять конструктивно - технологические меры для обеспечения требуемого уровня безотказной работы в эти сроки. Для эксплуатации важнейшее значение имеет совершенствование документации по техническому обслуживанию и ремонту изделия. К ней можно отнести: правила и нормы проектирования и изготовления изделий, инструкции операционного контроля, режимы технологических процессов, инструкции по диагностированию и дефектации машин, нормы предельных зазоров и износов, нормативы сроков и объемов ремонта, нормы расхода запасных частей и другие.

Указанные задачи можно корректно решать на основе построения и анализа соответствующих вероятностных моделей (ВМ) надежности элементов изделия, которые представляют собой зависимости вероятностей не свершения событий (отказов или повреждений, наступления сроков ремонта и пр.) от времени для основных деградационных процессов.

Этой проблеме посвящен ряд наших научных трудов [18, 20 и др.]. В них сформулированы такие необходимые ключевые понятия, как уровни предельного состояния, запасы надежности и долговечности, вероятность не достижения предельного состояния, назначенный и гамма - процентный ресурсы и др. В этом разделе книги мы покажем результаты новых компьютерных исследований некоторых ВМ, основанных на двухпараметрических законах распределения и предназначенных для соответствующих объектов и условий применения.

3.1. ВМ типа «Веер»

В табл. 3.1 приведены результаты статистической обработки замеров износа деталей судовых дизелей [18], которые показывают, что при обычном качестве изготовления и не стабильной эксплуатации коэффициент вариации ресурса деталей составляет 0.3 — 0.5 и более.

Столь большое рассеивание износостойкости деталей машин позволяет положить в основу стандартной методики нормирования ремонтных циклов машин простейшую ВМ типа «Веер» (рис. 3-1), когда изнашивание каждого объекта починается линейной функции

$$H_i = v_i t, \quad (3.1)$$

где H_i — износ i - го объекта за время t , v_i — скорость износа i - го объекта.

Поскольку в данном случае решается задача оценки ресурсов однотипных элементов изделия, то взамен скорости износа целесообразно использовать ее обратную величину — износостойкость J_i , которая подчиняется такому же закону распределения, что и ресурс при постоянной величине заданному предельного износа H_d

$$J_i = 1/v_i, \quad R_i = J_i Hd. \quad (3.2)$$

Из выражения (3-2) следует два равноценных варианта оценки параметров распределения и гамма-процентного ресурса. Во-первых, можно рассчитать параметры распределения износостойкости и ее гамма-процентную величину с последующим их умножения на Hd . Второй вариант — можно сначала определить выборку ресурсов R_i по формуле (3.2), а затем оценить искомые статистические параметры. В данном случае имеется возможность применять метод моментов для полной простой выборки.

Таблица 3.1

Сведения о коэффициентах вариации судовых дизелей

Деталь или узел	Вид износа	$V_{\text{мин}}$	$V_{\text{макс}}$	$V_{\text{ср}}$
Цилиндровая втулка	По диаметру	0.51	0.51	0.51
	По овальности	0.73	0.73	0.73
Поршень	По диаметру	0.66	0.66	0.66
	По овальности	0.76	0.92	0.84
Поршневая канавка	По высоте	0.6	0.87	0.73
Поршень — цилиндровая втулка	По зазору	0.49	1.07	0.78
Палец — поршень (бобышка)	»	0.49	0.49	0.49
Палец — головная втулка	»	0.67	0.82	0.75
Поршневая канавка — кольцо	»	0.67	0.82	0.75
Поршневые кольца	По зазору в стыке	0.63	1.05	0.84
	По высоте	0.50	0.79	0.62
Мотылевая шейка коленчатого вала	По овальности	0.82	1.00	0.91
	По конусности	0.82	0.82	0.82
	По диаметру	0.48	0.75	0.61
Рамовая шейка коленчатого вала	По овальности	0.39	0.73	0.56
	По конусности	0.29	0.93	0.61
Мотылевая шейка — подшипник	По зазору	0.51	0.72	0.60
Рамовая шейка — подшипник	»	0.25	0.67	0.50
Головная втулка	По диаметру	0.30	0.75	0.51
	По овальности	0.75	0.75	0.75
Шейка распределительного вала	По диаметру	0.50	0.62	0.56
	По овальности	0.60	0.60	0.60
	По конусности	0.50	0.50	0.50
Распределительный вал — подшипник	По зазору	0.50	0.61	0.56
Направляющая втулка клапана	По диаметру	0.54	0.54	0.54
Втулка — ось коромысла	По зазору	0.57	0.57	0.57

Для построения такой модели был выбран наиболее эффективный закон распределения Вейбулла (см. п. 2.5.4), который обладает наилучшими аппроксимирующими свойствами. ВМ получаем непосредственно из выражения (2-24) для расчета гамма-процентного ресурса

$$R(\gamma) = \left[R_s / \Gamma(1+1/b) \right] \ln(1/\gamma)^{1/b}, \quad (3.3)$$

где R_s — средний ресурс, γ — допустимая вероятность не достижения предельного состояния, b — параметр формы распределения, который связан с коэффициентом вариации $V(b)$ таким образом

$$V(b) = \left[\Gamma(1+2/b) - \Gamma(1+1/b)^2 / \Gamma(1+1/b) \right]^{1/2}. \quad (3.4)$$

На примере этой модели имеется возможность показать влияния различных конструктивно-технологических и организационных факторов на гарантированную долговечность элемента изделия.

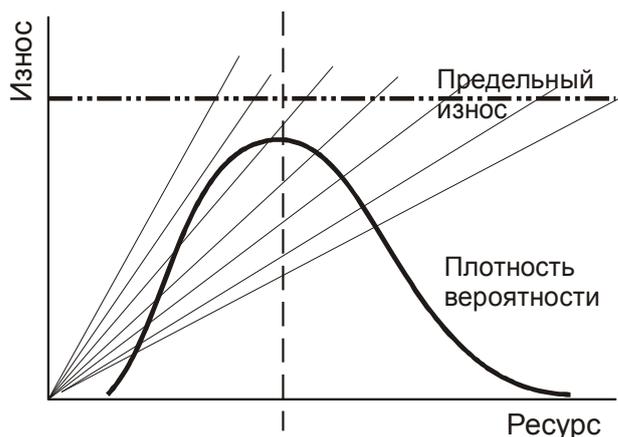


Рисунок 3-1 Образование ВМ

В методику решения этой задачи положены следующие способы увеличения $R(\gamma)$ по формуле (3.1). Во-первых — это очевидная возможность повышения ресурса R_s путем пропорционального увеличения средней износостойкости элемента Jsr , при заданном предельном износе $Hd = const$ и параметре b .

На стадии проектирования, изготовления или ремонта повышать Jsr , можно за счет изменения материала, применения упрочняющих технологий, улучшения системы смазки и прочее.

Во-вторых, ресурс $R(\gamma)$ можно повысить путем увеличения параметра формы распределения b при обратно пропорциональном уменьшении коэффициента вариации $V(b)$. Это потребует повышения стабильности качества изготовления, ремонта и эксплуатации изделия.

Для количественного анализа этих факторов была составлена специальная программа (фрагменты 3-1...3-3).

Анализ влияния качества узла трения на гамма-процентный ресурс

Рассматриваются два фактора качества: конструктивно-технологический фактор КТФ и фактор стабильности изготовления и эксплуатации СтФ.

В основу анализа положена гипотеза о том, что от конструктивно технологических факторов зависит математическое ожидание ресурса (износостойкости), то есть параметр масштаба a распределения Вейбулла, а от фактора качества зависит коэффициент вариации ресурса (износостойкости), т.е параметр формы b этого распределения.

Для того, что бы наглядно показать указанные зависимости разобьем указанные факторы на три уровня. Для КТФ эти уровни обозначим индексом FK , а для СтФ введем обозначение bk

Заданы следующие параметры. $\gamma_d := 0.8$ $R_n := 24$ $b_n := 2$

Назначенный ресурс до ремонта, которому соответствует параметр масштаба распределения Вейбулла при нормальных стабильности факторах

$$a_n := \frac{R_n}{\ln\left(\frac{1}{\gamma_d}\right)^{\frac{1}{b_n}}}$$

$$a_n = 50.806 \quad R_{Sr} := a_n \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b_n}\right) \quad R_{Sr} = 45.026$$

Установить уровни

Конструктивно - технологический фактор $FK :=$

Nisk
Norm
Vsk

$FK = 2$

фактор стабильности изготовления и эксплуатации $FS :=$

Nisk
Norm
Vsk
Vishs

$FS = 2$

Тогда

$$k(FK) := \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{if } FK = 1 \\ 1 & \text{if } FK = 2 \\ 2 & \text{if } FK = 3 \end{cases} \quad k(FK) = 1$$

Параметр масштаба распределения Вейбулла $a_k(FK) := a_n \cdot k(FK) \quad a_k(FK) = 50.806$

Параметр формы распределения Вейбулла $b_k := FS \quad K_b(bk) := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b_k}\right) \quad K_b(bk) = 0.886$

Тогда гамма-процентный ресурс составит

$$RK(\gamma_d, FK, bk) := a_k(FK) \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma_d}\right)^{\frac{1}{b_k}}$$

$$RK(\gamma_d, FK, bk) = 24$$

что отличается от назначенного ресурса $K_o(FK, bk) := \frac{RK(\gamma_d, FK, bk)}{R_n} \quad K_o(FK, bk) = 1$

Фрагмент 3-1

$Ko(1,2) = 0.5$	$Ko(3,2) = 2$	Диапазон различий при нормальном FS
$Ko(2,1) = 0.472$	$Ko(2,4) = 1.455$	Диапазон различий при нормальном FK
$Ko(1,1) = 0.236$	$Ko(3,4) = 2.91$	Диапазон различий от минимума до максимума

Среднии ресурсы $RSR(FK, bk) := ak(FK) \cdot K_b(bk)$ $RSR(FK, bk) = 25.403$

$RSR(1,2) = 22.513$ $RSR(3,2) = 90.052$ $ak(FK) = 25.403$

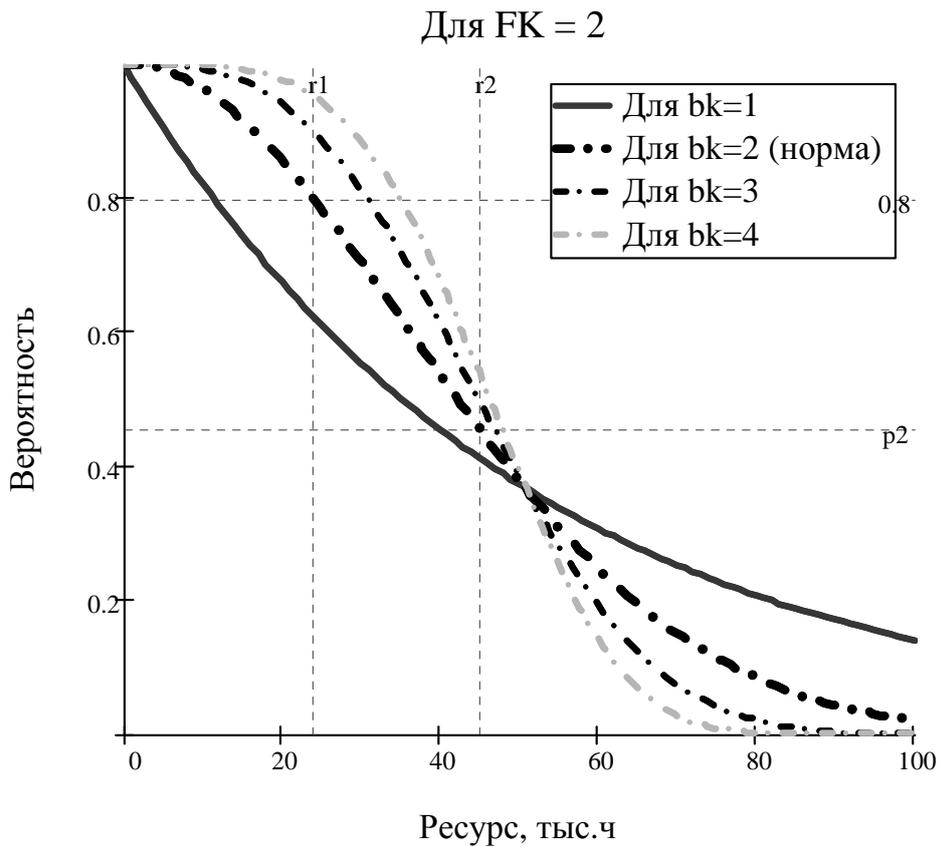
$RSR(2,1) = 50.806$ $RSR(2,2) = 45.026$ $ak(2) = 50.806$

$$PK(t, FK, bk) := \exp\left(-\left(\frac{t}{ak(FK)}\right)^{bk}\right)$$

Влияние стабильности качества при нормальной конструкции

$T1 := \text{Floor}(2 \cdot ak(2), 4)$ $T1 = 100$ $r1 := RK(\gamma_d, 2, bn)$ $r2 := RSR(2, bn)$ $p2 := PK(r2, 2, bn)$

Диапазон времени $tk := 0.. T1$

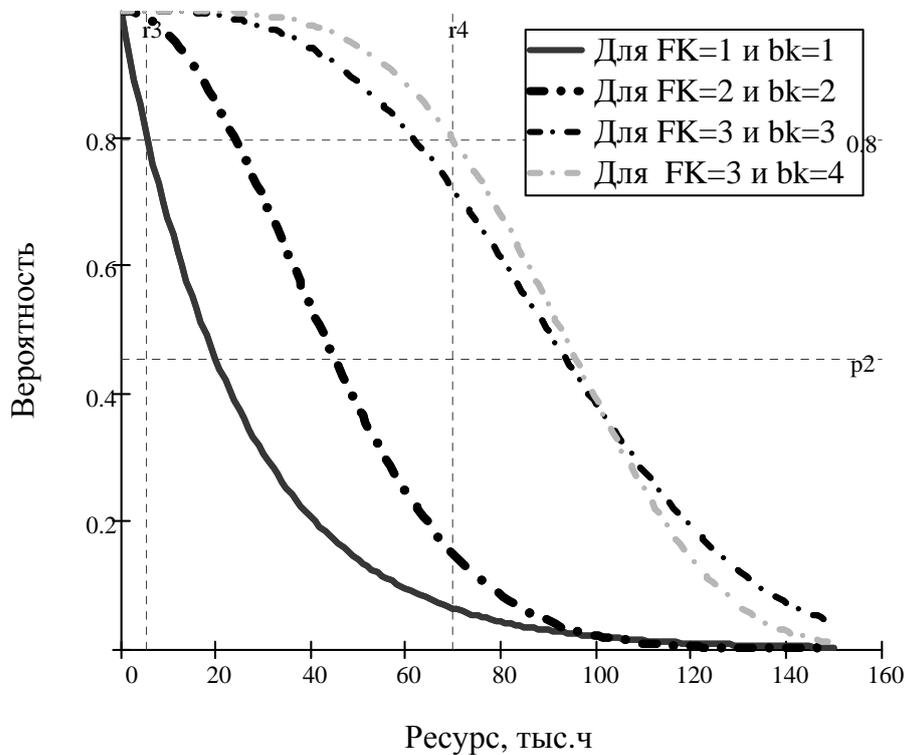


Фрагмент 3-2

Влияние конструктивно - технологический фактора

Диапазон времени $T1 := \text{Floor}(1.5 \cdot ak(3), 5)$ $r3 := RK(\gamma_d, 1, 1)$ $r3 = 5.669$
 $tk := 0.. T1$ $r4 := RK(\gamma_d, 3, 4)$ $r4 = 69.839$

Для различных значений



Итоговая таблица диапазона изменения ресурса за счет конструктивных факторов и качества

$FK := 1..3$ $bk := 1..4$ $M_{0,FK} := FK$ $M_{bk,0} := bk$ $M_{0,0} := "bk\backslash FK"$

$$M_{bk,FK} := \frac{RK(\gamma_d, FK, bk)}{RK(\gamma_d, 2, 2)}$$

M =

"bk\FK"	1	2	3
1	0.24	0.47	0.94
2	0.5	1	2
3	0.64	1.28	2.57
4	0.73	1.45	2.91

Фрагмент 3-3

На фрагменте 3-1 показана величина назначенного ресурса исследуемого элемента машины (например, 24 тыс.ч для цилиндровой втулки дизеля) при известном параметре формы, например $b = 2$. Если положить, что назначенный ресурс соответствует гамма-процентному ресурсу, то по заданной величине $\gamma_{доп}$ можно определить параметр масштаба $an = 50.8$ тыс.ч и средний ресурс 45.02

тыс.ч. Далее в программу помещены управляющие скрипты для изменения параметров закона Вейбулла в процессе демонстрации влияния на ресурс различных факторов. Эти факторы включены в функции для расчета гамма - процентного ресурса (фрагмент 3-1) и вероятности не достижения предельного состояния (фрагмент 3-2). При этом на фрагменте 3-2 построен график влияния на вероятностные функции только параметра формы b при неизменном параметре масштаба a . Интересно отметить, что все кривые имеют общую точку пересечения с координатами $(an = \exp(-1) = 0.368)$. Это значит, что параметр масштаба у закона Вейбулла всегда соответствует вероятности НДПС 0.368. Для сравнения отметим, что при нормальном законе этот показатель равен 0.5.

На фрагменте 3-3 построены кривые вероятностей для разных значений параметра формы и масштаба. С увеличением этого параметра возрастает крутизна этих кривых и повышается гамма — процентный ресурс.

В нижней части фрагмента 3-3 приводится небольшая программа для построения табл. 3.3 с коэффициентами отклонения гамма-процентного ресурса от исходного варианта.

Из таблицы видно, что за счет конструктивно-технологических мероприятий ресурс можно повысить, например, в два раза, а за счет повышения стабильности качества, т.е. культуры производства и эксплуатации — примерно в 1.5 раза. При реализации всех возможных мероприятий можно ожидать увеличения ресурса примерно в три раза. Если же за исходную точку брать самый низкий уровень долговечности (коэффициент 0.24) , то при определенных условиях можно добиться увеличения ресурса более чем в 10 раз до $K_o = 2.9$.

Конечно, окончательное решение следует принимать с учетом соотношения затрат на реализацию всех мероприятий и экономического эффекта от повышения ресурса.

Таблица 3.3

Влияние факторов качества на гамма-процентный ресурс

Параметр формы (фактор стабильности)	Коэффициенты конструктивно-технологического фактора		
	1	2	3
1	0.24	0.47	0.94
2	0.5	1	2
3	0.64	1.28	2.57
4	0.73	1.45	2.91

3.2. ВМ типа «Тренд»

Рассматриваемые ВМ типа «Тренд» широко применяются для изучения законов изменения состояний конкретных (а не обезличенных!) экземпляров объекта при лабораторных или стендовых испытаниях, а так же — в процессе периодического мониторинга (диагностирования) машин и приборов.

Этой простой задаче вряд ли стоило уделять особое внимание, если бы мы не

поставили перед собой цель оценить вероятность среднеквадратичного отклонения нижней границы ресурса от математического ожидания. Иначе говоря, мы хотим проверить, насколько отличается нижняя граница ресурса от 80-процентного ресурса, определяемая с помощью какого либо закона распределения.

Исходными данными для построения модели служат периодические измерений диагностического параметра hl_i после соответствующей наработки tl_i , которые образуют два вектора hl и tl (см. фрагмент 3-5). При этом должны быть заданы граничные значения износов, т.е. номинальное (исходное значение $h_0 = 2.1$ мм и допустимое значение $hd = 15$ мм). Еще одним ограничительным параметром в этой модели является назначенный ресурс $Rn = 20$ тыс. ч, который является критерием оценки долговечности изделия. В принципе задача сводится к проверке того, насколько нижняя граница фактического ресурса отличается от ресурса Rn в ту или иную сторону. Для построения этой модели применяется корреляционный анализ на основе метода наименьших квадратов (МНК).

Этот выбор оправдан тем, что он позволяет использовать естественную дисперсию экспериментальных данных для обоснования параметров теоретических распределений с высокой степенью достоверности.

В принципе корреляционный анализ с применением МНК хорошо известен и он сводится к расчету постоянных C и M уравнения регрессии вида

$$Y(t) = C + M \cdot X(J), \quad (3.5)$$

где $Y(t)$ и $X(J)$ — анаморфозы исследуемых параметров аргумента J (например, износа) и функции t (например, времени).

Здесь будут рассмотрены два варианта модели степенная и линейная. Сначала изучим степенную анаморфозу, показанную на фрагментах 3-5 и 3-6.

Аналитические и графические зависимости нижних и верхних границ кривых износа на фоне экспериментальных точек показаны на фрагменте 3-6. При этом отклонение этих кривых от средней линии при степенной функции зависят от среднеквадратичных отклонений δx и δy .

Для того, что бы оценить износостойкость рассматриваемого узла необходимо сравнить нижнюю границу ресурса $Rm(nd)$ с назначенным ресурсом Rn , используя отношение

$$kmr = Rm(nd) / Pn. \quad (3.6)$$

Оценка выполняется автоматически с помощью программы на фрагменте 3-4

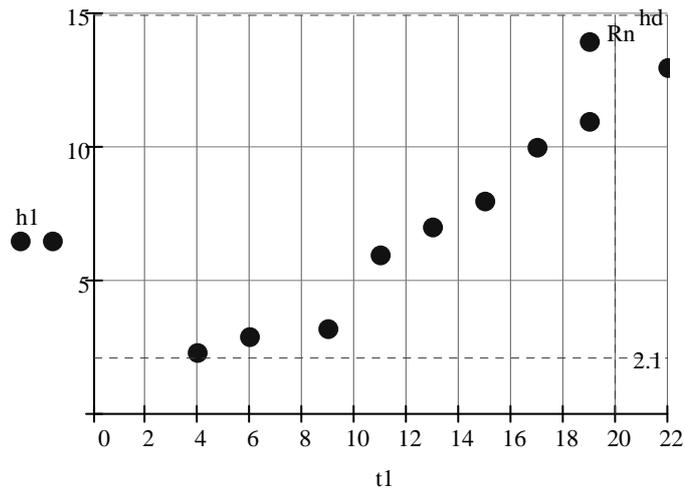
Оценка :=	"Отлично" if $kmr \geq 1.8$	Оценка = "Удовлетворит"
	"хорошо" if $1.8 > kmr \geq 1$	
	"Удовлетворит" if $1 > kmr \geq 0.9$	
	"плохо" if $kmr < 0.9$	

Фрагмент 3-4

Номинальный размер $h_0 := 2.1$ Назначенный ресурс $R_n := 20$
 Предельный размер $h_d := 15$ Число измерений $m := 10$
 Номера членов выборки $i := 0..m - 1$

Вводим вектора наработки t_1 (тыс.ч) и результаты замеров h_1
 $t_1 :=$ $h_1 :=$

4	2.3
6	2.9
9	3.2
11	6
13	7
15	8
17	10
19	14
19	11
22	13



$\text{length}(t_1) = 10$

Рассматриваем два варианта модели: степенную и линейную

Вариант 1. Степенная модель, при которой применяется следующая аномарфоза

$$x_1 := \ln\left(\frac{h_1 - h_0}{h_d - h_0}\right) \quad y_1 := \ln(t_1)$$

Для построения этой модели мспользуем симметричную линейную корреляцию, при которой прямая и обратная функция обратимы

Поэффициент корреляции $KOR := \text{corr}(x_1, y_1) \quad KOR = 0.983$

Угловой коэффициент регрессии $bb := KOR \cdot \frac{\sqrt{\text{Var}(y_1)}}{\sqrt{\text{Var}(x_1) \cdot KOR^2}} \quad bb = 0.409$

Средние значения векторов

$ysr := \text{mean}(y_1) \quad xsr := \text{mean}(x_1)$

Тогда средний ресурс составит $Rs := \exp(ysr - bb \cdot xsr) \quad Rs = 20.835$

Относительные отклонения от средней линии

Фрагмент 3-5

$$\delta y := \sqrt{(1 - KOR^2) \cdot Var(yy)} \quad \delta y = 0.101 \quad \delta x := \sqrt{(1 - KOR^2) \cdot Var(xx)} \quad \delta x = 0.247$$

Уравнение нижней и верхней границ износа

$$hx(t) := 0 + (hd - h0) \cdot \left(\frac{e^{-\delta x}}{e^{\delta x}} \right) \cdot \left(\frac{t}{Rs} \right)^{\frac{1}{bb}}$$

Уравнение средней линии износа $hlx(t) := 0 + (hd - h0) \cdot \left(\frac{t}{Rs} \right)^{\frac{1}{bb}}$

$$tx := 0.1, 0.11, \dots, t_{m-1}$$

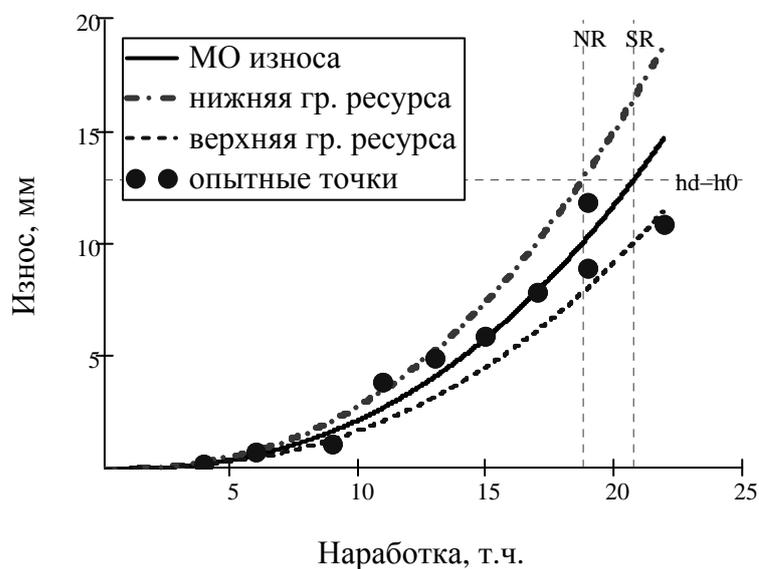
Уравнение для нижней границы ресурса

$$Rm(h) := Rs \cdot e^{-\delta y} \cdot \left(\frac{h - h0}{hd - h0} \right)^{bb} \quad kmr := \frac{Rm(hd)}{Rn} \quad kmr = 0.941 \quad Rm(hd) = 18.83$$

Уравнение для средней линии ресурса

$$Rsr(h) := Rs \cdot \left(\frac{h - h0}{hd - h0} \right)^{bb} \quad kms := \frac{Rsr(hd)}{Rn} \quad kms = 1.042 \quad Rsr(hd) = 20.835$$

$$NR := Rm(hd) \quad SR := Rsr(hd)$$



Фрагмент 3-6

Вариант 2. Линейная модель , при которой применяется следующая более простая аномарфоза

$$x_1 := \frac{h_1 - h_0}{hd - h_0} \quad y_1 := t_1$$

Для построения этой модели мспользуем симметричную линейную корреляцию, при которой прямая и обратная функция обратимы

Коэффициент корреляции $KOR1 := \text{corr}(x_1, y_1) \quad KOR1 = 0.965$

Угловой коэффициент регрессии $bl := KOR1 \sqrt{\frac{\text{Var}(y_1)}{\text{Var}(x_1) \cdot KOR1^2}}$

Средние значения векторов

$ysl := \text{mean}(y_1) \quad xsl := \text{mean}(x_1)$

Тогда средний ресурс составит $Rls := ysl - bl \cdot xsl$

Относительные отклонения от средней линии

$\delta y := \sqrt{(1 - KOR1^2) \cdot \text{Var}(y_1)} \quad \delta y = 1.558 \quad \delta x := \sqrt{(1 - KOR1^2) \cdot \text{Var}(x_1)} \quad \delta x = 0.085$

Уравнение нижней и верхней границ износа

$$hlx(t) := h_0 + (hd - h_0) \cdot \left[\frac{t - Rls}{bl} + \begin{pmatrix} -\delta x \\ \delta x \end{pmatrix} \right]$$

Уравнение средней линии износа $hsx(t) := h_0 + (hd - h_0) \cdot \left(\frac{t - Rls}{bl} \right)$

$tx := 0, 0.1.. 1.5 Rn$

Уравнение для нижней границы ресурса

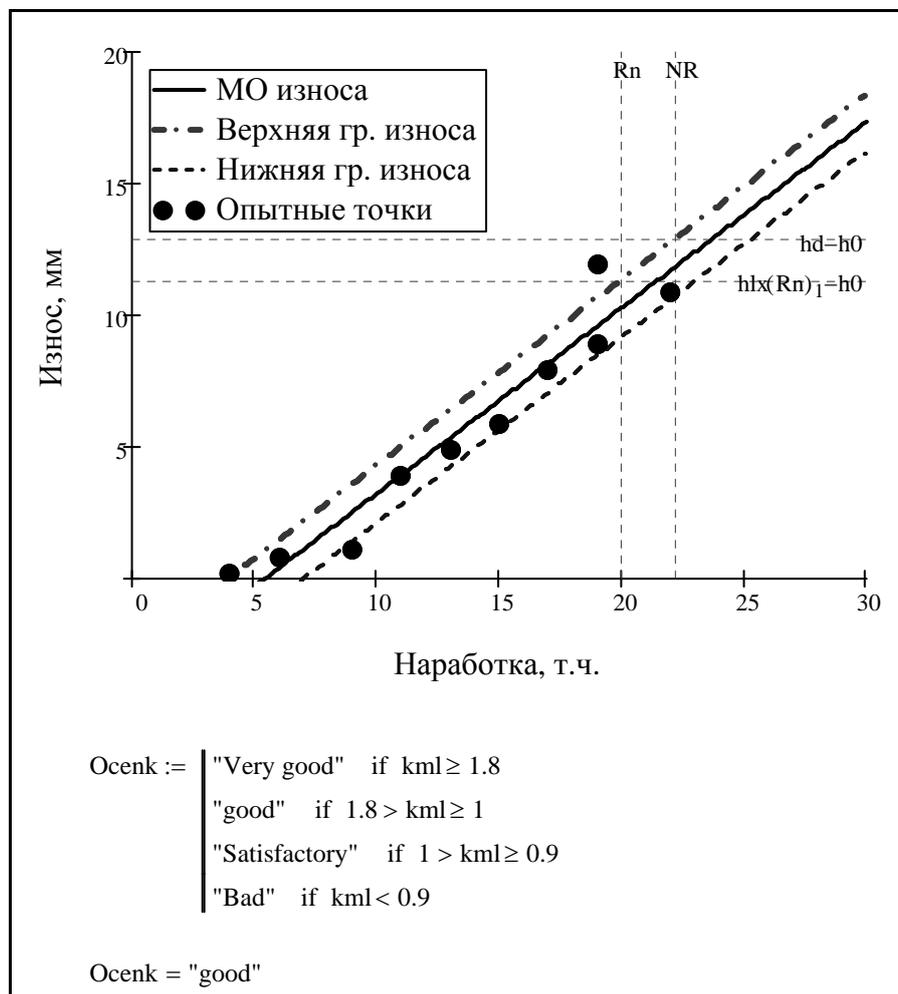
$Rm(h) := Rls + bl \cdot \frac{h - h_0}{hd - h_0} - \delta y \quad Rm(hd) = 22.221$

$kml := \frac{Rm(hd)}{Rn} \quad \underline{NR} := Rm(hd)$

Уравнение для среднего ресурса

$Rsl(h) := Rls + bl \cdot \frac{h - h_0}{hd - h_0} \quad Rsl(hd) = 23.78$ относительно назначенного ресурса $kls := \frac{Rsl(hd)}{Rn}$

Фрагмент 3-7



Фрагмент 3-8

Аналогичная программа составлена для более простой анаморфозы в виде линейной функции (Фрагменты 3-7 и 3-8). Из фрагментов видно, что при высокой износостойкости фактический ресурс может настолько превысить назначенный ресурс и тогда ремонта узла не потребуется. Более вероятна ситуация попадания нижней границы фактического ресурса в зону, близкую к назначенному ресурсу. Это означает выполнение ремонта в нормальные плановые сроки.

Большое значение трендовые ВМ имеют для организации и проведения стендовых ресурсных испытаний машин, поскольку ресурс можно оценивать даже на ранних стадиях испытаний с последующей корректировкой по мере накопления информации. Наш опыт подобных исследований позволяет отдавать предпочтение линейным моделям. Они имеют более спокойные тренды по сравнению со степенными моделями.

Завершить раздел о ВМ типа «Тренд» целесообразно интересным и важным для практики вопросом оценки вероятности γ_{ng} на нижней границе рассеивания ресурса R_m , которая меньше среднего ресурса на величину среднеквадратичной ошибки

$$R_m = R_s(1 - V),$$

где $V = \delta_y/R_s$ при линейной ВМ

$$\text{и } V = \delta_y \text{ при степенной ВМ.} \quad (3.7)$$

Напомним, что для различных деградационных процессов допустимая вероятность не достижения предельного состояния $\gamma_{доп}$ принимается в пределах от 0.8 (износы) до 0.95 (усталость). Интересно доказать, насколько отличается от этих величин вероятность γ_{ng}

Задача была решена впервые по специальным компьютерным программам в математическом редакторе MATHCAD. Проще всего этот вопрос удалось решить для нормального распределения, поскольку его квантиль в любом случае оказался равным единице не зависимо от исходных данных, что соответствует $\gamma = 0.841$. Это видно из выражения 3-8

$$U_\gamma = \left[1 - \left(R_s(1 - V)/R_s \right) \right] / V = 1; \left. \begin{array}{l} \\ cnorm(U_\gamma) = cnorm(1) = 0.841 \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

Более интересное решение получено для закона Вейбулла, когда выражение для распределения вероятности удалось получить в виде функции от параметра формы b (см. фрагмент 3-9).

В нижней части фрагмента 3-9 приведены график и таблица, которые показывают, что начиная при $b > 1.5$ вероятность γ_{ng} находится в пределах 0.85...0.83 (минимальное значение 0.83 наблюдается при $b = 2$). Более высокие значения вероятности наблюдаются при $b \rightarrow 1$, что, в данном случае, уже не имеет практического значения. Можно отметить, что распределение Вейбулла при $b = 3$, когда он почти совпадает с нормальным распределением $\gamma_{ng} = 0.832$, что находится в хорошем согласии указанной выше величиной 0.841.

В заключении рассмотрим фрагмент 3-10, где дается обоснование зависимости γ_{ng} от коэффициента вариации выборки в пределах от 0 до 1 для логнормального закона. И в этом случае вероятность γ_{ng} изменяется в диапазоне от 0.841 до 0.78. В средней части диапазона имеем $\gamma_{ng} = 0.8$.

Таким образом, при всех законах распределения нижнюю границу среднего ресурса (в пределах одной сигмы) можно в первом приближении принимать в качестве норматива долговечности узла трения, поскольку ВНДПС в этом случае будет не хуже 80-процентного ресурса для рассматриваемого процесса деградации.

Рассмотрим распределение, имеющего параметр формы b и параметр масштаба a . Тогда средний ресурс и коэффициент вариации будут определяться такими выражениями

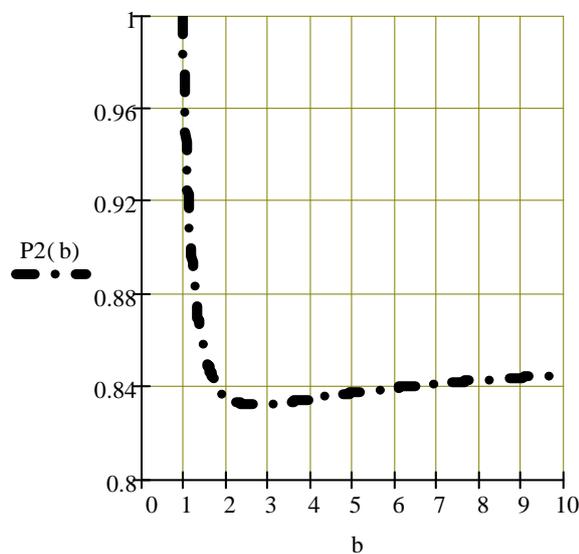
$$rs(a, b) := a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \quad v(b) := \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}$$

Определим выражение для расчета вероятности для нижней границы среднего ресурса

$$P(a, b) := e^{-\left(\frac{a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) - a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \cdot \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}}{a}\right)^b}$$

После сокращения и упрощений получаем следующее выражение, которое зависит только от параметра формы

$$P2(b) := e^{-\left[\Gamma\left(\frac{b+1}{b}\right) - \left(\Gamma\left(\frac{b+2}{b}\right) - \Gamma\left(\frac{b+1}{b}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right]^b} \quad b := 1, 1.01.. 10$$



$$i := 1..10 \quad b_i := 0 + i \cdot 1.5 \quad vv_{i,0} := b_i$$

$$vv_{0,0} := "b" \quad vv_{0,1} := "PP" \quad vv_{i,1} := P2(b_i)$$

vv =

"b"	"PP"
1.5	0.856
3	0.832
4.5	0.836
6	0.839
7.5	0.842
9	0.844
10.5	0.845
12	0.846
13.5	0.847
15	0.848

Фрагмент 3-9

Для логнормального закона квантиль так же зависит от параметра формы $b(\delta)$, который зависит от коэффициента вариации

$$b(\delta) := \sqrt{\ln(1 + \delta^2)} \text{ simplify } \rightarrow \ln(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}$$

Тогда МО ресурса определяется по выражению $\text{tsr}(aa, \delta) := aa \cdot e^{-\frac{b(\delta)^2}{2}}$

Отсюда следует формула квантиля для нижней границы ресурса

$$U1(aa, \delta) := \frac{\ln\left[\frac{aa}{\text{tsr}(aa, \delta) \cdot (e^{-\delta})}\right]}{b(\delta)} \text{ simplify } \rightarrow \frac{\ln\left[\frac{1}{(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot e^{\delta}\right]}{\ln(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

После преобразований получаем два варианта наиболее простого вида равноценной зависимости квантиля только от коэффициента вариации

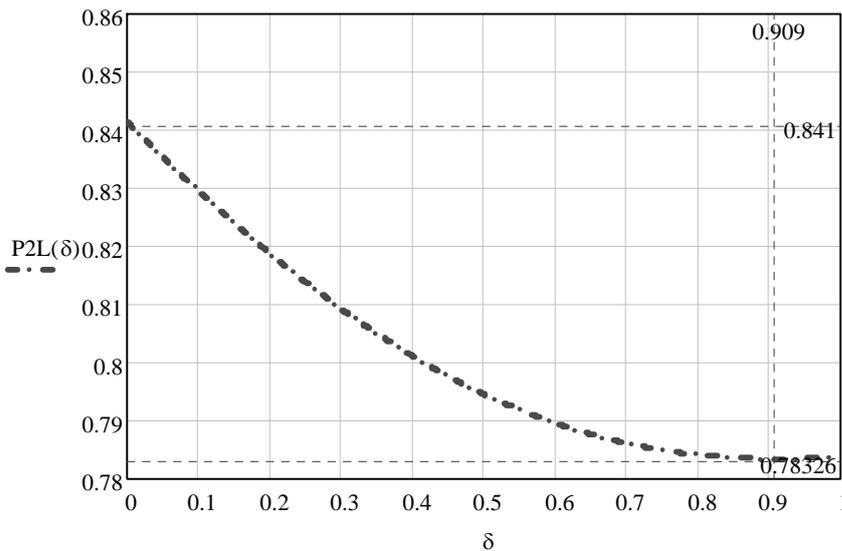
$$U1(\delta) := \frac{\delta - \ln\left[\frac{1}{(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}}\right]}{\ln(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$U2(\delta) := \frac{2 \cdot \delta - \ln(1 + \delta^2)}{2 \cdot \ln(1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Тогда вероятность недостижения предельного износа для нижней границы ресурса составит

$$PL(\delta) := \text{cnorm}(U1(\delta)) \quad \boxed{P2L(\delta) := \text{cnorm}(U2(\delta))} \quad PL(0.3) = 0.809 \quad PL(1) = 0.784$$

$$\delta_{\text{max}} := 0.001, 0.0012, 1 \quad P2L(0.0001) = 0.841$$



Фрагмент 3-10

3.3. ВМ типа «усталость»

Достижения отечественной академической науки о прочности металлов привели к созданию инженерных методов расчетной и экспериментальной оценки характеристик сопротивления усталости. В частности, разработанный на этой основе ГОСТ 25.504-82 [10] позволяет оценивать медианный предел выносливости детали $\sigma_{баз}$ для базового числа $N_{баз} = 2 \cdot 10^6$ циклов с учетом конструктивно-технологических свойств детали. При этом величина $\sigma_{баз}$, соответствует точке перелома на кривой усталости. Левая часть кривой усталости характеризуется степенной функцией. Принято считать, что вправо от указанной точки кривая усталости должна переходить в прямолинейную зону неограниченной долговечности. Однако, опыт эксплуатации и статистика усталостных разрушений деталей многих машин и сооружений не всегда подтверждают эту гипотезу. В связи с этим было проведено исследование, которое показало эффективность логнормальной модели кривой усталости степенного вида при нулевой асимптоте, позволяющей оценивать предел выносливости при любом числе цикле (например при $10^9 \dots 10^{10}$ циклов). Обоснование этой модели дано в разделе 6.1. книги.

3.4. ВМ экспоненциального типа

Рассмотренные выше ВМ в основном разрабатывались для решения проблем организации технического обслуживания и ремонта машин, большинство элементов которых представляют собой механические пары трения, которые подвержены процессам постепенного ухудшения их состояния (изнашивание, усталость поверхности и др.).

В отличие от машин, большинство современных приборов содержат электронные системы, элементы которых могут хотя и редко, но неожиданно выходить из строя по другим причинам, например из-за повреждения контактов плат и проводников под влиянием внешней вибрации от работы вентиляторов, перепада температур при циклическом включении-выключении приборов, инерционных нагрузок при перемещении и пр. Поэтому для приборов в качестве основного вероятностного параметра чаще применяют такие показатели безотказности, как накопленную вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Интенсивность отказов обычно используют для общего анализа схемной безотказности изделия без изучения физики отказов [38]. В этом случае ВМ выражается экспоненциальным законом распределения при средневзвешенной (статистической) интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = const$. Тогда ВБР, гамма-процентный ресурс, интенсивность отказов и плотность распределения вероятности могут оцениваться по следующим формулам

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda t); \\ R(P_d) &= (1/\lambda) \ln(1/P_d); \\ \lambda(t) &= \lambda = \text{const}; \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t). \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Как известно, при экспоненциальном законе коэффициент вариации равен единице и поэтому для достижения высоких значений ВБР интенсивность отказов должна быть очень низкой. Например, для $P(t) = 0.999$ за один час работы надо иметь $\lambda = 0.001$, т.е. 1 отказ за 1000 часов! Если же за время t будет происходить лишь один отказ, то $P(t) = 1/e = 0.368$. Однако, это не значит, что изделие имеет низкую надежность, если отказ не имеет опасных последствий. Поэтому вероятность безотказной работы не является достаточно информативным показателем безотказности и для общей оценки лучше применять комплексный показатель «коэффициент готовности» с учетом среднего времени восстановления изделия после отказа τ_o :

$$\left. \begin{aligned} K_z &= 1/(1 + \lambda \tau_o); \\ \tau_o &= \sum_{i=1}^n \tau_i / n. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Тем не менее, интенсивность отказов и соответствующую ВБР целесообразно использовать для анализа безотказности элементов сложного изделия с одинаковыми последствиями отказов. Критерием оценки этих показателей должны служить их допустимые значения, учитывающие последствия отказов соответствующих элементов.

3.5. Построение ВМ по тренду интенсивности отказов

В заключении покажем классический принцип формирования ВМ для объектов, работающих под влиянием циклическим нагрузок, когда их долговечность оценивается числом циклов до наступления предельного состояния N . Заметим, что этому условию отвечают практически все машины и приборы (как и все в природе), поскольку в их работе всегда можно найти колебания нагрузок с разной частотой и амплитудой.

В основе этого принципа лежит теоретическое или экспериментальное изучение функции тренда интенсивности отказов $\lambda(N)$, что позволяет найти закон распределения вероятности с помощью, так называемого, интеграла надежности.

$$P(N) = \exp\left(-\int_0^N \lambda(N) dN\right). \quad (3.11)$$

В докладе [1] было показано, что, например, интенсивность отказов $\lambda(N)$ дат-

чиков дистанционных термометров представляет собой вероятность достижения предельного состояния для случайного спектра воздействий на объект за каждый цикл ускоренных испытаний.

Если теперь $\lambda(N)$ аппроксимировать степенной функцией

$$\lambda(N) = C N^m, \quad (3.12)$$

а затем применить интеграл надежности (3-11), то получаем ВМ, соответствующий формулам (2.20...2.22) для закона распределения Вейбулла.

При этом параметры закона Вейбулла по формуле (2.20) связаны с параметрами функции интенсивности отказов следующим образом.

$$b = m+1, \quad a = (b/C)^{1/b}. \quad (3.13)$$

В другой работе [18] была показана оригинальная ВМ безотказной работы, учитывающая как внезапные, так и постепенные износные отказы изделия. Эта модель так же была образована на основе интеграла надежности (3.11), но с применением не степенной, а линейной функция интенсивности отказов

$$\lambda(N) = 1/a1 + (2/a2^2)N. \quad (3.14)$$

После подстановки в интеграл вероятности и его решения мы получаем распределение вероятности (3.15) в виде суперпозиции двух распределений — экспоненциального (т.е Вейбулла при $b = 1$) и Релея (т.е. Вейбулла при $b = 2$). При этом первое слагаемое с $b = 1$ соответствует внезапным отказам с постоянной интенсивностью, а второе с $b = 2$ — постепенным износным отказам с линейно возрастающей интенсивностью.

$$\left. \begin{aligned} P(N) &= \exp\left(-\int (1/a1 + (2/a2^2)N) dN\right) = \exp\left(-\left((N/a1) + (N/a2)^2\right)\right) \text{ или} \\ P(N) &= \exp(-N/a1) \cdot \exp\left(- (N/a2)^2\right). \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Путем решения соответствующего квадратного уравнения отсюда получаем формулу для расчета гамма - процентного ресурса

$$R(\gamma) = (a2/2) \left[\left(\sqrt{(a2/a1)^2 + 4 \ln(1/\gamma)} \right) - (a2/a1) \right]. \quad (3.16)$$

Такая вероятностная модель соответствует реальному формированию надежности многих изделий, которые одновременно подвержены как постепенным, так и внезапным процессам изменения их состояния.

Все зависит от соотношения показателя масштаба $a2$ (для закона Релея) и $a1$ (для экспоненты). При уменьшении соотношения $k = a2/a1$ будет уменьшаться роль внезапных отказов и возрастать гамма-процентный ресурс за счет приближения к закону Релея и наоборот, что показано в табл. 3.4 и на рис. 3-2.

Анализ соотношения влияния постепенных и внезапных отказов

i	K	R(γ)
1	0.000001	23.619
2	0.2	19.142
3	1	9.393
4	5	2.212

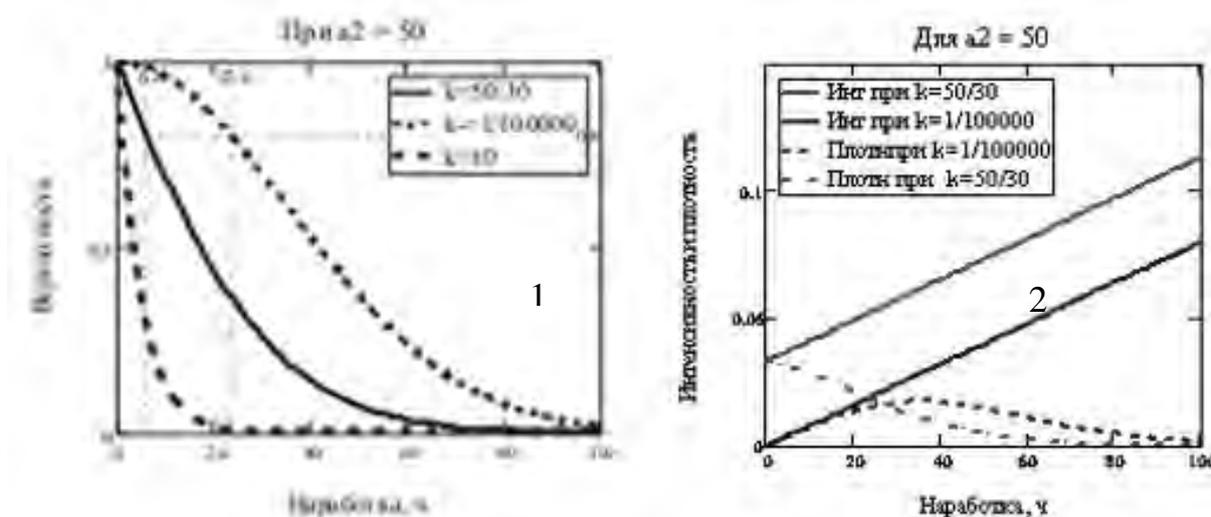


Рисунок 3-2. Кривые распределений:

1 — вероятностей, 2 — интенсивности и плотности распределений

Приведенные примеры не исчерпывают всего перечня проблем формирования ВМ в зависимости от решаемых задач и систем получения исходной информации. Автор надеется, что эти результаты найдут достойное применение в практике инженерной, научной и педагогической работы.

4. Оценка надежности машин

4.1. Нормативы надежности при эксплуатации машин

Рассмотренные выше сведения о вероятностном моделировании надежности предназначены для создания техники, способной безопасно и эффективно выполнять свои функции с минимальными затратами на техническое обслуживание и ремонт. Конечно, конкретные виды техники проектируются и изготавливаются по своим правилам и законам, разнообразие которых не позволяет подробно рассматривать в этой книге. Здесь более важно рассмотреть методические вопросы корректировки нормативов надежности в процессе самой технической эксплуатации (ТЭ). Организация и трудоемкость ТЭ зависит от сложности и назначения техники. Например, судовой двигатель внутреннего сгорания наряду с использованием по прямому назначению, подлежит техническому обслуживанию силами специально обученного персонала (судовых механиков) и ремонту на судоремонтном предприятии в соответствии с системой ППР.

Если двигатель оснащен качественной руководящей документацией, то судовые механики имеют возможность регулярно выполнять работы по ТО, согласно инструкции. Для примера рассмотрим фрагменты такой инструкции по обслуживанию двигателя ПИЛСТИК РС2-5 V 400.

В инструкции применены следующие обозначения допустимых размеров LA и LR. LA — допускаемый предел в зависимости от календаря обслуживания, LR — крайний предел работы: исправление или немедленный брак. Между LA и LR деталь может еще работать, но может выйти за LR до следующего осмотра. Потребитель сам решает вопрос о замене детали в зависимости от рабочих условий, цены, доступности и промежутка между осмотрами.

Из приведенных ниже копий листов из инструкции (рис. 4-1...4-6) следует большое внимание, которое придает фирма-поставщик культуре обслуживания двигателя от применения специальных приспособлений для ремонта до учета масс основных деталей при сборке машины. Особое значение имеет информация об усилиях затяжки резьбовых соединений и нормах износов и зазоров (рис. 4-5), т.е. о диагностических параметрах основных узлов машины.

Эти параметры подлежат контролю (мониторингу) по регламентированному графику технического обслуживания и ремонта (система ППР). Система ППР расписана с периодичностью 1500 ч в диапазоне от начала эксплуатации до 36000 ч. При этом можно условно выделить четыре ключевых вида ремонта: текущий после 6000 ч, средний после 12000 ч, первый капитальный после 24000 ч и второй капитальный после 36000 ч.

При этом заданные нормативы ремонта этого двигателя подтверждают вероятностную методологию нашей книги. В инструкции сказано, что время, по которому определяется те или иные операции осмотра и контроля, может изменяться в пределах $\pm 20\%$.

Например, ежегодные осмотры и контроль предусмотренные для выполнения через 6000 ч работы двигателя, могут быть произведены в промежутке от 4800 ч до 7200 ч.

Рассеивание износов зависит от таких факторов, как используемое топливо и масло, время работы двигателя на полной мощности, количество пусков, температура воды масел и топлива в период работы и т.п.

Поэтому, во избежание ненужных разборок, предусмотрены осмотры и обмеры главных деталей после определенных периодов работы двигателя в течение которых износы стабилизируются. По линейным характеристикам определяются пределы износов LR для основных деталей двигателя, колец и клапанов, подшипников или втулок.

Осмотр 12000 Р должен быть произведен после такого времени работы, когда наиболее изнашиваемая деталь достигнет пределов LR, хотя опыт работы показывает что за редким исключением, детали достигают пределов LA за время больше, чем 12000 ч работы.

Таким образом в данном двигателе использовано разумное сочетание системы ППР с системой диагностики основных пар трения.

В инструкции по обслуживанию этого двигателя предусмотрены бланки для регистрации измерений износов (см. рис. 4-6). Они позволяют выполнять графический анализ изменения износа и прогнозировать остаточный ресурс детали (рис. 4-7).

Следует еще обратить внимание на подробное и иллюстрированное описание конструкции двигателя и всех операций по монтажу—демонтажу узлов, по измерениям размеров и прочим действиям механиков.

Создание такой документации представляет собой не простую задачу для дизелестроительной фирмы. Требуется организация и проведение специальных длительных ресурсных стендовых испытаний и расчетных исследований. Не меньшую роль в том процессе играет сбор и обработка информации об износах при эксплуатации и ремонтах. Отдельную задачу представляет сбор, накопление и обработка информации о внезапных отказах и других недостатках машины. Этим обычно занимаются службы надежности проектных организаций или конструкторские бюро судовладельцев. В последнем случае работа связана с корректировкой нормативов ремонта с учетом специальных условий эксплуатации, которые отличаются от стандартных условий.

Исходя из приведенных примеров можно сформулировать следующие задачи в области повышения безотказности и долговечности машин:

— Сбор, накопление и обработка информации об отказах и других дефектах при эксплуатации техники (оценка показателей безотказности).

— Сбор, накопление и обработка информации о ремонтах и технических обслуживаниях для корректировки нормативов ремонта (оценка общих показателей долговечности). Оценка показателей долговечности и прочности элементов машин для повышения их надежности или корректировки срока ремонта.

— Диагностирование состояния и оценка остаточных ресурсов элементов машин (Мониторинг).

Следующие разделы этой главы будут посвящены этим проблемам.



2 ПЕРЕЧЕНЬ СТАНДАРТНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Этот перечень состоит из приспособлений рынка, которые необходимые для разборки винтов, гаек, соединений, стопорных колец, шплинтов, встречающихся во время операций обслуживания.

Перечень специальных приспособлений упоминается в каждой главе инструкции.

Двойные вильчатые ключи /NF.E 74302/: Реф.70 SAM
7 x 8, 10 x 11, 12 x 14, 13 x 17, 19 x 22, 21 x 23,
24 x 27, 26 x 29, 30 x 32, 32 x 35, 36 x 41, 38 x 42,
46 x 50, 54 x 58.

Простые вильчатые ключи /NF.E 74301/: Реф.69 SAM
5,5 - 60 - 63 - 71 - 80 - 82 - 85 - 105

Гильзы стандартной серии 1/2" SAM
S 17 - S 19 - S 22 - S 24 - S 27 - S 32

Ключ с собачкой стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 151

Маленький удлинитель стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 210

Большой удлинитель стандартной серии 1/2" SAM Реф.: S 215

Ключи для шестигранных впадин NF.E 74331
6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 17 - 24

Отвертка 1,5 шириной 7 NF.E 74351

Отвертка 2,5 шириной 14 NF.E 74351

Супердлинные толкатели шплинтов SAM Реф.7-35
SAM Реф.7-70

Нелци для внутренних стопорных колец FACOM Реф.179-14
FACOM Реф.179-23

Нелци для наружных стопорных колец FACOM Реф.177-14
FACOM Реф.177-18

Гильза серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 32

Маленький удлинитель серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 210

Скользкая ручка серии грузовик 3/4" SAM Реф.С 120

Многоугольный ударный ключ 63 SAM Реф. 108

Рекомендуется тоже достать все нижеуказанные продукты
- Прибор для обнаружения раковин дефектоскопией - смазка
для подшипников - смазка с молибденовым дисульфидом -
паста для прокладок - контрольные материалы и продукты
герметичности по приложениям 27 и 28 - продукты очистки и
краски по приложениям 25 и 26 - нервущая бумага толщиной
в 0,5-2мм - несмазываемые этикетки для определения деталей -
диэлектрическая лента - тефлоновая лента.

Рисунок 4-1 Лист с перечнем необходимых инструментов

6 СВОДНАЯ ТАБЛИЦА МОМЕНТОВ ЗАЖИМА БЕЗ МОЛИКОТА

№ группа	НАИМЕНОВАНИЕ	СПОСОБ ЗАЖИМА		ЗАМЕЧАНИЯ
		МОМЕНТ в мдаН	УДЛИНЕНИЕ в мм	
1	<u>РАМОВЫЙ ПОДШИПНИК</u> - тяга в остове	180		3 человека на расстоянии 1 метра 140-190мм вращения фланца после приставки гайки с шпинделем 250 мм Давление 700 бар
	- гайка тяги /гидравлическ.зажим/		0,7-0,85	
	- боковой инт	320		Максим.давл.840 бар
	- винт домкрата крышки/гидрозажим/	-		
3	<u>ШАТУН</u> - гайка болта шатуна	-	0,3-0,4	Избегать зажим только по реперам
5	<u>ПОРШЕНЬ</u> - блокировка штифтов в головке	8	-	Нанесение пасты Моликот "G" Зажать поочередно 2 раза на 11м даН до окончательн.зажима 11 м даН
	- гайки болтов крепления головка-юбка	11		
8	<u>РАБОЧИЙ ЦИЛИНДР</u> - блокировка тяг в остове	120	-	2 человека на 1 м 300 ⁰ Давление 900 бар.
	- зажим гаек крышки цилиндра	-	-	
	- гидрозажим гаек крышки цилиндра	-	-	
10	<u>КРЫШКА ЦИЛИНДРА</u> - блокировка штифтов крепления на крышке цилиндра :			
	• выхлопных клапанов	12	-	
	• тяг коромысел Ø 24	15	-	
	• Ø 16	6	-	
	• предохранительных клапанов	8	-	
• запусковых клапанов	8	-		

Рисунок 4-2 Один из листов с усилиями затяжки резьбовых соединений



Глава	Рис.	НАИМЕНОВАНИЕ	Вес в кг
5 /продолж/	II	Кулачок впускной : реверсивн.двигатели	11
		Кулачок выхлопной : реверсивн.двигатели	11,35
		Кулачок топливный : реверсивн.двигатели	13,6
	I	Кулачок впускной : не реверсивн.двигатели	5,5
Кулачок выхлопной : не реверсивн.двигатели		5,6	
Кулачок топливный : не реверсивн.двигатели		12,1	
IV	Привод топливного насоса и подшипник распределителя	72	
6	I	Первичное колесо	240
		Промежуточное колесо	96
		Промежуточная шестерня	35
		Промежуточная ось	32
		Колесо на кулачковом валу	82
II III IV	Узел	350	
III	Нартер	181	
7	I	Клапан главный /узел/	36
	III	Распределитель	31
8	I	Турбовоздуходувка VTR 400	1000
		Турбовоздуходувка VTR 401	1500
	I	Охладитель для 12 и 14 цилиндров	660
		Охладитель для 16 и 18 цилиндров	930
	II	Патрубок впускного коллектора	-
III	Патрубок выхлопного коллектора	-	
9	-	Реверсирование /узел/	600
10	II	Привод регулятора /узел/	72
	VI	Предельный выключатель /узел/	8
11	II	Водяной насос с валом и шестерней	200
	III	Масляный насос /с шестерней/ реверс.двиг.	415
		Масляный насос /с шестерней/ не реверс.двиг.	300
	IV	Топливоподкачивающий насос	
		- СЕМТ реверсивные двигатели	31,6
	V	- СЕМТ не реверсивные двигатели	29
		- ЛЕЙСТРИЦ* бронзовый реверсивныйе двиг.	47
" бронзовый не реверс.двиг.		32	
" чугунный реверсивные двиг.		42	
" чугунный не реверс.двиг.	27		

*Вес одного насоса

Рисунок 4-3 Данные о массах основных деталей при ремонте

5 ТАБЛИЦА ВРЕМЕН ДЛЯ МОНТАЖА

Время каждой нижеуказанной операции нуждается в хорошем доступе к двигателю, в применении спец-инструментов и квалифицированном персонале. Времена операций, отмеченных X считаются с рабочего состояния двигателя.

	Разборка и сборка 2-х. выхл. клапанов /крышка цил.на месте/ X			Глава 3
	Разборка и сборка одной форсунки X			Глава 4
	Разборка и сборка 2-х впускн. клапанов /крышка цил. на месте/			Глава 3
	Разборка и сборка крышки цилиндра X			Глава 3
	Разборка и сборка топливного насоса X			Глава 1
	Разборка и сборка вкладыша упорного подшипника /поршень, шатун и противовес на месте/X			Глава 1
	Очистка и замер износа одной втулки			Глава 2
	Смена узла втулка-рубашка /крышка цилиндра и поршень сняты/			Глава 2
	Разборка и сборка поршня с шатуном /крышка цил. снята/			Глава 2
Разборка и сборка вкладыша упорного подшипника /поршень и шатун на месте/ X			Глава 2	

Рисунок 4-4 Данные о трудоемкости сборочных работ

3. ТАБЛИЦА ЗАЗОРОВ И ИЗНОСОВ

Обозначение размеров LA и LR :

 LA = допустимый предел в зависимости от календаря обслуживания
 LR = крайний предел действия : исправление или немедленный брак

Между LA и LR деталь может еще работать но может выйти за LR до следующего осмотра.

Потребитель решает заменить детали в зависимости от рабочих условий, цены, доступности и промежутка между осмотрами.

Все величины в мм.

Глава	НАИМЕНОВАНИЕ	LA	LR
1	Вкладыши подшипника: исчезновение слоя олово-свинца на больше 2/3 площади Продольный зазор/подшипник установки	.	0,4
2	Вкладыши шатуна: исчезновение слоя олово-свинца на больше 2/3 площади Уплотнительн. кольцо : зазор в канавке зазор у стыка 1ое компресс. кольцо : зазор в канавке зазор у стыка Маслосъемные кольца : зазор у стыка ∅ внутр. втулки стойки шатуна ∅ расточки выемок пальца поршня ∅ расточки втулок на 140мм от верхнего борта Максимальн. овальность втулок	0,35 3,2 0,35 3,1 2,7 170,45 170,07 - -	- - - - - 170,50 170,10 402 0,2
3	Регулировка пусков. зазора клапанов: 1мм Нижние направляющие клапана Верхние направляющие клапана Стержни клапана Втулки пальцев впускн. коромысел Пальцы впускных коромысел Втулки выхлопных коромысел Ось выхлопных коромысел	24,35 24,30 - 60,15 59,95 70,12 70	24,50 24,45 23,70 60,20 59,90 70,20 69,90
5	∅ расточки направляющ. коробок и гильз ∅ наружный направляющих роликов Зазор роликов на их оси/без разборки/	90,15 89,85 0,5	90,25 89,75 -
6	Зазоры зубьев шестерен распределения	0,45	0,60
11	Зубчатый вал топливоподкачивающего насоса Втулки и расточка свободн. шестерни Ось свободной шестерни	21,940 22,025 21,90	21,920 22,040 21,85

Рисунок 4-5 Допустимые износы и зазоры



WEAR MEASUREMENT SHEET

of the two first piston rings and the two scrapers rings
(by mesure of the gap clearance)

1
1/2

INSTALLATION :

DATE :

ENGINE N° :

Total running hours :

Running hours since the last inspection :

DIMENSIONS IN 0.01 mm



RADIAL WEAR CALCULATION (TW)

$TW = \frac{A - B}{6.3}$ for vertical gap

$TW = \frac{(C - D) \cdot 14}{6.3}$ for inclined gap

* Cross out what does not apply

The gap clearance measure is made with the tool described in the overhaul manual

MAXIMUM GAP CLEARANCE AS NEW IN mm

ENGINE TYPE	Top ring		2 nd ring		Scrapers rings	
	B	D	B	D	B	D
PA_6	2,5		1,3		1,3	
PC2_ PC2,5	2,4		2,1		2,1	
PC3	2,7		2,5	1,9	2,5	
PC4	3,1		3,1		3,1	

Cyl N°	Running hours	TOP RING		2 nd RING		1 st scraper ring		2 nd scraper ring		REMARKS
		A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	A or C*	TW/1000h	
A 1										
A 2										
A 3										
A 4										
A 5										
A 6										
A 7										
A 8										
A 9										
A 10										
B 1										
B 2										
B 3										
B 4										
B 5										
B 6										
B 7										
B 8										
B 9										
B 10										
Total and radial wear average in mm/1000h										

Рисунок 4-6. Бланк для измерений износа колец

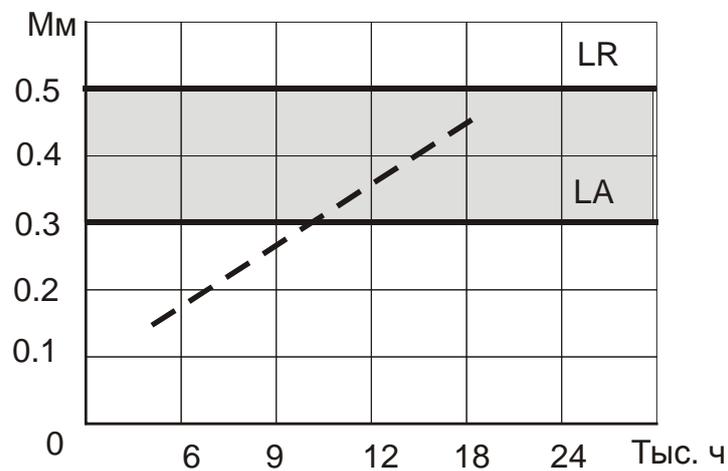


Рисунок 4-7 Графический анализ износа

4.2. Организационные вопросы

Организация сбора информации о надежности на объектах конечного использования, например, на судах, представляет собой весьма сложную проблему. Опыт организации работ по сбору информации на флоте рыбной промышленности (1970 — 1983 г.) показал, что задачи, связанные с надежностью, невозможно решить с помощью лишь одной системы. Для оперативного выявления и устранения причин конструктивных недостатков оборудования очень важны своевременность и достоверность сообщения о каждом наиболее опасном отказе или недостатке. Наиболее доступным этапом решения указанной задачи можно считать гарантийный период эксплуатации. Получив рекламационный акт, поставщик оборудования может оценить технические причины отказа и на этом основании принять те или иные меры по их предотвращению в будущем.

Однако разовые сообщения об отказах в гарантийный период малопригодны для решения основной задачи в области надежности — оценки ее уровня с помощью показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности. Это вызвано тем, что при такой системе сообщаются наработки только отказавших объектов, а об объектах, которые не отказали (а таких значительно больше), сведения отсутствуют. Кроме того, донесения об отказах не позволяют определить наработки до ремонтов и технического обслуживания.

Следовательно, система сбора информации, основанная на донесениях об отдельных отказах, не позволяет получить все исходные данные для расчета показателей надежности. Поэтому наряду с указанной рекомендуется можно предложить систему сбора более полной информации с ограниченного числа судов (обычно 6 — 8) силами их экипажей и служб надежности отрасли. При этом используется два основных источника информации — эксплуатационная и ремонтная документацию.

Для накопления исходной информации об отказах в период эксплуатации на промысловом флоте в 70 — 80 годах прошлого века службы надежности судовладельцев промыслового флота применяли бланки так называемых рейсовых отчетов. В них экипаж подконтрольных судов или специалисты служб надежности фиксировали сведения о наработках каждого изделия за рейс и с начала

эксплуатации, число отказов, время простоя и трудоемкость восстановления после отказов, описывали отказы и способы восстановления изделий, а также указывали расход запасных частей. Рейсовые отчеты после окончания рейсов поступали в службы надежности и обрабатывались по специальной методике. Данные рейсовых отчетов позволяют сравнительно легко определить наработку на отказ, коэффициент готовности, удельную трудоемкость восстановления и расход ЗИП за отчетный год. По этим данным составлялись ежегодные отчеты об эксплуатационных качествах серийных судов данного типа, которые направлялись в головную организацию отрасли (ГИПРОРЫБФЛОТ) для разработки совместных решений с поставщиками судовой техники об устранении обнаруженных недостатков. Кроме того результаты анализа надежности с помощью информации, получаемой по второй системе, позволяют оценивать качество изделий судовой техники в процессе государственной аттестации, выбирать лучшее оборудование при комплектации судов на стадии проектирования и разрабатывать требования по надежности.

Однако и вторая система не решает всех проблем в области надежности судовой техники, поскольку остаются неизученными показатели надежности элементов изделий. Между тем без информации о потенциальных отказах (повреждениях) деталей и узлов практически невозможно грамотно обосновывать нормы межремонтных периодов, объемов ремонта и расхода сменно-запасных частей, а также определять причины низкой надежности и разрабатывать мероприятия по повышению долговечности и безотказности судовой техники.

Для решения этих задач необходимо использовать третью систему сбора информации — путем дефектации и изучения износов подконтрольных механизмов силами специалистов служб надежности и ремонтных предприятий. При этом число подконтрольных механизмов обычно не превышает 6 — 8, но качество первичной информации значительно выше, чем при второй системе, поскольку она собирается по строгим правилам дефектации и измерения деталей специально подготовленными специалистами.

Остановимся главным образом на второй и третьей системах сбора информации и определения с их помощью фактических показателей надежности.

4.3. Оценка безотказности техники

Основными показателями, характеризующими фактический уровень безотказности любого изделия, ремонтируемого по системе ППР, являются наработка на отказ t_o , коэффициент готовности K_g и удельная трудоемкость восстановления W_o . Для оценки безотказности по конкретному виду отказов используется вероятность безотказной работы $P(t)$.

Все эти показатели рассчитываются только применительно к фактическим отказам, которые приводят к внеплановым простоям изделия.

Расчет этих показателей основан на эргодической гипотезе и выполняется при вполне корректном допущении о соответствии распределения потока отказов экспоненциальному закону. Это допущение позволяет значительно упростить методику сбора и обработки информации о фактических отказах, так как отпадает необходимость совмещения начала отсчета наработки всех отказавших изделий. Поэтому для получения выборки отказов приемлемого объема уже не

требуются данные многолетних наблюдений, что повышает эффективность и целесообразность исследования надежности.

При этом в интервал времени (чаще всего равный одному году) включаются все изделия, которые находились под наблюдением, независимо от их возраста. Рассмотрим преимущества такого подхода. Прежде всего, появляется возможность определять показатели в первый же год эксплуатации, используя для этого информацию обо всех объектах. Не менее важное значение имеет возможность наблюдать за тем, как изменяется уровень надежности из года в год под влиянием мероприятий по устранению недостатков. При использовании указанного принципа упрощается форма сбора и обработки информации. Отпадает необходимость регистрации наработки до отказа. Достаточно для каждого вида отказов у i -го изделия в период наблюдения определять: суммарную наработку за отчетный период t_i , ч; суммарное число отказов n_i ; суммарное время восстановления τ_i , ч; суммарную трудоемкость восстановления W_i , чел.-ч.

Таблица 4.1

Формулы для расчета показателя надежности

Показатели	Формула
Наработка на отказ, ч	$t_o = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$
Вероятность безотказной работы за время, равное назначенному ресурсу	$P(t) = \exp(-t/t_o)$
Коэффициент готовности	$K_g = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\left(\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right)}$
Удельная трудоемкость восстановления работоспособности, чел.-ч/тыс.ч	$w = \frac{\sum_{i=1}^N W_i}{\sum_{i=1}^N t_i}$

На флоте рыбной промышленности составленные таким образом рейсовые донесения поступают в службу надежности судовладельца или отрасли, где они накапливаются, систематизируются и обрабатываются с помощью формул, приведенных в табл. 4.1. Расчет выполняется для числа изделий N . Расчет удобно вести в табличной форме, приведенной в таблице на рис. 4-8, где дан пример определения показателей надежности главных двигателей крупнотоннажного траулера.

В этом случае рассматриваются два подконтрольных двигателя при суммарной наработке 7620 ч и назначенном ресурсе непрерывной работы 600 ч.

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 (заклинивание).

Элемент изделия	Причина отказа	Способ восстановления	n	τ, ч	W, чел.-ч	t ₀ , ч	P (t)	K _Г	ω ₀ чел.-ч/тыс.ч
Насосы высокого давления: трубопровод нагнетательные клапаны плунжерные пары топливные трубки Распылители форсунок Масляный холодильник Холодильник пресной воды Регулятор типа Р6А-16 Шестерня привода регулятора Шестерня привода распределительного вала Упорное кольцо крепления кулака топливных насосов	Разрушения по сварке	Заварка или замена	10	27	43	762	0,455	0,9965	5,640
	Обрыв обратного клапана	Замена	3	8	7	2540	0,790	0,9990	0,920
	Заклинивание	Замена	10	32	32	762	0,455	0,9958	4,200
	Течь	Замена	5	12	18	1524	0,675	0,9984	2,360
	Зависание иглы	Замена	3	6	7	2540	0,790	0,9992	0,920
	Течь, трещины	Заглушение	3	28	44	2540	0,790	0,9970	5,770
	Течь	Заглушение	3	38	69	2540	0,790	0,9950	9,055
	Выход из строя	Замена	1	2	4	7620	0,924	0,9997	0,520
	Раковины и пitting на зубьях	Ремонт на заводе	1	6	15	7620	0,924	0,9992	1,970
	Срезание болтов и шпилек	Ремонт на заводе	1	30	87	7620	0,924	0,9960	11,410
Разрушение	Ремонт на заводе	1	500	987	7620	0,924	0,9580	129,530	
Итого:	по всем отказам по топливной аппаратуре		41	684	1313	185,8	0,040	0,9170	172,310
			31	85	—	245,8	0,087	0,9890	14,040

Рисунок 4-8. Копия таблицы с показателями безотказности топливной аппаратуры

В этом случае $n = 10$, $\tau = 32$ ч, $W = 33$ чел.-ч. Используя эти данные и формулы из табл. 4.1, нетрудно определить

$$t_o = 7620/10 = 762 \text{ ч},$$

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

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

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

Аналогично вычисляются показатели по остальным видам отказов.

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, а затем вычислить те же показатели для группы отказов. Результаты вычисления даны в нижней строке таблицы.

Оценка уровня безотказности при эксплуатации изделий и систем заключается в оценке коэффициента готовности. При этом допустимые значения коэффициентов готовности можно выбирать по рекомендациям п. 1.5.2. Располагая допустимым значением коэффициента готовности, можно оценить уровень надежности изделия. В рассматриваемом случае надежность главных двигателей оказалась весьма низкой, поскольку $K_z = 0.917 < K_{дон} = 0.997$.

Рассмотрение табличных значений K_z для отказов разных видов позволяет установить, какие из них являются причиной снижения надежности изделия в целом. 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.

4.4. Оценка долговечности и ремонтпригодности техники

Напомним, что основными показателями долговечности машин в целом (т.е. при рассмотрении их как единое целое без деления на элементы) являются назначенные ресурсы до основных видов ремонта и ТО, входящие в систему ППР. В разделе 4-1 был приведен пример использования этого показателя в документации по обслуживанию судового дизеля. Для судов в целом вместо назначенного ресурса до ремонта используется родственный показатель — срок службы до ремонта или ТО соответствующего вида.

Рассмотрим более подробно систему ППР судна в целом, ремонтный цикл которого содержит следующие виды ремонтов: капитальный (КР), средний (СР), расширенное межрейсовое техническое обслуживание (РМРТО), межрейсовое техническое обслуживание (МРТО).

Для этих видов ремонтов по основным типам судов флота рыбной промышленности были разработаны нормативы продолжительности ремонтов и их сметная трудоемкость. Кроме того для каждого типа судна в нормативах приводится так называемый код ремонтного цикла, состоящий из четырех цифр, например, **1 1 6 8**.

Первая цифра означает количество капитальных ремонтов в цикле (1),
 Вторая цифра означает количество средних ремонтов в цикле (1),
 Третья цифра означает количество РМРТО в цикле (т.е. 6),
 Четвертая цифра означает количество МРТО в цикле (т.е. 8).

Код ремонтного цикла позволяет определить сроки службы до каждого вида ремонта и ТО по графику ремонтного цикла, который приведен на верхней части рисунка. Сроки службы T_y до каждого вида ремонта или ТО судна можно также рассчитать по формуле

$$T_y = \frac{T_u}{\sum_1^y n_i}, \quad (4.1)$$

где y — номер вида ремонта в коде ремонта, для которого определяется T_y , T_u — продолжительность ремонтного цикла, n_i — количество ремонтов в цикле каждого i -го вида для $i \leq y$. Например:

для капитального ремонта $T_y = 8/1=8$,
 для среднего ремонта $T_y = 8/(1+1)=4$,
 для РМРТО $T_y = 8/(1+1+6)=1$,
 для МРТО $T_y = 8/(1+1+6+8)=0.5$.

Отметим, что обычно средний и капитальный ремонты являются заводскими, т.е. выполняются на судоремонтном предприятии с целью восстановления класса Регистра. При этом в их состав входят работы по ремонту или ТО более низкого ранга. Остальные ремонты, как правило, выполняются на базах технического обслуживания судовладельцев или на других ремонтных предприятиях (в том числе и за рубежом) и связаны с подтверждением класса Регистра для отдельных элементов судна. Объем ремонта каждого вида (т.е. его трудоемкость и стоимость) можно определить на основании совмещения ремонтных циклов судна и отдельных его элементов (судовых технических средств). При этом названия видов ремонта могут и не совпадать друг с другом, но должен быть соблюден принцип кратности ремонтов и ТО.

В табл. 4.2 приведены результаты оценки средних ресурсов и трудоемкостей для ремонтов одного из элементов судна первого класса — гребного устройства. Расчеты выполнены без построения законов распределение путем прямого расчета математического ожидания с оценкой доверительных границ по программе "PPV ТСНК» (фрагмент 2.6).

Таблица 4.2

Средняя периодичность ремонтов гребного устройства судна

Вид ремонта или ТО	Средний ресурс, тыс.ч	Средняя трудоемкость, чел.-ч	Средняя продолжительность, ч	Число ремонтов до списания
КР (на СРЗ)	28.1 ± 5.8	3206 ± 250	—	4.63
СР (на БТО)	13.2 ± 2.8	545 ± 88	—	5.22
ТО—3 (док)	6.7 ± 0.8	122 ± 23	—	9.55
ТО—2	3.45 ± 0.5	32 ± 6	—	18.28
ТО-1 (на судне)	0.66 ± 0.1	7.2 ± 1.2	2.5 ± 0.3	159.3

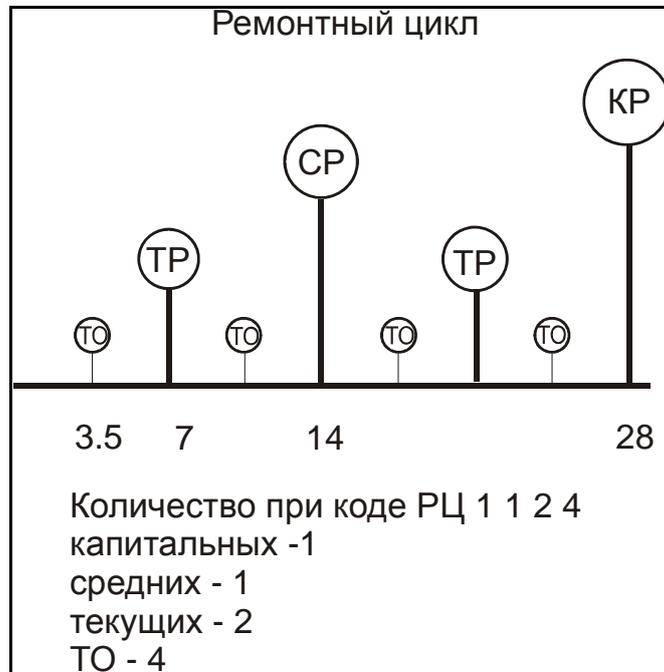


Рисунок 4-9

Расчет числа ремонтов по статистическим данным

Число видов ремонтов $i := 1..5$ исходные данные из книги $t_i :=$

Формула для расчета числа ремонтов за один ремонтный цикл 28.1

$$z_i := \begin{cases} 1 & \text{if } i = 1 \\ \left(\left(\frac{t_1}{t_i} - \sum_{i=1}^i z_{i-1} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$
13.2
6.7
3.45
0.66

Условный ресурс гребного устройства до списания $R_s := 130$ тыс.ч

Коэффициент пересчета $R_{сч} := \frac{R_s}{t_1}$ $R_{сч} = 4.626$

Число ремонтов в цикле Число ремонтов за 130 тыс.ч

$z_1 =$
1
1.129
2.065
3.951
34.431

$R_{сч} \cdot z_1 =$
4.63
5.22
9.55
18.28
159.29

Фрагмент 4-1

Оценка Кти ремонтного цикла

Ввод исходных данных Ремонтный цикл $T_K := 28$ тыс. ч.

Относительная норма времени ремонта
(во сколько раз время капитального ремонта
меньше его периодичности) $\eta := 10$

Коэффициент влияния вида ремонта $\mu := 2$

Виды ремонта $k := 5$ $j := 1..k$ Продолжительность
капитального ремонта $\tau_K(\eta) := \frac{T_K}{\eta}$

Ввести количество ремонтов (по коду) $n_j :=$

По введенным выше исходным данным вычисляется
периодичность T_j и продолжительность ремонтов τ_j

1	$\tau_K(\eta) = 2.8$
1	
2	
4	
32	

$$T_j := \frac{T_K}{\sum_{j=1}^k n_j} \quad \tau(\eta, \mu, j) := \begin{cases} \tau_K(\eta) & \text{if } j = 1 \\ \frac{\tau_K(\eta)}{2 \cdot (n_j)^\mu} & \text{otherwise} \end{cases}$$

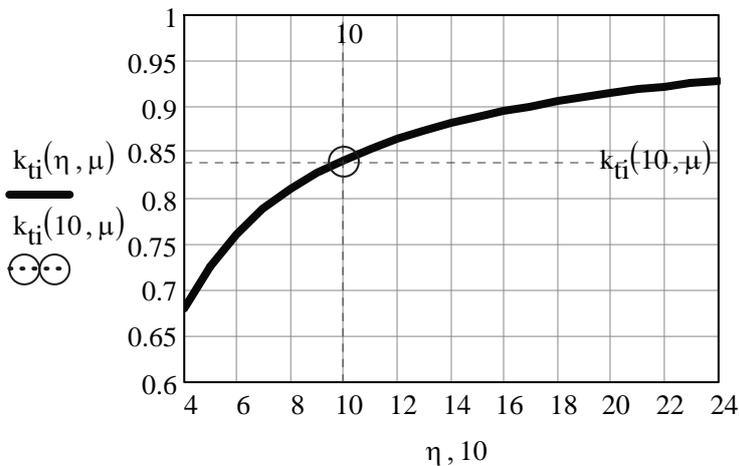
$T_j =$	$\tau(\eta, \mu, j) =$
28	2.8
14	1.4
7	0.35
3.5	0.088
0.7	$1.367 \cdot 10^{-3}$

коэффициент
технического
использования Кти

$$k_{ti}(\eta, \mu) := \frac{T_K}{T_K + \sum_{j=1}^k (n_j \cdot \tau(\eta, \mu, j))}$$

$k_{ti}(\eta, \mu) = 0.841$

$\eta := 4..24$



Для рассматриваемого
кода ремонтного цикла и
величины η Кти можно
оценить по этому графику

Фрагмент 4-2

В последнем столбце этой таблицы подсчитано условное число ремонтов каждого вида за ресурс объекта до списания 130 тыс. ч. При этом расчет по новой методике показанный на фрагменте 4-1, полностью совпал с данными копии табл. 4.2.

Комплексная оценка ремонтного цикла производится по коэффициенту технического использования.

$$K_{ми} = \frac{T_{эц}}{T_{эц} + \sum_1^{yr} \tau_y n_y}, \quad (4.2)$$

где $T_{эц}$ — суммарное эксплуатационное время за цикл, $\sum_1^{yr} \tau_y n_y$ — суммарное время простоев в плановых ремонтах за цикл.

На фрагменте 4-2 приведена оригинальная программа расчета и анализа этого показателя. Рассмотрен пример, соответствующий исходным данным табл. 4.2 и коду ремонтного цикла 1124, приведенному на схеме рис. 4-9.

Следует признать, что рассмотренные в табл. 4.2 средние показатели долговечности машины в большей мере отражают организацию плановых ремонтов судна, не фактическую надежность его элементов. Этого недостатка лишена методика корректировки нормативов сроков и объемов ремонта на основе оценки гамма - процентных ресурсов элементов машин для каждого i - го вида повреждения с учетом степени опасности соответствующего деградационного процесса на основании принципа одинаковых последствий (п. 1.2.12). В этой методике назначенный ресурс до ремонта определяется путем сравнения между собой гамма - процентных ресурсов для каждого деградационного процесса и выбора среди них наименьшего значения. При этом, учитывая вероятностную природу процессов деградации узлов, назначенные ресурсы допускается корректировать в пределах ± 20 % относительно фирменных нормативов ремонтного цикла с учетом их наработки за межремонтные периоды эксплуатации объекта конечного использования (например, судна).

Методика и программы оценки гамма-процентных ресурсов подробно рассматриваются в следующей главе.

5. Оценка долговечности узлов трения машины

5.1. Вероятностное моделирование ресурса

В предыдущей четвертой главе, мы показали возможность формирования и корректировки ремонтных циклов машин по мере накопления информации о фактических сроках их службы между ремонтами по методике табл. 4.2 и фрагмента 4-1. Однако при таком способе на фактические сроки ремонтов значительное влияние оказывают организационные факторы, а не надежность техники. Рассматриваемая в этой монографии методология позволяет определять приведенные выше показатели долговечности и ремонтпригодности машин в целом более корректно, с помощью вероятностных показателей надежности ее деталей и узлов для каждого i -го вида повреждения с учетом степени опасности соответствующего деградационного процесса.

Напомним, что к таким показателям относятся гамма - процентный ресурс $R(\gamma)$, определяемый для каждого i -го деградационного процесса с помощью соответствующего закона распределения вероятности $\gamma(t)$ и допустимой величины γ_{don} . Величина γ_{don} выбирается в зависимости от последствий потенциального отказа. Например, для износных повреждений $\gamma_{don} = 0.8$, для усталостных разрушений типа трещин — $\gamma_{don} = 0.95$, для питтинговых разрушений поверхности зубчатых зацеплений — $\gamma_{don} = 0.90$ и т.д.

С помощью закона распределения $\gamma(t)$ можно определить такой важный показатель, как вероятность обнаружения дефекта i -го вида $\varphi(t)$ за наработку t .

$$\varphi(t) = 1 - \gamma(t). \quad (5.1)$$

Если функции $\gamma(t)$ для основных видов повреждений деталей и узлов известны, то возникает естественный вопрос: как с их помощью рассчитать общий (назначенный) ресурс машины в целом до соответствующего вида ремонта R_n ?

Корректно решить эту задачу удастся на основании принципа одинаковых последствий (п. 1.2.12). В нашей методике назначенный ресурс до ремонта R_n определяется путем сравнения между собой гамма - процентных ресурсов для каждого деградационного процесса и выбора среди них наименьшего значения.

На практике элементы машин разбиваются на группы по видам ремонта на основании опыта проектирования и эксплуатации (см. раздел 1.3). Поскольку ремонтные циклы уже регламентированы заводом—поставщиком, то для изделий 1 и 2 классов назначенные ресурсы допускается корректировать в пределах 20 % с учетом их наработки за межремонтные периоды эксплуатации судна.

Полученные функции $\varphi(t)$ можно использовать для уточнения перечня работ и трудоемкости ремонта с помощью вероятностей обнаружения дефекта каждого i -го вида $\varphi(T)$ за наработку $T = 2R_n$.

Очевидно, что в перечень ремонтных работ машины должны быть включены наиболее вероятные дефектовочные работы, для которых

$$\varphi(T) \geq \varphi_{don} = 1 - \gamma_{don}. \quad (5.2)$$

Зная перечень дефектовочных работ, можно затем оценить трудоемкости работ по дефектации, разборке — сборке механизмов и восстановлению деталей и, в итоге, рассчитать суммарную трудоемкость ремонта по нормам времени на отдельные технологические операции. Кроме того, через этот показатель могут быть определены или откорректированы нормы расхода запасных частей для каждого вида ремонта.

Таким образом мы вновь пришли к актуальности определения гарантированного ресурса элемента машины на основе вероятностных моделей отказов. Начинать эту работу целесообразно с выбора вероятностной модели надежности (в данном случае ее лучше назвать моделью долговечности) по рекомендациям главы 3. Учитывая общий характер поставленной задачи имеются все основания в качестве такой модели принять ВМ типа «Веер» (п. 3.1), которая в целом верно характеризует тренд изменения технического состояние любых объектов при их реальной эксплуатации. Это связано с влиянием большого количество случайных факторов на всех этапах жизненного цикла техники, что приводит увеличению дисперсии.

Исходя из этой ВМ (формула (3.3)), общее выражение для оценки гамма - процентного ресурса можно представить в следующем виде.

$$R(\gamma) = Jsr Hd / Kd(\gamma, V), \quad (5.3)$$

где Jsr — средняя износостойкость узла, V — коэффициент вариации износостойкости, Hd — предельно-допустимый износ, $Kd(\gamma, V)$ — коэффициент запаса долговечности при заданной вероятности γ , который определяется по формулам табл. 5.1.

Далее рассмотрим проблемы обеспечения долговечности узлов трения на основе анализа компонентов формулы (5.3).

5.2. Коэффициент запаса долговечности

Сперва уделим внимание коэффициенту запаса долговечности, который характеризует требования к вероятности не достижения предельного состояния (в зависимости от последствий потенциального отказа) и ожидаемому уровню стабильности качества изготовления и эксплуатации узла, который можно оценить величиной коэффициента вариации износостойкости V .

Формулы для расчета коэффициента запаса долговечности при заданной вероятности γ , даны в табл. 5.1.

Формулы для расчета запаса долговечности

Закон распределения	Формулы	№ формулы
Вейбулла	$Kd(\gamma, V) = \Gamma(1 + 1/b(V)) / \ln(1/\gamma)^{1/b(V)}$,	(5.4)
Логнормальный	$Kd(\gamma, V) = \exp[B(V) U(\gamma) + B(V)^2 / 2]$,	(5.5)
Нормальный	$Kd(\gamma, V) = 1 / [1 - V \cdot U(\gamma)]$.	(5.6)

В этой табл. 5.1 используются следующие обозначения.

$b(V)$ и $B(V)$ — параметры формы распределений Вейбулла и логнормального соответственно, $U(\gamma)$ — квантиль нормального распределения для заданной вероятности γ .

В данном случае решение принципиальных вопросов можно показать на примере закона Вейбулла (по формуле (5.4) в табл. 5.1), который, как уже говорилось, обладает наилучшими аппроксимирующими свойствами, а его важными вариантами являются такие законы распределения, как экспоненциальный при $b = 1$, Релея при $b = 2$ и даже нормальный (Гаусса) при $b = 3$ и более. Мы ограничимся двумя значениями ВНДПС $\gamma = 80\%$ и $\gamma = 90\%$, поскольку они обычно используются при изучении потенциальных отказов (повреждений) износостойкого типа. На фрагменте 5-1 приведены таблица и график расчета коэффициента запаса долговечности для указанных выше вариантов закона Вейбулла и ВНДПС.

В таблице этого фрагмента показано, что с увеличением коэффициента вариации возрастает и запас долговечности, который вводят в норматив износостойкости. При увеличении требуемого значения ВНДПС этот показатель так же возрастает. На практике данную закономерность можно использовать для нормирования износостойкости, а значит и ресурса, применительно к различным условиям эксплуатации и качеству изготовления машин. Например из расчета указанных показателей долговечности для тяжелых (экспоненциальный закон при $V = 1$), нормальных (закон Релея при $V = 0.523$) и легких (закон Гаусса при $V = 0.383$) условий эксплуатации при $\gamma = 80\%$ можно сделать следующие выводы.

По сравнению с нормальными условиями, тяжелые условия приводят к уменьшению норматива износостойкости и ресурса в $4.481/1.876 = 2.389$ раза, а переход к легким условиям дает увеличение ресурса в $1.876/1.472 = 1.274$ раза.

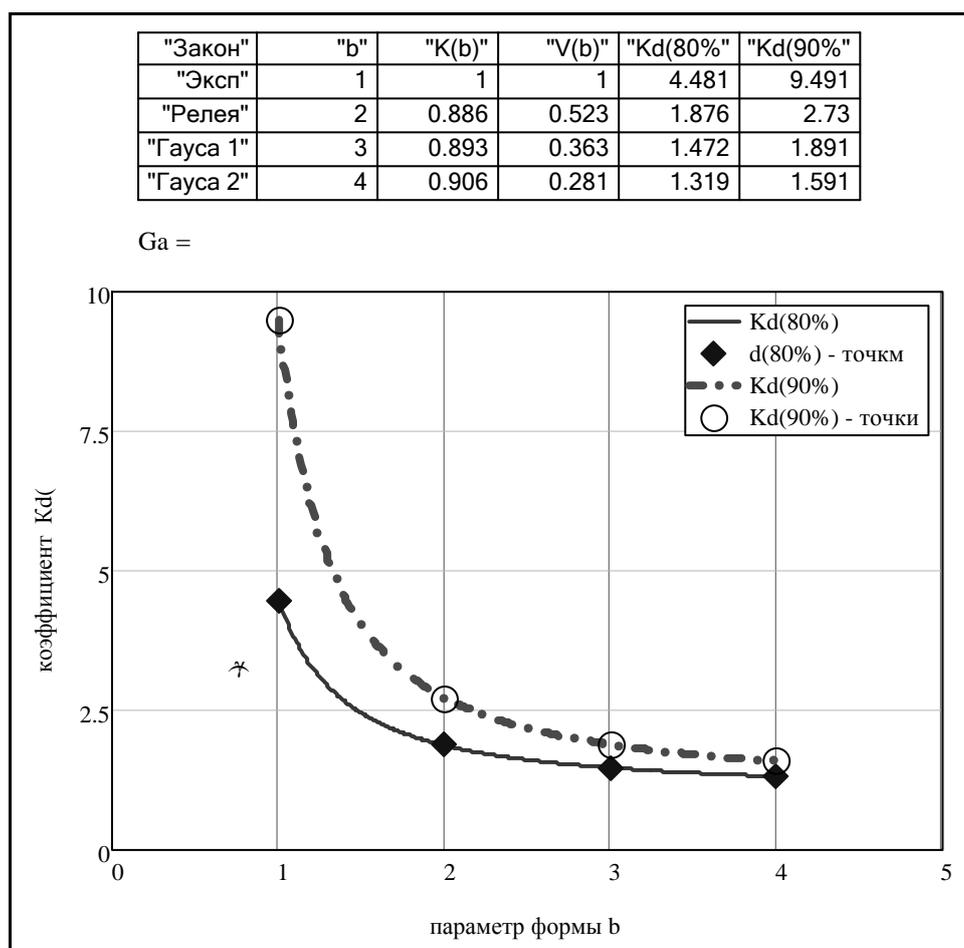
На фрагменте 5-1 показано табулированное и графическое сравнение коэффициентов запаса долговечности, рассчитанных по формулам для всех указанных в табл. 5.1 законов. Видно, что при больших дисперсиях ($V = 1$) закон Вейбулла дает заметно большие величины $Kd(\gamma, V)$. При этом нормальный закон вообще применять в данном случае недопустимо, ибо при больших ВНДПС функция (5.6) может принимать некорректные (даже отрицательные) значения (в районе и после разрыва функции — см. фрагмент 5-3).

При умеренных значениях (около 0.5) и тем более малых значениях коэффициента вариации получаем близкие по величине значения $Kd(\gamma, V)$ для всех законов. Пример влияния качества изнашиваемого элемента на его ресурс и износостойкость показан на фрагменте 5-4, где даны результаты моделирования по специальной программе тяжелых, нормальных, и легких условий с использованием различных вариантов показателя формы закона Вейбулла.

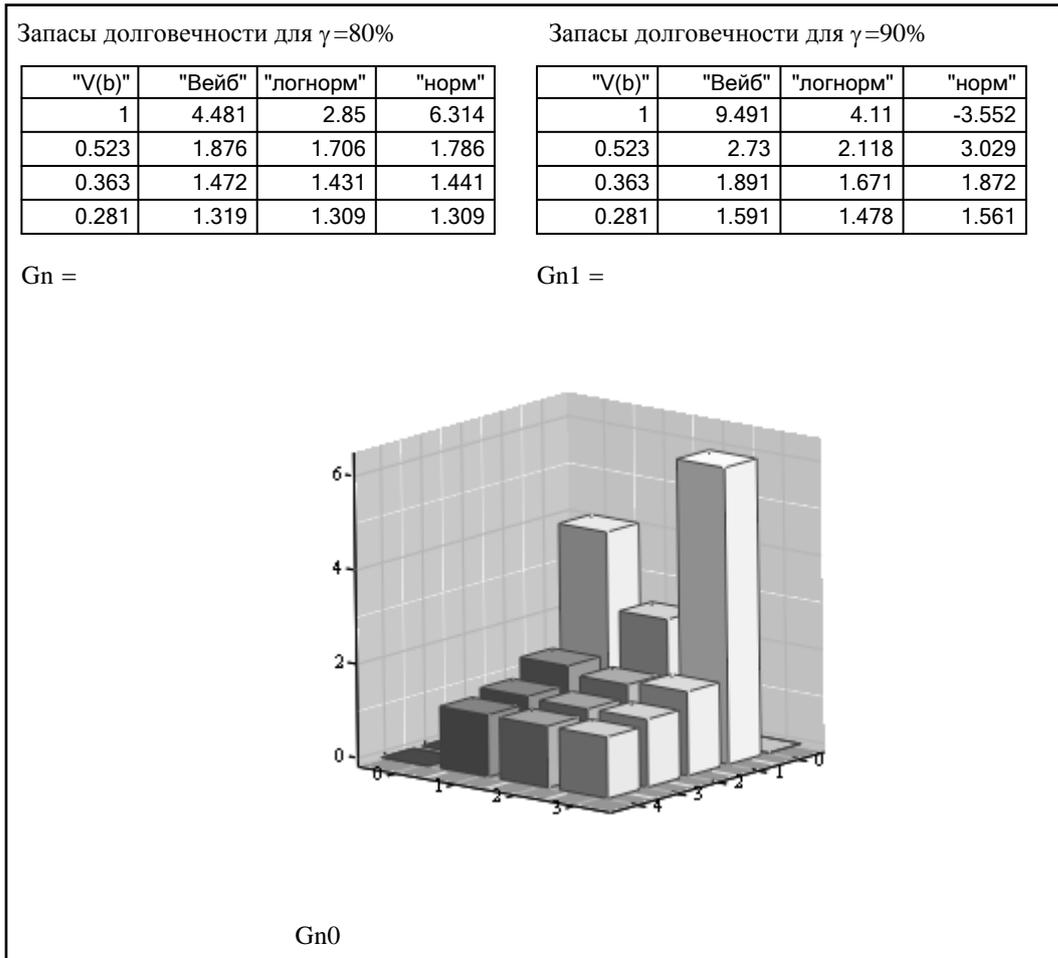
Для уменьшения требуемого запаса долговечности необходимо снижать общий коэффициент вариации износостойкости V , который включает в себя коэффициенты вариации производства $V_{пр}$, эксплуатации $V_{экс}$ и ремонта $V_{рем}$.

$$V = \sqrt{V_{пр}^2 + V_{экс}^2 + V_{рем}^2}. \quad (5.7)$$

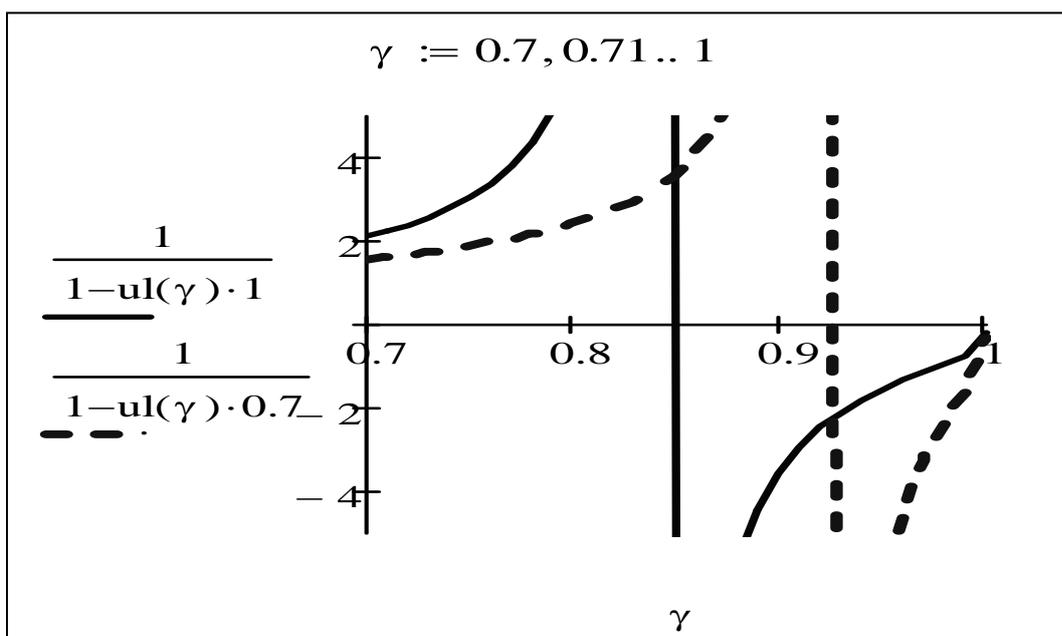
Все составляющие коэффициента вариации можно снижать только за счет повышения качества работ на всех этапах жизненного цикла объекта. В частности для производства и ремонта машин необходимо внедрять систему на основе стандарта ISO 9000. Это международный стандарт, который регламентирует основные положения управления процессом проверки качества, объединяет собой пять стандартов.



Фрагмент 5-1



Фрагмент 5-2



Фрагмент 5-3

"метод"	"b"	"a"	"Korr"	"Rsr"	"Var"	"f(R)"	"R(?)"	"Js(?)"	"Доп"
"МНК"	2.82	318.35	0.99	283.54	0.38	0.11	186.85	9342.67	7500
"ММ"	2.99	315.5	0.99	281.7	0.36	0.1	191.1	9555.05	7500
"Нов"	3.02	313.7	0.99	280.22	0.36	0.1	191	9550.09	7500

Итого1 =

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда условия = "легкие" , тогда гаммапроцентный ресурс $RVD(\gamma_d) = 191$, что больше норматива $Rr = 150$

"метод"	"b"	"a"	"Korr"	"Rsr"	"Var"	"f(R)"	"R(?)"	"Js(?)"	"Доп"
"МНК"	2.03	320.63	1	284.09	0.52	0.19	153.16	7658.01	7500
"ММ"	1.97	319.26	1	283.01	0.53	0.2	149.28	7463.91	7500
"Нов"	1.98	313.75	1	278.1	0.53	0.21	147.28	7364.16	7500

Итого1 =

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда условия = "нормальные" , тогда гаммапроцентный ресурс $RVD(\gamma_d) = 147.28$, что соответствует нормативу $Rr = 150$

"метод"	"b"	"a"	"Korr"	"Rsr"	"Var"	"f(R)"	"R(?)"	"Js(?)"	"Доп"
"МНК"	1.13	342.22	0.99	327.42	0.89	0.33	90.73	4536.45	7500
"ММ"	1	343.89	0.99	343.38	1	0.35	77.15	3857.28	7500
"Нов"	0.97	336.54	0.99	340.42	1.03	0.37	72.16	3608.09	7500

Итого1 =

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда условия = "тяжелые" , тогда гаммапроцентный ресурс $RVD(\gamma_d) = 72.16$, что меньше норматива $Rr = 150$

Фрагмент 5-4

ISO 9001 — Модель контроля качества в проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании

ISO 9002 — Модель контроля качества в области производства, монтажа и обслуживания

ISO 9003 — Модель для обеспечения качества при контроле и испытаниях готовой продукции

ISO 9000-1 — Общие руководства по выбору и использованию

ISO 9004-2 — Управление качеством и элементы системы качества .

Международная организация по стандартизации (IOS — International Organization for Standardization) расположена в Женеве (Швейцария). Свыше 90 стран используют этот стандарт, и многие из них присвоили стандарту национальные обозначения. После принятия Россией международного стандарта ISO 9001-94 последовало его превращение в отечественный ГОСТ Р ИСО 9001-96.

5.3. Предельно-допустимые износы

Основы оценки предельных состояний объектов были ранее рассмотрены в параграфе 1.4.7. В частности там было указано, что согласно ГОСТ 27.002-89, под предельным состоянием объекта понимается такое состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за нарушения требований безопасности, неустранимого выхода заданных параметров за установленные пределы, снижения эффективности эксплуатации ниже допустимого уровня, необходимости проведения среднего или капитального ремонта. При этом признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией. В дополнении к информации о методах оценки уровней предельного состояния целесообразно рассмотреть вероятностный подход определению предельно-допустимых износов.

Статистическая обработка эксплуатационных данных об износах деталей дизелей показала (см. табл. 3.1.), что их износостойкость характеризуется весьма большими коэффициентами вариации (0.4 — 0.7). Это позволяет положить в основу анализа предельно-допустимых износов самый простой вариант вероятностной модели типа «Веер».

В таком случае наработка до назначенного и критического уровня предельного состояния, а так же соответствующие им износостойкости узла трения должны подчиняться одному и тому же закону распределения.

При этом интегральную функцию распределения наработки до назначенного предельного износа $\gamma(t)$ можно назвать распределением долговечности, а интегральную функцию наработки до критического предельного состояния $P(t)$ — распределением безотказности.

Из сказанного следует, что распределения износостойкости, долговечности и безотказности должны иметь общий для них параметр формы b , который зависит от коэффициента вариации износостойкости.

Тогда параметры масштаба $a_{кр}$ и a_n для распределений безотказности $P(t)$ и долговечности $\gamma(t)$ можно определить с помощью параметра масштаба распределения износостойкости a_{Js} соответственно по формулам

$$\left. \begin{aligned} a_{кр} &= a_{Js} Hk \\ a_n &= a_{Js} Hd \end{aligned} \right\}, \quad (5.8)$$

где Hk и Hd - критический и назначенный уровень предельного состояния (в данном случае — предельного и предельно-допустимого износа). Статистическая обработка информации об износах деталей дизелей показала, что ресурсы и износостойкость Jsr и чаще всего подчиняется либо закону распределения Вейбулла, либо логнормальному распределению.

Напомним, что назначенные ресурсы для этих законов определяются по таким формулам. Для распределения Вейбулла

$$R(\gamma) = a_n \cdot \ln(1/\gamma)^{1/b} = a_{кр} \cdot \ln(1/P)^{1/b}, \quad (5.9)$$

а для логнормального распределения

$$R(\gamma) = a_n \cdot \exp(-U_\gamma \cdot b) = a_{кр} \cdot \exp(-U_p \cdot b), \quad (5.10)$$

где γ и P — заданные вероятности не достижения предельного состояния и безотказной работы, U_γ и U_p — квантили нормального распределения для тех же вероятностей.

С помощью формул (5.8)...(5.10) можно получить зависимости для расчета так называемых коэффициентов безотказности в вероятностном аспекте:

Для распределения Вейбулла имеем

$$K_{bp} = a_{кр} / a_n = Hk / Hd = [\ln(1/\gamma) / \ln(1/P)]^{1/b}, \quad (5.11)$$

а для логнормального распределения

$$K_{bp} = a_{кр} / a_n = Hk / Hd = \exp[(U_p - U_\gamma) b]. \quad (5.12)$$

Приведенные формулы позволяют решить более сложную задачу по определению критического уровня предельного состояния Hk , которая может определяться различными способами, например, путем исследования диагностических параметров и признаков отказов по мере искусственного увеличения износов (зазоров). Величину Hk можно также определить по данным дефектации деталей двигателей после их отказов в эксплуатации. Еще один способ был описан в работе [46] на примере обоснования критического износа верхней части цилиндрической втулки двигателей 12ЧН 18/20 трех модификаций М400, М40I и М756. В этом случае за основу были взяты формулы (5.9) и (5.10).

Исходными данными послужили результаты расчета вероятности не достижения предельного состояния γ и вероятности безотказной работы P за время работы, равному назначенному ресурсу двигателей до первой переборки R_{mn}

Предельно - допустимый износ $Hd = 0.3$ мм принят по данным завода-изготовителя. Вероятность рассчитана γ с помощью распределений износостойкости цилиндрических втулок. Параметры b и a распределений были определены путем статистической обработки сведений о максимальных износах цилиндрических втулок. Вероятность P определена по данным об отказах двигателей в эксплуатации из-за износов цилиндрических втулок до критической величины.

Согласно табл. 5.2, несмотря на различные условия работы исследуемых дизелей, величины критического предельного износа оказались близкими друг к другу ($Hk = 0.73$ — 0.88 мм при $K_{bp} = 2.43$ — 2.93). Вместе с тем, полученные значения совпали с результатами дефектации двигателей после их отказов из-за изнашивания цилиндров, что можно рассматривать как подтверждение предлагаемой методики.

Оценка критического предельного износа цилиндровой втулки дизеля

Марка двигателя	Ресурс тыс. ч	Закон распределения	Параметр a	Параметр b	$\gamma(R)$	$P(R)$	Hk мм
M400	1.5	Вейбулла	12.64	2	0.859	0.974	0.732
M40I	3.0	Вейбулла	23.30	2	0.832	0.979	0.883
M756	5.0	Логнормальный	23.49	0.53	0.740	0.996	0.857

Нормы предельно-допустимых износов могут и должны корректироваться по мере эксплуатации машин, путем накопления и статистической обработки информации об износах узлов трения.

5.4. Износостойкость узла трения



**Профессор
М. М. Хрущов
(1890—1972)**

Теперь настала очередь более подробно рассмотреть понятие об износостойкости — основном компоненте формулы (5-3). Согласно ГОСТ 27674-88 [15], износостойкость, это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Скорость изнашивания V_s , есть отношение износа I_s к интервалу времени T_s , в течение которого он возник. Однако, ученые в области трибологии обычно изучают не скорость V_s , а интенсивность изнашивания I_s , которая рассматривается как отношение износа I_s к пути трения L_s или к объему выполненной работы A_s .

Известно несколько научных школ решения этой проблемы. Например, ряд ученых (А. Д. Дубинин, Б. В. Протасов, В. А. Буфеев, Б. И. Костецкий, Ю. И. Линник, В. В. Федоров, Л. И. Бешадский, Ю. К. Машков и др.) в своих трудах изучают физическую природу изнашивания путем разработки энергетических моделей на основе термодинамической или кинетической теории неравновесных процессов. Эти теоретические исследования выходят за рамки содержания нашей монографии и далее здесь не рассматриваются.

В инженерной практике важнее использовать труды ученых: М. М. Хрущева, В. Д. Кузнецова, И. В. Крагельского, Н. Б. Демкина, А. С. Проникова, А. В. Чичинадзе, Д. Н. Решетова, Ф. П. Бодена, Д. Тейбора, Д. Арчарда, Т. Ф. Кунина, Х. Чихоса и др. [34...43, 47...49 и др.]. Их экспериментальные исследования позволяют сделать однозначный вывод о том, что интенсивность изнашивания пропорциональна степенным или линейным функциям давления Pe и коэффици-

ента трения K_s , а так же обратно пропорциональна функции твердости поверхности H_s сопрягаемых тел.

На этом основании с учетом требований ГОСТ 30858-2003 [16] формула (5.13) для оценки скорости изнашивания V_s была выражена через удельную мощность трения W_s (т.е. мощности трения на единицу площади поверхности трения) и твердость поверхности H_s .

$$V_s = K_{iz} (W_s/H_s), \quad (5.13)$$

где K_{iz} — коэффициент пропорциональности для перехода к износу.

На рис. 5-1 показана циклическая модель изнашивания, которая соответствует вращательным или возвратно-поступательным перемещениям относительно друг друга поверхностей элементов любой пары трения машины. В данной модели изнашивание происходит под воздействием эквивалентной нормальной силы P_Δ , создающей контактную силу трения $P_{mp} = K_s P_\Delta$ при циклическом перемещении поверхности детали на расстояние L_s за цикл с частотой N относительно образца с площадью контакта F_s . Имеются основания полагать, что при этом соблюдаются условия для вероятностной модели типа «Веер». Тогда скорость изнашивания V_s и износостойкость J_{sr} можно выразить в следующем общем виде

$$\begin{aligned} W_s &= K_s P_\Delta L_s N / F_s, \\ V_s &= K_{iz} [K_s P_\Delta L_s N / (F_s H_s)], \\ J_{sr} &= K_{iz}^{-1} [F_s H_s / (K_s P_\Delta L_s N)]. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Применительно к подшипнику с валом диаметром $d = 2 R$ при круговой частоте вращения ω (рис. 5-1) формула для износостойкости приводится к виду

$$J_{sr} = K_{iz}^{-1} [30 F_s H_s / (K_s P_\Delta R \omega)]. \quad (5.15)$$

Полученные формулы позволяют наметить основные пути повышения износостойкости узлов трения за счет управления входящими в них параметрами.

Амплитуда и частота. Прежде всего следует обратить внимание на два основных показателя внешней нагрузки на узел трения — амплитуду силы P_Δ и частоту N перемещения тел. Как правило эти показатели не подлежат управлению, поскольку связаны с функциональными параметрами машины. Исключение составляют случаи, когда возникают дополнительные нагрузки (как по амплитуде, так и по частоте) от динамических (вибрационных) колебаний в конструкции машины. Долгая работа при таких нагрузках (особенно резонансных) приводит к ускорению изнашивания. Такие нагрузки можно и нужно снижать конструктивными способами.

Например инерционные нагрузки на подшипники поршневых машин и двигателей снижают за счет установки на щеки коленчатых валов противовесов или путем изменения последовательности работы цилиндров. Для роторных машин важное значение имеет уравнивание инерционных сил и моментов вращающихся деталей.

Если в машине имеются резонансные колебания какого либо вида при работе на рабочих оборотах, то это так же может повышать скорость изнашивания. Борьба с этими явлениями требует специального исследования экспериментальными или расчетными методами. Известно, что рассогласование частот свободных и вынужденных колебаний для устранения резонанса выполняется за счет соответствующего изменения жесткость упругих связей и масс деталей. Более подробно эта проблема рассматривается в монографиях [18, 23].

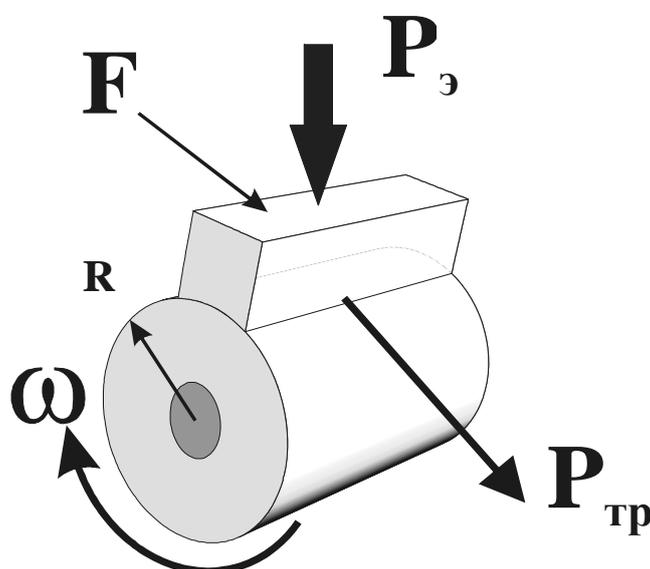
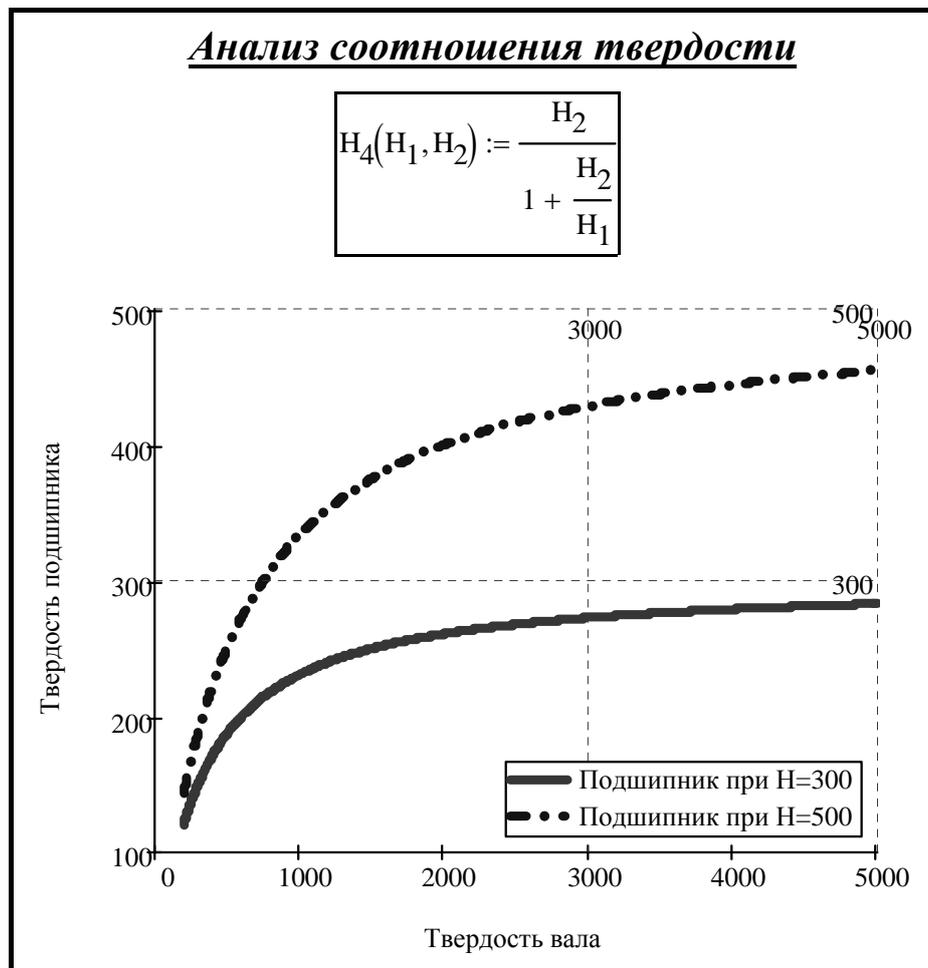


Рисунок 5-1 Формирование модели износостойкости

Площадь контакта. Этот показатель положительно влияет на износостойкость, поскольку при его увеличении снижается удельное давление и уменьшается сила трения. При проектировании площадь контакта может быть увеличена за счет более точной подгонки формы поверхности деталей друг к другу. Важное значение имеет такое свойство, как прилегаемость при трении, т.е. способность материала увеличивать поверхность трения за счет упругого и пластического деформирования поверхностного слоя [16].

К технологическим возможностям увеличение этого параметра можно отнести повышение точности центровки пары трения (например поршня в цилиндрической втулке). Наличие перекосов в узле приводит к неравномерному износу и быстрому выходу из строя детали. Эта проблема особенно актуальная для ремонта машин, поскольку культура производства на ремонтных предприятиях обычно ниже, чем на предприятиях — поставщиках продукции. Основным путем повышения качества ремонта является переход на фирменное сервисное обслуживание техники.

Твердость поверхности. Понятно, что твердость является основным показателем, от которого зависит долговечность узла трения при условии соблюдения требуемого КПД. Однако, следует иметь в виду, что пара трения состоит из двух деталей, одна из которых, более дешевая (вкладыш подшипника, например), должна иметь хорошие антифрикционные свойства за счет меньшей износостойкости по сравнению с более дорогой второй деталью (в данном случае — коленчатым валом).



Фрагмент 5-5

Поэтому долговечность быстро изнашиваемой детали (подшипника) принято повышать не столько за счет твердости поверхности, сколько путем применения специальных материалов или создания многослойных антифрикционных конструкций. При этом суммарный износ до их замены по критерию зазора должен обеспечиваться эквивалентной твердостью, зависящий от твердостей $H1s$ и $H2s$ обеих деталей [38]

$$Hs = [H1s H2s] / [H1s + H2s]. \quad (5.16)$$

Отметим, что этот показатель всегда дает суммарную твердость, которая меньше твердости первой быстро изнашиваемой детали.

Для того, что бы снизить скорость износа в зазоре узла необходимо, что бы твердость поверхности дорогой детали была не порядок выше твердости дешевой детали. Это видно из расчета на фрагменте 5-5.

Поэтому изготовитель второй дорогостоящей детали должен применять меры по увеличению твердости ее поверхности за счет выбора материала с более высоким пределом выносливости и (или) применения упрочняющих технологий. Однако это надо делать очень осторожно, чтобы не допустить снижения прочностных характеристик вала. Например применение дорогостоящих, но более хрупких легированных сталей для валов с пределом выносливости более 800

МПа не обеспечивает соответствующего увеличения срока их службы..

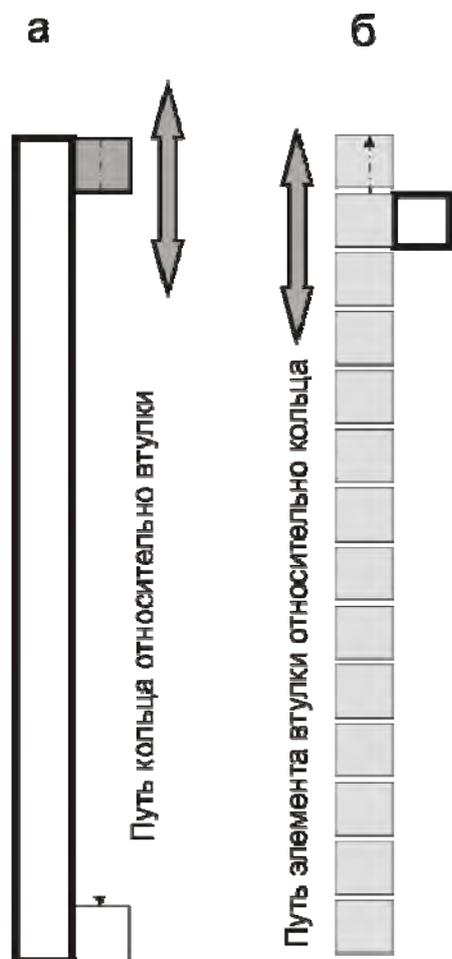


Рисунок 5-2

чугуна. Однако, сроки службы цилиндрических втулок у них больше (примерно) во столько раз, во сколько суммарная ширина комплекта из 4-5 колец меньше хода поршня. Так у среднеоборотного дизеля ресурс до текущего ремонта с контролем износа колец обычно составляет 5000 часов, в то время как ресурс до среднего ремонта с контролем износа втулок достигает 20000 — 25000 часов.

Приведенные данные необходимо учитывать при определении параметра L_s при подстановке его в формулу 5.14 с учетом соотношения путей трения сопрягаемых деталей.

Коэффициент трения. Коэффициент трения является наиболее значительным фактором для управления скоростью изнашивания пары трения. С теоретической точки зрения величина этого показателя зависит от природы трения, среди которых принято различать три основных механизма: сухое, граничное и жидкостное. При сухом трении взаимодействие контртел наиболее сильное и оно используется только в специальных устройствах машин: тормозах, демпферах, амортизаторах и т.п., когда $K_s = 0.3...0.5$. В обычных подвижных узлах машин, где потери энергии на трение должны быть минимальными, сухое трение может возникать только в аварийных ситуациях, когда нарушается процесс их смазки, что приводит к повышенному износу и даже схватыванию. При этом повышается температура узла, а коэффициент трения возрастает до значений, которые

Очень опасно применять для упрочнения валов «горячие» методы восстановления размеров, такие как наплавки, газопламенные и плазменные напыления и другие способы, которые могут создать концентрации напряжений в деталях и приводить к их деформации.

Путь трения. Вопрос о влиянии пути трения здесь рассматривается потому, что далеко не всегда путь трения образца (исследуемой детали) равен пути трения второй, обычно более дорогой детали. Для иллюстрации рассмотрим на рис. 5-2 возвратно-поступательный путь кольца относительно цилиндрической втулки дизеля, а затем путь условного элемента втулки, равной ширине кольца, относительно последнего. Очевидно, что кольцо изнашивается на всем пути своего скольжения по втулке (рис. 5-2 а). В то же время каждый элемент втулки изнашивается только во время прохождения по нему кольца, а затем он выходит из пятна контакта и не изнашивается (рис. 5-2 б).

Это соображение полностью подтверждается статистикой эксплуатации цилиндро-поршневой группы дизелей у которых кольца и втулки изготовлены из одинакового материала —

зависят от материала контротел. Меньшие значения можно ожидать у пар трения с антифрикционными элементами (например, баббитовыми вкладышами подшипников).

При жидкостном трении контротела разделены слоем жидкой смазки и не контактируют друг с другом. Поэтому $K_s = 0$, т.е. пара трения не изнашивается. В действительности такого идеального положения создать не возможно и реальные конструкции работают в условиях граничного трения, промежуточного между жидкостным и сухим вариантом. В этих условиях величина коэффициента трения будет заметно меньше, чем при сухом трении и может принимать значения в широком диапазоне величин от 0.01 до 0.001 и менее.

Эта величина зависит от многих конструктивно технологических и эксплуатационных факторов, которые можно оценить соответствующими коэффициентами при определении результирующего значения коэффициента трения.

Исходным фактором будем считать свойства (марки) материалов поверхностных слоев контротел пары трения. Этот фактор соответствует коэффициенту сухого трения K_{s1} , определяемому при стендовых испытаниях этих материалов. Чем выше этот показатель, тем ниже износостойкость узла.

Остальные факторы будут оцениваться коэффициентами, пропорциональными износостойкости. К таким факторам в первую очередь отнесем характеристики смазочной системы, качество которой будем оценивать коэффициентом K_{s2} .

Согласно [16] при назначении балла K_{s2} рекомендуется учитывать следующие свойства смазочной системы.

Смазочные масла и присадки к ним выбирают в зависимости от их функций, выполняемых в данном механизме: уменьшение силы трения, снижение износов, обеспечение охлаждения деталей, защита от коррозии и кавитации, обеспечение герметичности узла трения и непрерывной очистки поверхностей.

Смазочные материалы должны сохранять работоспособность в широком диапазоне температур, давлений и скоростей, легко заполнять впадины и микронеровности на рабочих поверхностях; создавать как можно большее сопротивление сдвигу в перпендикулярном и меньшее — в касательном направлениях к поверхностям трения, не вызывать взрывов и пожаров, не оказывать вредного влияния на материалы, из которых изготовлены детали машин, обеспечивать смазку при наименьшем расходе смазочных материалов и др.

В частности марки масел выбираются в зависимости от сезонной температуры при эксплуатации. В двигателях внутреннего сгорания первостепенное значение имеет способ подвода смазки к узлу трения.

Следующий фактор, который оценивается коэффициентом K_{s3} , характеризует свойства поверхности контротел: микропрофиль, волнистость, шероховатость и другие свойства. Для уменьшения шероховатости после изготовления или ремонта машины должны проходить обкатку. Для ускорения и повышения качества приработки узлов трения допускается добавлять в смазочный материал частицы абразива и полимерные присадки, вводить инактивные (графит, молибден), поверхностно-активные (олеиновые кислоты) и химически активные (ортооксихинолин и сульфосалициловая кислота) вещества, а также применять притирку и пришабровку поверхностей. В некоторых конструкциях (например у

цилиндропоршневых механизмах дизелей) эффективность удерживания смазки целесообразно повышать путем накатки на зеркале цилиндра волнистого микропрофиля. Условия эксплуатации узла трения и другие факторы можно оценить коэффициентом $Ks4$. Здесь имеется в виду периодическое сепарирование масла, контроль качества масла и износов и др.

Если мы будем знать перечисленные коэффициенты, то результирующий коэффициент трения будет характеризоваться выражением

$$Ks = Ks1 / (Ks2 Ks3 Ks4). \quad (5.17)$$

Приведенные данные отражают общий методический подход к анализу износостойкости, который может быть полезным при разработке моделей долговечности конкретных узлов трения.

5.5. Пример повышения износостойкости узлов трения машин

Рассмотрим некоторые мероприятия повышения износостойкости пар трения машин на примере цилиндрических втулок судовых дизелей.

К технологическим способам решения этой задачи можно отнести следующие меры. Можно применить электролитическое покрытие зеркала цилиндров пористым хромом или специальную технологию финишной обработки втулок, которые позволяют не только повышать прочность и гладкость поверхности, но и создавать регулярный микрорельеф, который улучшает условия смазки элементов узла трения. Метод обработки накаткой роликами позволяет повысить прочность и долговечность и других элементов втулок. Например для предупреждения образования трещин под посадочным буртом таким путем можно упрочнять галтель этого элемента. Эти же способом можно повышать кавитационную стойкость внешней поверхности и пр.

Имеются конструктивные способы повышения долговечности этой детали, которые связаны со снижением температуры втулок за счет более интенсивного охлаждения со стороны воды. Однако при этом следует ограничивать возможность усиления кавитации с внешней стороны втулок. Для этого можно рекомендовать применение эмульсионных присадок к охлаждающей воде. Скорость изнашивания втулок в значительной степени зависит от организации смазки узла трения «кольца - втулка». Для подвода масла к рабочей поверхности в верхней части втулок имеется четыре отверстия.

В рассматриваемом двигателе применяется принудительная смазка с помощью плунжерных насосов — лубрикаторов. Имеется возможность регулировать количество подачи масла вручную. Следовательно на эффективность смазки зависит от культуры и квалификации обслуживания дизеля. Этот фактор так же влияет и на качество очистки масла в системе двигателя, где установлены фильтры грубой и тонкой очистки. При их эксплуатации должен осуществляться регулярный контроль за их состоянием.

На износостойкость втулок большое влияние оказывает выбор оптимальных свойств топлива. Известно, что применение более дешевых тяжелых топлив с повышенным содержанием серы ускоряет износ верхней части втулок.

Износостойкость может быть повышена за счет повышения квалификации

пользователей машин. Большой эффект можно получить путем уменьшения количества изменений режимов работы двигателей. Следует строго соблюдать правила технического обслуживания системы смазки (операции по очистке фильтров, сепарации масла и регулировке лубрикаторов). Рекомендуется внедрять средства и методы диагностики состояния деталей без разборки или с минимальной разборкой машины. В рассматриваемом случае методы контроля состояния узла трения «поршневые кольца - втулка цилиндров» можно разделить на три группы в зависимости от объекта исследования.

Первая группа — контроль состояния узла трения в комплексе с учетом изнашивания как колец, так и втулки. При этом кольца имеют большую скорость изнашивания чем втулки, а поэтому методы контроля должны быть направлены на прогнозирование технического обслуживания (например через 5тыс.ч).

Вторая группа — непосредственный контроль состояния колец, что так же связано с прогнозированием сроков ТО. Третья группа-контроль изнашивания самой цилиндрической втулки для прогнозирования СР (например, 24 тыс. ч). Примером первой группы методов контроля является измерение степени компрессии камеры сжатия цилиндра с помощью пневмоиндикатора.

В качестве примера метода второй группы можно привести измерение зазора в замке поршневого кольца при частичном подъеме поршня в ТО. Типичным методом третьей группы является измерение внутреннего диаметра втулки без выемки поршневой группы одновременно с работами по контролю состояния поршневых колец. Более подробно проблема мониторинга изнашивания цилиндрической втулки будет рассмотрена в шестой главе.

5.6. Стендовые испытания износостойкости элементов

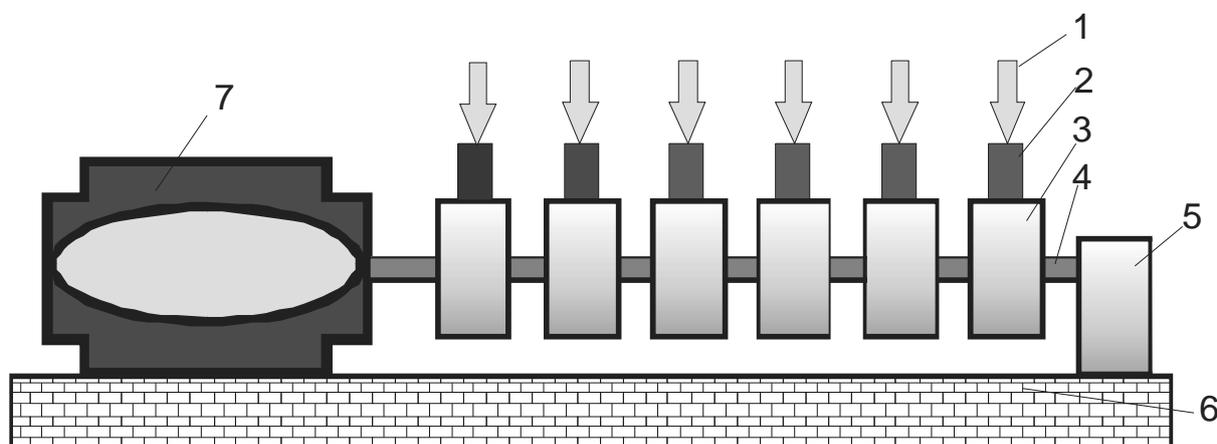


Рисунок 5-3 Группа из 6 одинаковых образцов 2 , которые испытываются на износ под нагрузкой 1 от абразивных кругов 3, которые вращаются на оси 4 между мотором 7 и подшипником 5 на фундаменте 6

Для примера рассмотрим макет стенда для испытаний на износ группы из 6 одинаковых образцов (рис. 5-3), которые одновременно поставлены под нагрузку

и периодически выводятся из испытаний после наработки t_i для одновременного измерения износа d_i . В результате образуется несколько полных простых выборок износов для соответствующих наработок t_i , обработка которых выполняется по особой программе, показанной на фрагменте 3-7 для линейной модели.

Цель испытаний заключается в определении среднего и нижней (или гамма - процентной) границы ресурса образцов до предельного суммарного износа (в данном примере он составил 30 гр.) Вектора наработок и результатов измерений износа, полученные по окончании 4 циклов испытаний, приведены на фрагменте 5-6. Эти данные можно обработать несколькими способами.

Первый способ заключается в образовании вспомогательной малой выборки из средних значений износов для каждого из четырех циклов. (см. фрагменты 5-7). Далее эта выборка обрабатывается методом наименьших квадратов с оценкой параметров линейной или степенной функции (фрагмент 5-3).

Второй способ заключается в объединении полученных векторов измерений в один большой вектор (в данном случае получаем $4 \cdot 6 = 24$) помощью оператора $\text{stack}(\square, \square, \square, \square)$ с последующей его обработкой методом наименьших квадратов (фрагмент 5-4).

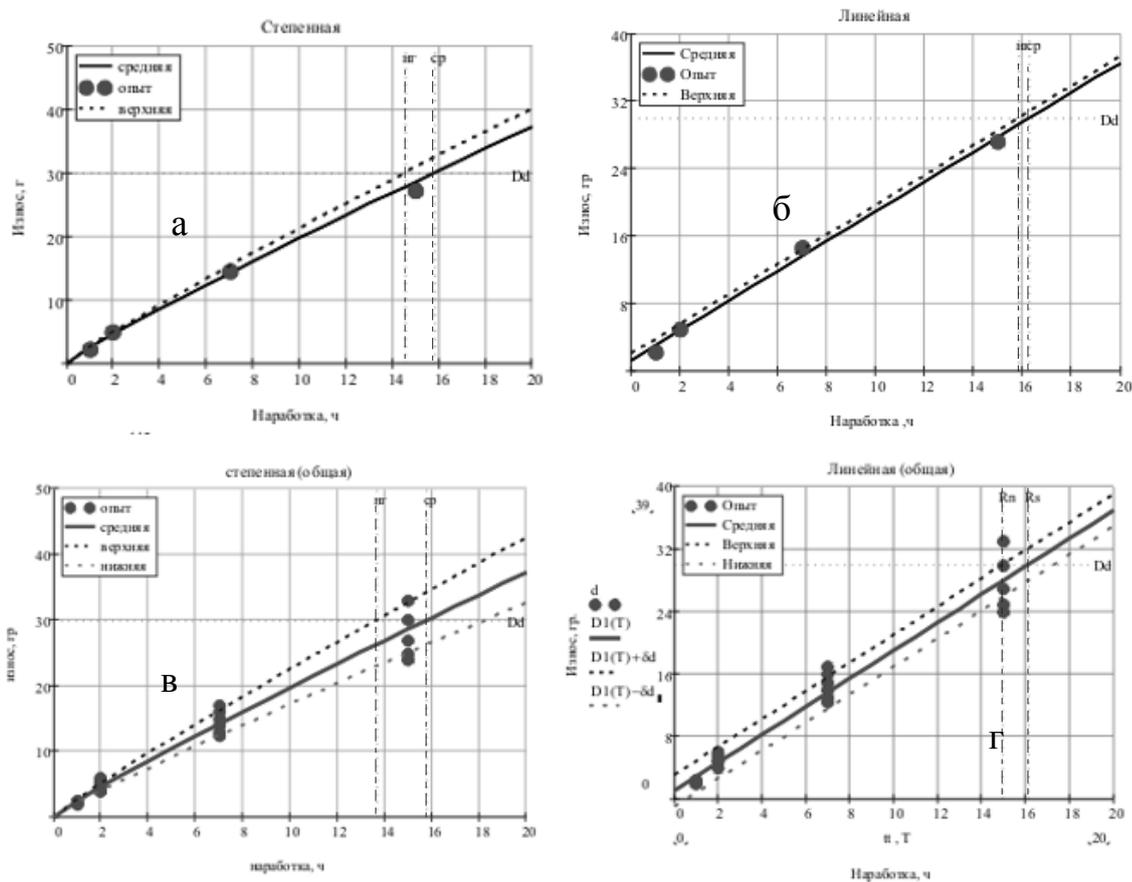


Рисунок 5-4 Графики функций износов: а — степенная раздельная функция, б — линейная раздельная, в — степенная общая, г — линейная общая.

Стендовые испытания узлов трения Варианты

Количество однотипных узлов при измерениях $z := 6$ $j := 0..z - 1$

Количество остановок для измерений $k := 0..3$

Допустимый износ $Dd := 30$ мм Диапазон наработок t от 1 до 20 тыс.ч.

Наработки до измерений t_{1j} и результаты измерений b_{1j}

$t_{1j} :=$	$b_{1j} :=$	$t_{2j} :=$	$b_{2j} :=$	$t_{3j} :=$	$b_{3j} :=$	$t_{4j} :=$	$b_{4j} :=$
1	2	2	4	7	17	15	33
1	2.2	2	5	7	13	15	24
1	2.3	2	6	7	15	15	25
1	2.4	2	5	7	12.5	15	27
1	2.15	2	4	7	14	15	24
1	2.1	2	5.5	7	16	15	30

Фрагмент 5-6

$$X := \begin{pmatrix} \text{mean}(t1) & \text{mean}(t2) & \text{mean}(t3) & \text{mean}(t4) \\ \text{mean}(b1) & \text{mean}(b2) & \text{mean}(b3) & \text{mean}(b4) \\ \sqrt{\text{Var}(b1)} & \sqrt{\text{Var}(b2)} & \sqrt{\text{Var}(b3)} & \sqrt{\text{Var}(b4)} \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 7 & 15 \\ 2.192 & 4.917 & 14.583 & 27.167 \\ 0.143 & 0.801 & 1.744 & 3.656 \end{pmatrix}$$

$$X1_k := X_{0,k} \quad X2_k := X_{1,k}$$

Фрагмент 5-7

Лагори́фмическая анаморфо́за

$$L1_k := \ln(X1_k) \quad L2_k := \ln(X2_k) \quad kkr := \text{corr}(L1, L2) \quad kkr = 0.998$$

Средние $L2s := \text{mean}(L2) \quad L1s := \text{mean}(L1) \quad L2s = 2.09 \quad L1s = 1.337$

Угловой коэффициент (степень) $bl2 := kkr \cdot \frac{\sqrt{\text{Var}(L2)}}{\sqrt{\text{Var}(L1) \cdot kkr^2}} \quad bl2 = 0.92$

Постоянная $cl := e^{(L2s - bl2 \cdot L1s)} \quad cl = 2.363$

Среднеквадратичные отклонения

Износа (y) $\delta L2 := \sqrt{(1 - kkr^2) \cdot \text{Var}(L2)} \quad \delta L2 = 0.077 \quad \delta L1 := \sqrt{(1 - kkr^2) \cdot \text{Var}(L1)} \quad \delta L1 = 0.084$

Уравнение износа $B1(T) := cl \cdot T^{bl2} \quad B1n(T) := cl \cdot T^{bl2} \cdot e^{-\delta L2} \quad T := 0..20$

Уравнение ресурса $RL(U) := \left(\frac{U}{cl}\right)^{\frac{1}{bl2}} \quad RLn(U) := \left(\frac{U}{cl}\right)^{\frac{1}{bl2}} \cdot e^{-\delta L1}$

Фрагмент 5-8

Образует общие вектора функций

$$d := \text{stack}(b1, b2, b3, b4)$$

$$tt := \text{stack}(t1, t2, t3, t4)$$

$$\text{length}(d) = 24$$

СИММЕТРИЧНЫЙ ВАРИАНТ

Коэффициент корреляции

$$\text{kor} := \text{corr}(tt, d) \quad \text{kr} = 0.997$$

$$\text{Угловой коэффициент} \quad bb := \text{kor} \cdot \sqrt{\frac{\text{Var}(d)}{\text{Var}(tt) \cdot \text{kor}^2}} \quad bb = 1.799$$

$$\text{Средние параметры} \quad \text{tsr} := \text{mean}(tt) \quad \text{dsr} := \text{mean}(d)$$

$$\text{Постоянный член} \quad A1 := \text{dsr} - bb \cdot \text{tsr} \quad A1 = 0.973$$

$$\text{Искомое уравнение износа от времени} \quad D1(T) := A1 + bb \cdot T \quad D1(16) = 29.752$$

Среднеквадратичные ошибки

$$\delta d := \sqrt{(1 - \text{kor}^2) \cdot \text{Var}(d)} \quad \delta d = 2.054 \quad \delta T := \sqrt{(1 - \text{kor}^2) \cdot \text{Var}(tt)} \quad \delta T = 1.142$$

Искомое уравнение ресурса от износа

$$T1(D) := \frac{D - A1}{bb}$$

$$\text{Средний ресурс} \quad Rs := T1(Dd) \quad Rs = 16.138$$

$$\text{Нижняя граница среднего ресурса} \quad Rn := Rs - \delta T \quad Rn = 14.996$$

Фрагмент 5-9

Эффективность оператора Minerr_

Вариант общей выборки объемом 24

$$Bh(T, cl, bl2) := cl \cdot T^{bl2} \quad n(cl, bl2) := d - Bh(tt, cl, bl2)$$

$$cl := 1 \quad bl2 := 2 \quad \text{Given} \quad n(cl, bl2) = 0$$

$$\begin{pmatrix} An \\ Bn \end{pmatrix} := \text{Minerr}(cl, bl2) \quad \begin{pmatrix} An \\ Bn \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.712 \\ 0.853 \end{pmatrix} \quad Bg1(T) := 2.712 \cdot T^{0.853}$$

Вариант выборки из средних объемом 4

$$Bc(T, CC, BB) := CC \cdot T^{BB} \quad n(CC, BB) := X2 - Bc(X1, CC, BB)$$

$$CC := 1 \quad BB := 2 \quad \text{Given} \quad n(CC, BB) = 0$$

$$\begin{pmatrix} Az \\ Bz \end{pmatrix} := \text{Minerr}(CC, BB) \quad \begin{pmatrix} Az \\ Bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.712 \\ 0.853 \end{pmatrix}$$

$$\text{Вывод - полное совпадение} \quad Be(T) := 2.712 \cdot T^{0.853}$$

Фрагмент 5-10

Сравнить рассмотренные способы обработки циклов испытаний можно по графикам на рис. 5-4. Из этих графиков видно, что центральные кривые на всех графиках близки друг другу (при одинаковых анаморфозах). Однако применение малых выборок из средних износов по циклам не достаточно отражает реальное рассеивание измерений износов, что завышает нижнюю границу ресурса. Этого недостатка лишен второй способ обработки на основе объединения векторов всех циклов в общую выборку (рис. 5-2в и 5-2г), что позволяет оценивать вероятность нижней границы ресурса (около 84 %), которая близка к 80-процентному ресурсу узла трения.

В заключение целесообразно отметить, что в случае применения оператора Minerr, более точные результаты расчета функций износа для объединенной выборки и для отдельных выборок полностью совпадают, но несколько отличаются от результатов расчета МНК (Фрагмент 5-5). Не смотря на это, в данном случае целесообразнее применять все же МНК, ибо он позволяет учитывать дисперсию износов и давать более достоверную вероятностную оценку функции износа.

6. Оценка усталостной долговечности и прочности деталей

6.1. Логнормальная модель кривой усталости

ГОСТ 25.504-82 [10] позволяет оценивать медианный предел выносливости детали $\sigma_{\bar{\sigma}_{аз}}$ для базового числа $N_{\bar{\sigma}_{аз}} = 10^7$ циклов с учетом конструктивно — технологических свойств детали. При этом величина $\sigma_{\bar{\sigma}_{аз}}$, соответствует точке перелома на кривой усталости. Левая часть кривой усталости характеризуется степенной функцией вида

$$\sigma_{50} = C N^{-1/m}, \quad (6.1)$$

где N — число циклов до разрушения образца, C и m — постоянные параметры.

Принято считать, что вправо от указанной точки кривая усталости должна переходить в прямолинейную зону неограниченной долговечности

$$\sigma_{50} = \sigma_{\bar{\sigma}_{аз}} = const. \quad (6.2)$$

Однако, опыт эксплуатации и статистика усталостных разрушений деталей многих машин и сооружений не всегда подтверждают эту гипотезу.

Известны случаи массовых поломок деталей, работающих под воздействием знакопеременных нагрузок с амплитудами напряжений, которые явно не превышали предела выносливости детали при наработке $N > 10^8$ циклов.

Опыт проектирования и модернизации машин показал, что усталостные разрушения можно предупредить, если предел выносливости рассчитывать по кривой усталости степенного вида (6.1) для всего рабочего числа циклов. В частности, методика [18] позволяет применять ГОСТ 25.504-82 для расчета величины $\sigma_{\bar{\sigma}_{аз}}$ и постоянных величин C и m кривой усталости, которая, однако, не имеет надлома и продолжает снижаться при увеличении числа циклов свыше базовой величины.

В ГОСТ [10] оценка предела выносливости детали при любой заданной вероятности P выполняется по формуле для нормального закона

В работе [20] для той же цели применяется логнормальное распределение

$$\sigma_P = \sigma_{50} \exp(U_P B_{\ln\sigma}), \quad B_{\ln\sigma} = \sqrt{\ln(1+V_\sigma^2)}, \quad (6.3)$$

где U_P — квантиль нормального распределения, V_σ — коэффициент вариации значений пределов выносливости, $B_{\ln\sigma}$ — параметр формы логнормального распределения, который мало отличается от коэффициента вариации V_σ .

Справедливость приведенных зависимостей вытекает из рассмотрения функции (6.1) в логарифмических координатах, когда нормальному закону подчиняется не сами исследуемые величины, а их логарифмы. При этом обнаружено важное свойство этой модели — следующая зависимость между параметрами формы распределений долговечности $B_{\ln N}$ и предела выносливости $B_{\ln\sigma}$

$$B_{\ln N} = m B_{\ln \sigma}. \quad (6.4)$$

Эта зависимость позволяет объяснить причину большой дисперсии ресурса деталей (с коэффициентом вариации $V_N = 0.5 — 1.0$) даже при малом рассеивании предела выносливости (например, $V_\sigma = 0.1$), поскольку показатель степени m для стальных деталей находится в пределах от 4 до 15 [31].

Отсюда следует формула для расчета гамма — процентного ресурса детали (в циклах) для заданной вероятности $\gamma = (100 - P)$.

$$N_\gamma = (C / \sigma_{50})^m \exp(-U_\gamma B_{\ln N}). \quad (6.5)$$

Эта модель усталостной долговечности, которую можно назвать логнормальной моделью, получила широкое применение в судостроении, автомобилестроении [31] и др. отраслях промышленности. Особо отметим многолетний опыт применения такого подхода к обеспечению усталостной долговечности при массовом производстве подшипников качения.

Следует признать, что, не смотря на явную практическую эффективность, эта модель далеко не всегда находится в согласии с разработками авторитетных специалистов в этой области науки [26] и, в некотором смысле, противоречит таким фундаментальными понятиями теории прочности как предел выносливости, малоцикловая и неограниченная долговечность.

Рассмотрим основные результаты исследований указанных проблем, которые можно условно разделить на два этапа.

На первом этапе выполнено подтверждение эффективности обобщенного уравнения кривой усталости Вейбулла [6, 40], частным вариантом которого является функция (6.1).

Для этого в качестве эталона используется следующая обобщенная функция кривой усталости, разработанная в Московском авиационном институте профессором Степновым М. Н. [44].

$$\sigma_{om,a} = \sigma_{om,\infty} + A \cdot \lg(N + N_1)^{-\alpha}, \quad (6.6)$$

где $\sigma_{om,\infty} = \sigma_\infty \cdot \sigma_{\sigma_{az}}^{-1}$ — отношение предела выносливости для неограниченной базы ($N \rightarrow \infty$) к пределу выносливости для базы 10^7 циклов; N_1 , A и α — параметры уравнения обобщенной кривой усталости.

В работе [44] приведены значения указанных параметров для деформированных алюминиевых сплавов, испытанных на изгиб с вращением.

В той же работе сказано, что из всех известных уравнений кривых усталости удовлетворительное соответствие с обобщенной кривой имеет уравнение Вейбулла, которое в относительных напряжениях имеет следующий вид

$$\sigma_{om,a} = \sigma_{om,\infty} + C(N + N_1)^{-1/m}. \quad (6.7)$$

Очевидно, что это выражение приводится к виду функции (3-9) при нулевой асимптоте $\sigma_\infty = 0$ и $N_1 = 0$.

Для изучения уравнения (6.7) сначала по формуле (6.6) были рассчитаны

напряжения для нескольких фиксированных значений N , которые далее рассматриваются в качестве «опытных» значений кривой усталости. Затем по этим точкам методом наименьших квадратов были определены параметры кривых усталости для общего уравнения Вейбулла (6.7) и его двух вариантов: функции (6.7) при $N_l = 0$ и функции (6.1). Расчеты в редакторе MATHCAD по специальной программе позволили получить следующие результаты в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Сравнение функций кривой усталости по Вейбуллу и Степнову

Вид уравнения и номер формулы	m	$\sigma_{от, \infty}$	N_1	R_{xy}	$\sigma_{от, a}$ (медиана) для циклов		
					10^5	10^7	10^9
Степнова (6.6)		0.46	3000	1	1.597	0.996	0.776
Вейбулла (6.7)	4.8	0.65	3000	-1	1.541	0.991	0.779
Вейбулла (6.7)	5	0.636	0	1	1.536	0.994	0.779
Функция (6.1)	12.8	0	0	0.988	1.489	1.04	0.727

Во-первых, была доказано совпадение уравнения Вейбулла (6.7) с исходной формулой Степнова (6.6) при коэффициенте корреляции $|R_{xy}| = 1$. Двухпараметрическое уравнения (6.1) также оказалось в хорошем согласии с уравнением (6-7) при $|R_{xy}| = 0.988$ и степени $m = 12.8$. Эти результаты позволяют перейти ко второму этапу решения основной проблемы — доказательству преимуществ функции (6-1) путем сравнительного корреляционного анализа уравнения Вейбулла при разных значениях его параметров.

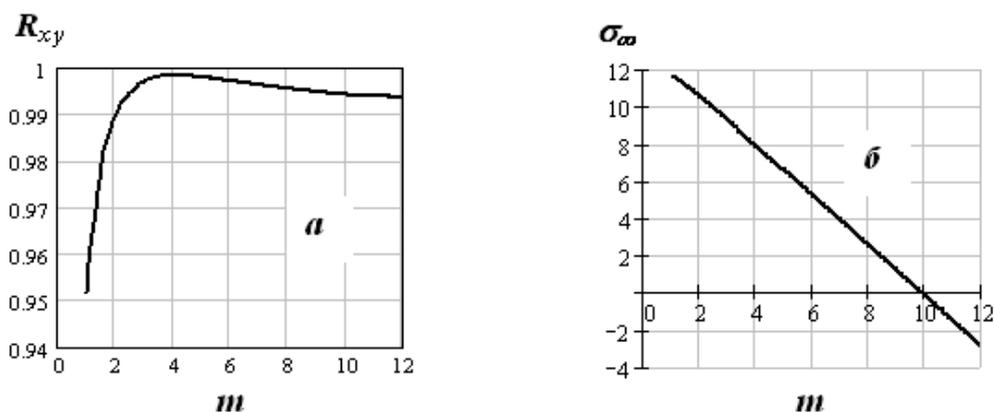


Рис. 6-1 Зависимости коэффициента корреляции (а) и асимптоты (б) от m

Для повышения достоверности решения этой задачи в качестве исходных данных были использованы результаты испытаний образцов из легкого сплава АВ, опубликованные в таблицах работ [44, 50]. В этих таблицах наблюдается значительное рассеивание числа циклов до разрушения, не смотря на то, что испытания и подготовка к ним выполнялись очень качественно. Если при высоких уровнях нагрузки происходили разрушения всех образцов, то на более низких уровнях нагрузки разрушалась только часть из них.

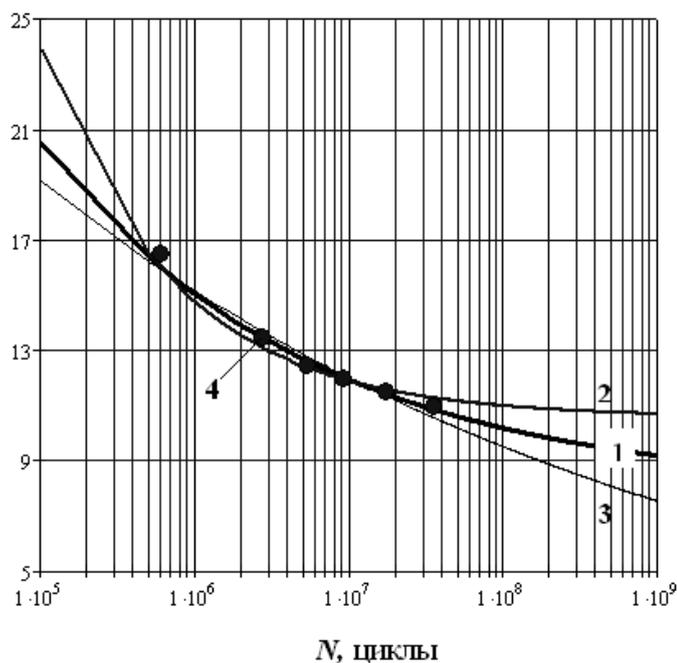
$\sigma_{50}, \text{кГ/мм}^2$ 

Рис. 6-2 Варианты аппроксимации кривой усталости при следующих параметрах уравнения Вейбулла: 1 — при $m = 4.05$ и $\sigma_{\infty} = 7.89 \text{ кГ/мм}^2$, 2 — при $m = 2.00$ и $\sigma_{\infty} = 10.56 \text{ кГ/мм}^2$, 3 — при $m = 9.89$ и $\sigma_{\infty} = 0$, 4 — опытные точки для сплава АВ.

В работе [46] приведена методика статистической обработки подобных, так называемых цензурированных выборок, содержащих как отказавшие, так и еще не отказавшие объекты. На ее основе были разработаны алгоритмы и программы в редакторе MATHCAD, которые содержат следующие операции. Сначала для каждого уровня нагрузки составлялось эмпирическое распределение вероятности разрушения образцов. Затем по этим данным рассчитывались параметры выбранного закона распределения (логнормального) с использованием метода наименьших квадратов и проверкой согласия с эмпирическим распределением по коэффициенту корреляции. Далее по параметрам распределения для каждого i -го уровня нагрузки σ_i определялись медианное значение числа циклов до разрушения N_i и среднеквадратичное отклонение логарифма этой величины $b_{\ln N, i}$.

Эти статистические данные затем используются для определения корреляционной зависимости разрушающих напряжений от числа циклов для любой заданной вероятности не разрушения образца γ . В методике впервые была применена следующая анаморфоза переменных для расчета постоянных корреляционного уравнения

$$x_i = \ln(N_i), \quad y_i = \sigma_i^{-m} \quad . \quad (6.8)$$

По указанной методике были определены параметры уравнения Вейбулла $m = 4.05$ и $\sigma_{\infty} = 7.89$, соответствующие максимальному коэффициенту корреляции, равному 0.998 (см. рис. 6-1). Одновременно были рассчитаны параметры искомого уравнения (6-1) с нулевой асимптотой $\sigma_{\infty} = 0$, а также квадратичной

функции при $m = 2$ с нулевой асимптотой $\sigma_{\infty} \neq 0$, которая положена в основу весьма тщательных экспериментальных исследований усталостной выносливости образцов, результаты которых описаны в уникальном труде Р.Д. Вагапова [8]. Отличие этих вариантов от варианта с максимальной корреляцией также можно оценить по графикам на рис. 6-1.

На рис. 6-2 приведены медианные кривые усталости при всех трех вариантах уравнения Вейбулла. Как показано в итоговой табл. 6.2, данном случае лучшее согласие ($R_{xy} = 0.998$) имеет оптимальная кривая при $m = 4.05$ и $\sigma_{\infty} = 7.89$, а наихудшее ($R_{xy} = 0.989$) — при $m = 2$ и $\sigma_{\infty} = 10.6$.

Таблица 6.2

Результаты расчета предела усталости исследуемыми методами

m	R_{xy}	σ_{∞}	Предел выносливости для			
			$\gamma = 50\%$ (медиана)			$\gamma = 99\%$
			10^7	$5 \cdot 10^7$	10^9	$5 \cdot 10^7$
2.00	0.989	10.56	13.33	11.80	10.84	11.54
4.05	0.998	7.89	13.71	11.80	9.75	11.37
9.89	0.994	0	13.92	11.83	8.74	11.28
Справочные данные [50]			13.9	12		11.70

При выборе расчетной формулы предпочтение следует отдать уравнению, которое дает наименьшее значение предела выносливости при числе $10^8 \div 10^{10}$ циклов. Этому условию удовлетворяет только степенная функция с нулевой асимптотой (6.1), имеющая показатель степени $m = 9.89$ при достаточно высоком коэффициенте корреляции 0.994.

В нижней строке табл. 6.2 приведены справочные данные об основных характеристиках сплава АВ, которые взяты из работ [44, 50]. Эти величины хорошо согласуются с результатами наших расчетов.

Приведенные результаты исследований позволили корректно подтвердить правомерность применения логнормальной модели кривой усталости степенного вида при нулевой асимптоте для прогнозирования и обеспечения усталостной долговечности деталей машин при их проектировании или модернизации.

6.2. Допускаемые напряжения при изгибе ступенчатого вала

В этом разделе показана эффективность логнормальной модели для обоснования допускаемых усталостных напряжений изгиба ступенчатого вала (рис. 6-3) на основе ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» [10].

Этому вопросу посвящена первая часть программы на фрагментах 6-1...6-2, которая завершается определением допускаемыми напряжениями изгиба (предела выносливости в галтели детали) для базового числа циклов нагрузки $2 \cdot 10^6$, а так же оценки коэффициента вариации этой величины. С учетом концентраций напряжений, реальных размеров и других параметров детали предел выносливости детали на изгиб из легированной стали с пределом прочности 650 МПа составил 115 МПа при коэффициенте вариации 0.083 для базового числа циклов $2 \cdot 10^6$.

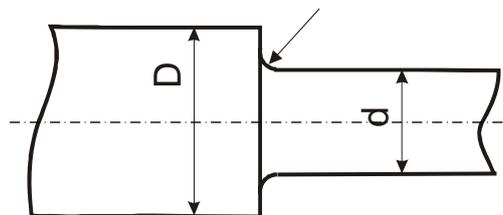


Рисунок 6-3

Согласно классической теории усталостной прочности полученное значение 115 МПа должно гарантировать безаварийную работу детали, если действующие напряжения не превысят этой величины. В главе 6.1 было показано, что на практике это условие далеко не всегда соблюдается и при реальной наработке деталей до $10^9 \dots 10^{10}$ циклов часто возникают массовые поломки деталей даже при заметно меньших напряжениях.

В ГОСТ [10] основное внимание оказано методика расчете медианных напряжений и дается выражение для оценки напряжений при заданной вероятности разрушения при нормальном законе распределения и только для области малоциклового нагружки (при числе циклов $< 2 \cdot 10^6$). О том, как определять пределы выносливости за пределами этой области в ГОСТ ответа не имеется. Однако, там приводятся выражения для приближенной оценки степени кривой усталости и данные о коэффициентах вариации, что позволило успешно применить степенную функцию кривой усталости с нулевой асимптотой и построить на ее основе логнормальную модель выносливости (см. п. 6.1).

На фрагменте 6-3 приводиться расчет параметров кривой усталости — показателя степени mv и постоянной CV базового числа циклов $2 \cdot 10^6$, которые однозначно определяют медианные функции кривой усталости.

Для примера с их помощью при амплитуде напряжений 50 МПа, частоте вращения 400 1/мин и коэффициенте технического использования 0.8 были рассчитаны ресурсы в циклах, тысячах часов и годах ($2.464 \cdot 10^9$ циклов, 102.67 тыс.ч и 14.65 лет соответственно).

На следующих фрагментах 6-4 ...6-6 решается еще одна, более интересная задача по оценке гамма-процентной прочности и долговечности детали для заданной вероятности $\mu d = 0.95$. Решение этой задачи начинается с оценки параметра формы логнормального распределения (фрагмент 6-4). Обращаем внимание на то обстоятельство, что параметр формы логнормального распределения для ресурса в mv раз больше параметра формы для напряжений, что приводит к соответствующему увеличению гамма-процентного ресурса (см. фрагмент 6-6).

В данной методике для расчета гамма - процентных ресурсов используются понятия коэффициентов прочности и долговечности, которые представляют собой отношения гамма-процентных и медианных величин, определяемых по логнормальному закону.

Расчет характеристик сопротивления усталости и долговечности ступенчатого валика по ГОСТ 25.504-82

Условия работы

При наличии коррозии поставить галочку Коррозия Коррозия = 0

Материал

Углеродистая сталь = 2
 Легированная

Обозначение: Сталь Ст.45 нормализованная. Предел прочности $\sigma_v := 650$ МПа

Предел выносливости материала для $\epsilon_B := 0.95$ - по графику

$\sigma_1 := (0.55 - 0.0001 \cdot \sigma_v) \cdot \sigma_v \cdot \epsilon_B$ $\sigma_1 = 299.488$ МПа коэфф. вариации $v := 0.07$

Размеры

Большой диаметр $D := 120$ мм малый диаметр $d := 100$ мм галтель $\rho := 10$ мм

Допуск на радиус галтели $\Delta := 2$ мм Шороховатость $Rz := 6.3$

Упрочнение (установить коэффициент)

Упрочнение :=

НЕТ
 Слабое
 Умеренное
 Большое

Упрочнение = 1 $K_u := 1 + 0.05 \cdot (\text{Упрочнение}^2 - 1)$

$K_u = 1$

Расчет предела выносливости

Вспомогательные величины

$t_0 := \frac{D - d}{2}$ $a_0 := \frac{d}{2}$ $t := \frac{t_0}{\rho}$ $t = 1$ $a := \frac{a_0}{\rho}$ $a = 5$

Теоретический коэффициент концентрации напряжений заготовки

$$\alpha := 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0.62}{t} + 5.8 \cdot \frac{(1 + a)^2}{a^3} + \frac{0.2}{t^3} \cdot \frac{a}{a + t}}}$$

$\alpha = 1.638$

Относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентрации напряжений G, 1/мм

$\phi := \frac{1}{4\sqrt{t + 2}}$ $\phi = 0.167$ $G := \frac{2.3 \cdot (1 + \phi)}{\rho} + \frac{2}{d}$ $G = 0.288$

Параметр рабочего сечения, прилегающего к местам концентрации напряжения

$L := \pi d$ $L = 314.159$ $d_0 := 7.5$

Критерий подобия усталостного разрушения детали и образца d_0 , мм²

$kr := \frac{L}{G}$ $kr = 1089.57$ $kr_0 := \frac{\pi d_0^2}{2}$ $kr_0 = 88.357$

Относительный критерий подобия усталостного разрушения Θ $\Theta := \frac{kr}{kr_0}$ $\Theta = 12.331$

Фрагмент б-1

Коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений и масштабному фактору. При отсутствии опытных данных допускается применять формулу.

$$v\sigma := 0.2 - 0.0001 \cdot \sigma \quad v\sigma = 0.135$$

Тогда значение функции Φ составит

$$\Phi := \frac{2}{1 + \Theta^{-v\sigma}} \quad \Phi = 1.168$$

Определение коэффициента снижения предела выносливости K

Сначала определяют коэффициент учета роста абсолютных размеров

$$K1 := \text{if} \left(d \leq 150, 1 - 0.2 \cdot \log \left(\frac{d}{d0} \right), 0.74 \right) \quad K1 = 0.775$$

Учет легирования стали $\text{сталь} = 2$

$$K1 := \text{if} (\text{сталь} = 1, 1, K1) \quad K1 = 0.775$$

Коэффициент учета отношения эффективного коэффициента концентрации напряжения к коэффициенту учета влияния абсолютных размеров

$$K\sigma d := \alpha \cdot \Phi \quad K\sigma d = 1.913$$

коэффициент учета шероховатости

$$KF := 1 - 0.22 \cdot \log(Rz) \cdot \left(\log \left(\frac{\sigma v}{20} \right) - 1 \right) \quad KF = 0.91$$

Коэффициент учета качества поверхности детали

$$K\rho v := \text{if} (\text{Коррозия} = 0, KF, 0.5) \quad K\rho v = 0.91$$

Тогда коэффициент снижения предела выносливости K

$$K := \left(K\sigma d + \frac{1}{K\rho v} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K1} \quad K = 2.012 \quad K_u = 1$$

Медианное значение предела выносливости детали

$$\sigma_d = \frac{K1}{K} \cdot \sigma_1 \quad \sigma_d = 115.361 \quad \text{МПа}$$

Учет рассеивания характеристик сопротивления выносливости

Исходные данные коэффициент вариации предела прочности и предела выносливости (задан) $v = 0.07$

коэффициент вариации максимальных разрушающих напряжений $v_m := \frac{0.1}{1 + \Theta^{v\sigma}} \quad v_m = 0.042$

коэффициент вариации для радиуса кривизны галтели (согласно приложения 6 ГОСТ, стр. 75)

$$v\rho := 0.25 \cdot \frac{\Delta}{3 \cdot \rho} \quad v\rho = 0.017$$

Тогда общий коэффициент вариации предела выносливости вала по ГОСТ

$$v_o := \sqrt{v^2 + v_m^2 + v\rho^2} \quad v_o = 0.083$$

Фрагмент 6-2 (продолжение фрагмента 6-1)

Кривая усталости

Показатель степени по ГОСТу

$$mv := \left(5 + \frac{\sigma v}{80} \right) \cdot \frac{1}{K}$$

$$mv = 6.523$$

Постоянная кривой выносливости для базы (по ГОСТ)

$$Ng := 2 \cdot 10^6$$

$$CV := \sigma_d \cdot Ng^{\frac{1}{mv}}$$

$$CV = 1.376 \times 10^3$$

Характеристика предела выносливости (медиана)

Основная функция кривой усталости с нулевой асимптотой (медиана)

$$\sigma(N) := CV \cdot N^{-\frac{1}{mv}}$$

$$\sigma(Ng) = 148.851$$

Обратная функция для расчета медианного срока службы в циклах

$$Nv(\sigma) := \left(\frac{CV}{\sigma} \right)^{mv}$$

$$Nv(\sigma_d) = 2 \times 10^6$$

Для расчета медианных параметров кривой усталости в тыс.ч и годах надо знать

Фактическую амплитуду напряжений

$$\sigma_f := 50$$

МПа

Частоту колебаний (вращения для первого порядка)

$$n := 400$$

1/мин

Коэффициент технического использования машины

$$KT := 0.8$$

Тогда ресурс вала можно определить по формулам

Медианный ресурс в циклах

$$Nv(\sigma_f) = 2.464 \times 10^9$$

циклов

Медианный ресурс в тыс.ч.

$$Tv(\sigma, n) := \frac{Nv(\sigma)}{1000 \cdot 60 \cdot n}$$

$$Tv(\sigma_f, n) = 102.677$$

тыс. ч

Медианный ресурс в годах

$$Tg(\sigma, KT, n) := \frac{Tv(\sigma, n)}{KT \cdot 0.365 \cdot 24}$$

$$Tg(\sigma_f, KT, n) = 14.651$$

лет

Для решения прямой задачи по определению медианных допустимых напряжений для заданного срока службы применяется та же формула для заданного числа циклов

$$Nf := 2.464 \times 10^9 \quad \sigma(Nf) = 50.001 \quad \text{МПа} \quad 0.365 \cdot 24 \cdot 1000 \cdot 60 = 5.256 \times 10^5$$

Если задать требуемый срок службы в годах, например $Tf := 15$ лет то требуемый медианный ресурс в циклах определить по формуле

$$Nf := 5.256 \times 10^5 \cdot Tf \cdot KT \cdot n \quad Nf = 2.523 \times 10^9$$

Тогда допустимые медианные напряжения составят

$$\sigma(Nf) = 49.82 \quad \text{МПа}$$

Фрагмент б-3

Характеристика предела выносливости для заданной вероятности неразрушения (волосяная трещина)

Для вероятностной оценки тех же самых характеристик предела выносливости с использованием функции с нулевой асимптотой и логнормального распределения необходимо:

Задать допустимую вероятность неразрушения $\gamma_d := 0.95$

Определить коэффициенты вариации и параметр формы для напряжений (см. выше)

$$v_o = 0.083 \quad b_g := \sqrt{\ln(1 + v_o^2)} \quad b_g = 0.083$$

Определить параметр формы для ресурса $b_N := b_g \cdot m_v \quad b_N = 0.541$

Определяем квантиль для γ_d

$$z := 1 \quad \text{Given} \quad \text{snorm}(z) = \gamma \quad u(\gamma) := \text{Find}(z) \quad u(\gamma_d) = 1.645$$

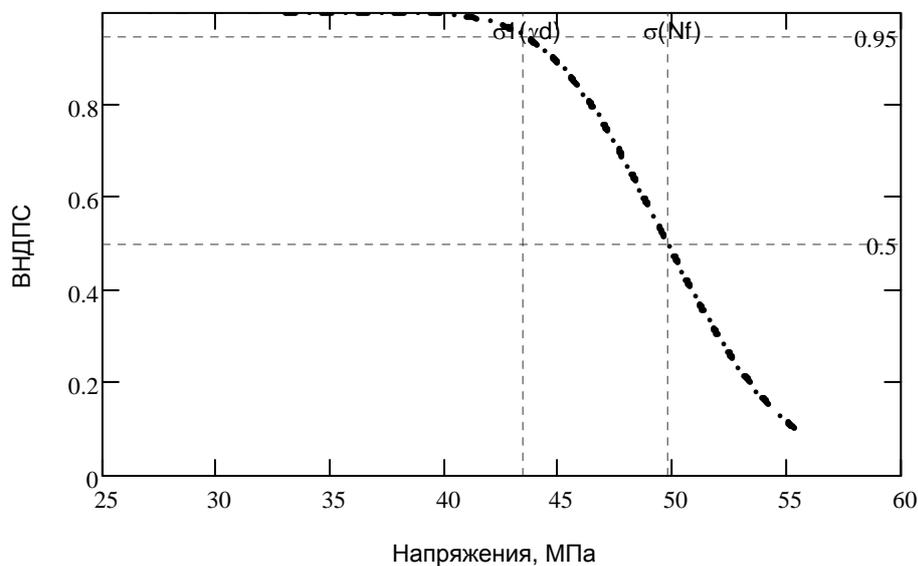
Фрагмент 6-4

Определяем запас прочности и гамма-процентные напряжения для заданной вероятности

$$K_p(\gamma_d) := e^{-b_g \cdot u(\gamma_d)} \quad K_p(\gamma_d) = 0.872$$

Тогда для обеспечения требуемой вероятности неразрушения при том же ресурсе допускаемые напряжения должны быть снижены от величины $\sigma(N_f) = 49.82$

до величины $\sigma_1(\gamma_d) := \sigma(N_f) \cdot K_p(\gamma_d) \quad \sigma_1(\gamma_d) = 43.464 \quad \gamma := 0.1, 0.101.. 1$



Для сохранения назначенного ресурса $N_f = 2.523 \times 10^9$ достаточно снизить амплитуду напряжений всего в $\frac{1}{K_p(\gamma_d)} = 1.146$ раза. Либо надо уменьшать концентрации напряжений

Фрагмент 6-5

Определяем запас долговечности и гамма-процентные ресурсы для заданной вероятности при неизменных напряжениях $\sigma(N_f) = 49.82$

$$KN(\gamma d) := e^{-bN \cdot U(\gamma d)} \quad KN(\gamma d) = 0.411$$

С его помощью определяем гамма - процентный ресурс при медианном ресурсе $N_f = 2.523 \times 10^9$

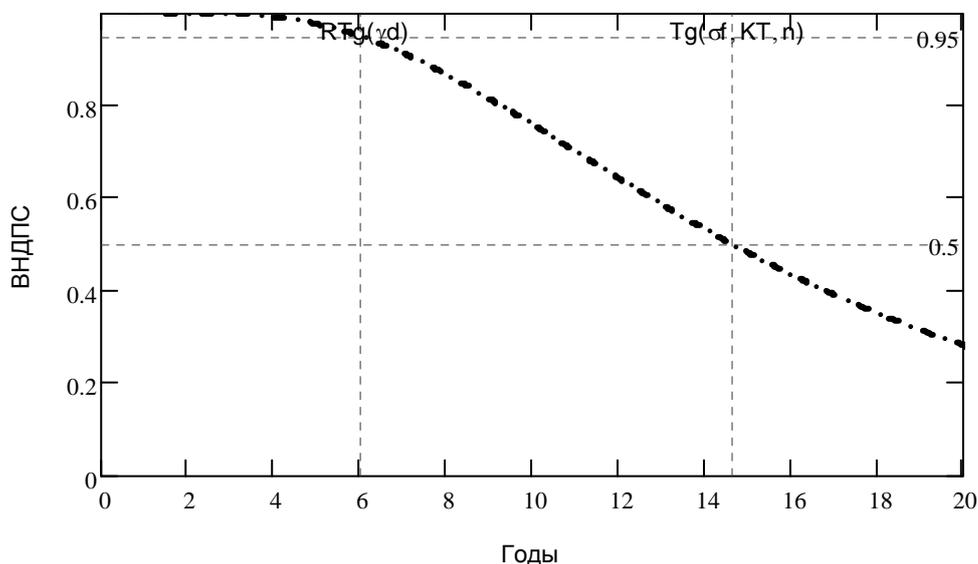
В циклах $RN(\gamma d) := KN(\gamma d) \cdot Nv(\sigma_f) \quad RN(\gamma d) = 1.012 \times 10^9 \quad Nv(\sigma_f) = 2.464 \times 10^9$

В тыс. часов $RTV(\gamma d) := KN(\gamma d) \cdot Tv(\sigma_f, n) \quad RTV(\gamma d) = 42.152 \quad Tv(\sigma_f, n) = 102.677$

В годах $RTg(\gamma d) := KN(\gamma d) \cdot Tg(\sigma_f, KT, n) \quad RTg(\gamma d) = 6.015 \quad Tg(\sigma_f, KT, n) = 14.651$

$$NnN := KN(\gamma d) \cdot N_f$$

Это значит, что ресурс составит $KN(\gamma d) = 0.411$ от медианного



Фрагмент 6-6

$$Kp(\gamma d) = \sigma(\gamma d) / \sigma(N_f) = \exp(-bg U(\gamma d)), \quad (6.9)$$

$$KN(\gamma d) = RN(\gamma d) / Nv(\sigma_f) = \exp(-bN U(\gamma d)).$$

Далее на фрагменте 6-5 с помощью коэффициентов прочности определяются гамма-процентные напряжения, при том же медианном ресурсе. Эти напряжения 43.46 МПа оказались несколько меньшими медианных значений 49.8 МПа. Поэтому для сохранения требуемого ресурса должны быть приняты соответствующие конструктивно — технологические меры.

Аналогично, с помощью коэффициента долговечности, на фрагменте 6-6 определяется три варианта гамма - процентных ресурсов: $1.09 \cdot 10^9$ циклов, 42.152 тыс.ч и 6.015 лет, которые значительно (в 2.43 раза) меньше медианного ресурса

по указанной выше причине. Обычно такое снижение ресурса экономически не выгодно и поэтому для его сохранения следует идти по пути конструктивно-технологических изменений параметров детали. Кроме естественного изменения размеров детали методика ГОСТ предоставляет большой арсенал для повышения предела выносливости и соответственного повышения ресурса.

Как показано на фрагментах 6-1 и 6-2 для этого можно изменять материал детали, снижать концентрации напряжений, применять способы упрочнения поверхности, защищать от коррозии и пр. Из стандарта следуют некоторые оригинальные рекомендации. Так применение легированных сталей может привести к снижению предела выносливости из-за большей чувствительности этого материала к концентрации напряжений.

На гамма-процентный ресурс большое влияние оказывает коэффициент вариации напряжений. При низком качестве изготовления или ремонта детали возрастает параметр формы логнормального распределения bg , что может привести к преждевременным усталостным разрушениям детали.

6.3. Допускаемые напряжения при кручении вала

Как было показано в работе [23], допускаемые напряжения, определяемые по формулам Российского морского регистра судоходства (РС) для номинальных оборотов, в 1.3 — 1.5 раза меньше значений, которые получаются расчетом другими методами, взятыми из авторитетных источников. Так по данным [29] для валов больших диаметров из стали с пределом прочности 450 — 480 МПа допускаемые напряжения составляют 20 — 28 МПа, а по правилам РС — только 15 — 20 МПа. Этот вывод подтверждается безаварийным опытом эксплуатации коленчатых валов среднеоборотных и высокооборотных дизелей у которых суммарные напряжения кручения в коленчатых валах также превышают допускаемые напряжения по правилам РС, достигая 50 — 60 МПа. Например, уникальные тензометрические измерения в районе наиболее нагруженной шейки коленчатого вала для двигателей 3Д6, 3Д12 и М50 показали, что напряжения в коленчатых валах этих двигателей составляют 50 — 60 МПа. Однако, поломок коленчатых валов при таких напряжениях у этих дизелей не наблюдалось.

Указанные противоречия и вызвали необходимость проведения специальных исследований по разработке новой формулы для расчета допускаемых напряжений по правилам РС. Теоретической базой наших исследований послужили труды отечественных ученых по прочности деталей машин, которые в полной мере реализованы в ГОСТ 25.504-82 [10]. Подробное изложение в указанном ГОСТе процедур оценки всех факторов, влияющих на характеристики сопротивления усталости валов, позволили составить алгоритмы и программы, необходимых для корректного обоснования искомой формулы РС.

Наряду с указанной методикой ГОСТ, при решении поставленной задачи была подробно исследована известная формула В.П. Терских [44] для расчета допускаемых напряжений от крутильных колебаний и рекомендации известного специалиста в этой области Кер-Вильсона [29]. Исследование этих методов имеет ключевое значение для оценки достоверности новой методики расчета

допускаемых напряжений по ГОСТ.

Если рассматривать допускаемые напряжения $\tau_{\text{доп}}$ как предел выносливости детали при знакопеременном кручении $\tau_{-1д}$, то его медианное значение для рабочего числа циклов в общем виде характеризуется таким выражением:

$$\tau_{\text{доп}} = \tau_{-1д} = \frac{\tau_{-1}}{K_d} K(r). \quad (6.10)$$

где τ_{-1} — предел выносливости материала, определенный путем испытаний гладких образцов при симметричном цикле, K_d — коэффициент снижения предела выносливости, r — относительная частота вращения коленчатого вала, равная отношению текущей частоты вращения к номинальной, $K(r)$ — функция учета режима работы коленчатого вала.

На практике предел выносливости материала определяется либо по специальным справочным таблицам [45], либо по эмпирическим зависимостям τ_{-1} от временного сопротивления материала на разрыв (далее — предела прочности), которое обозначим (также как в правилах РС) символом Rm .

Как показано на рис. 6-4 в различных методиках применяются разные эмпирические функции для расчета предела выносливости материала. Они будут далее использоваться при рассмотрении соответствующего метода.

Однако для применения в правилах РС целесообразно принять за основу следующую формулу из ГОСТ [10]

$$\tau_{-1}(Rm) = 0.6 (0.55 - 0.0001 Rm) Rm, \quad (6.11)$$

которая дает несколько большие значения, чем по данным [45],

$$\tau_{-1}(Rm) = Rm/4, \quad (6.12)$$

но меньше, чем по данным [29]

$$\tau_{-1}(Rm) = Rm/3 \quad (6.13)$$

Более сложной проблемой оценки допускаемых напряжений является определения коэффициента снижения предела выносливости K_d , величина которого обычно находится в пределах от 5 до 8.

Необходимость введения коэффициент снижения предела выносливости K_d обусловлена влиянием ряда конструктивно-технологических факторов на предел выносливости при кручении коленчатого вала.

К таким факторам относятся: размеры коленчатого вала, концентрации напряжений в районе резкого изменения формы детали, чистота поверхности, наличие коррозии, применение упрочняющих технологий и прочее. В работе [29] дан обстоятельный анализ этих факторов. Там же приводятся простые формулы для расчета допускаемых напряжений. Они не претендуют на высокую точность, но имеют большое значение для проверки достоверности расчета допускаемых напряжений, поскольку отражают мировой опыт исследования крутильных колебаний коленчатых валов.

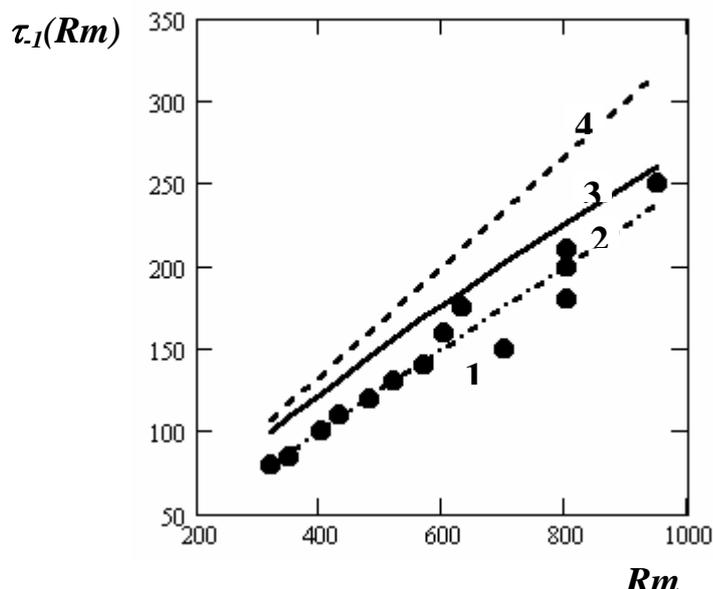


Рис. 6-4 Сравнение способов расчета предела выносливости материала: 1 — табличные данные по [45], 2 — аппроксимирующая кривая по формуле (6.12), 3 — формула (6.11) из ГОСТ [10], 4 — формула (6.13) по [29].

Покажем самую простую зависимость [29], соответствующую нижней границе реального диапазона допускаемых напряжений.

$$\tau_{-1д} = Rm / 22. \quad (6.14)$$

Коэффициент 22 соответствует значению $K_d = 22/3 = 7.33$.

Формула из работы [45] для расчета допускаемой амплитуды напряжений от крутильных колебаний имеет следующий вид

$$\tau_{дон} = \tau_{-1} \frac{K_u \varepsilon_\tau}{K_\tau \eta} (1 + a(1 - r)). \quad (6.15)$$

В этой формуле обозначены: τ_{-1} — предел выносливости материала при кручении; K_u — коэффициент упрочнения материала; K_τ — коэффициент концентрации, a — коэффициент, учитывающий влияние среднего крутящего момента и быстроту накопления усталостных явлений (табл. 6.3); η — условный запас прочности, компенсирующий неточность расчетных формул, не учет напряжений вынужденных колебаний от всех других гармоник возмущающего момента, напряжения изгиба и пр. (табл. 6.3); r — отношение рассматриваемой частоты вращения вала к номинальной, ε_τ — коэффициент влияния абсолютных размеров сечения вала, вычисляемый по эмпирической формуле

$$\varepsilon_{\tau} = 0.48 \frac{3 + \sqrt{0.1d}}{1 + \sqrt{0.1d}}, \quad (6.16)$$

где d — диаметр вала, мм.

Таблица 6.3

Коэффициенты к формуле (6.15)

Тип вала и характер его нагружения	η	a	
		$0 < r \leq 1$	$1 < r \leq 1.2$
Промежуточные валы, не испытывающие знакопеременного изгиба	1.6	+0.6	- 3
Промежуточные и коленчатые валы, испытывающие знакопеременный изгиб	2.0	+0.8	-4

Примечание. Для буксиров, ледоколов, траулеров и других судов, длительно эксплуатирующихся на различных режимах при многократном маневрировании, реверсировании и пусках следует в формуле (6.15) положить $r = 1$

Из формулы (6.16) можно получить выражения для определения коэффициентов, входящих в общую формулу (6.15).

$$K(r) = 1 + a(1 - r), \quad (6.17)$$

$$K_{\sigma} = \frac{K_{\tau} \eta}{K_u \varepsilon} = \frac{2K_{\tau}}{K_u \left(0.48 \frac{3 + \sqrt{0.1d}}{1 + \sqrt{0.1d}} \right)}. \quad (6.18)$$

Коэффициент упрочнения $K_u = 1$ для не упрочненных валов (принимается по умолчанию). Для упрочненных валов $K_u > 1$. Он устанавливается по приложениям работы [45] или ГОСТ 25. 501 - 82. Формула (6.18) позволяет рассчитывать допускаемые напряжения для цилиндрических ступенчатых валов путем определения коэффициента концентрации по соответствующим таблицам приложений к методике Терских. Однако, непосредственно для коленчатого вала там указаний не приводится.

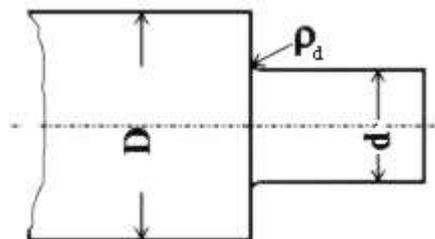


Рис. 6-5. Эскиз ступенчатого вала

Поэтому была выдвинута гипотеза о возможности использования для этой цели некоего эквивалентного ступенчатого вала (рис. 6-5), имеющего два участка — с большим диаметром D и малым диаметром d . На переходе от малого к

большому участку имеется галтель радиусом ρ_d .

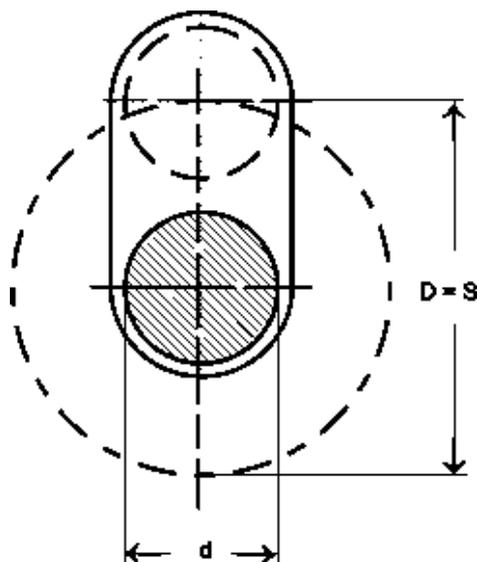


Рис. 6-6. Расчетная модель коленчатого вала

Для того, что бы использовать эту модель, колено коленчатого вала было заменено эквивалентным ступенчатым валом у которого малый диаметр d равен диаметру шейке вала, а большой диаметр D — двум радиусам кривошипа, равным ходу поршня двигателя S (см. рис. 6-6).

Предполагалось, что такая аппроксимация позволит учесть коэффициент перекрытия шеек. Выполненные затем расчеты показали, что оптимальное решение удалось найти при некотором постоянном значении D/d . Кроме этих моделей, были изучены варианты учета концентраций напряжений для масляного отверстия в шейке вала и для случая прессовой посадки у составных валов малооборотных дизелей. Для того, что бы избежать использования таблиц были проведены специальные корреляционные исследования табулированных функций и получены следующие алгоритмы расчета коэффициента концентрации напряжений с минимальной погрешностью для расчетов по формуле Терских (6.15).

Для галтели при аппроксимации колена коленчатого вала эквивалентным ступенчатым валом с учетом перекрытия шеек имеем

$$K_{\tau} = 1 + \frac{0.75 + 0.0005 Rm}{14.663 \rho + 2.134 \left(\frac{d}{S} \right)^{2.678}} \cdot \quad (6.19)$$

Для галтели при аппроксимации колена коленчатого вала эквивалентным ступенчатым валом без учета перекрытия шеек имеем

$$K_{\tau} = 1 + \frac{1.25 + 0.0009 Rm}{25 \rho + 1} \cdot \quad (6.20)$$

Для масляного отверстия по ориентировочным данным (для относительного диаметра отверстия от 0.05 до 0.25) получено

$$K_{\tau} = 1.565 + \frac{Rm}{2800} \cdot \quad (6.21)$$

Для прессовой посадки составных валов можно принять

$$K_{\tau} = \sqrt{\frac{Rm}{156}} \cdot \quad (6.22)$$

Искомые формулы, предназначенные для последующей оценки достоверности расчетов допускаемых напряжений, были установлены путем сравнения между собой результатов расчета для коленчатых валов трех условных двигателей — малооборотного (МОД) с наиболее низкими показателями прочности, среднеоборотного (СОД) с умеренными показателями и высокооборотного (ВОД) с наиболее высокими показателями. Характеристики этих двигателей показаны в табл. 6.4. По этим исходным данным были рассчитаны коэффициент концентраций напряжений K_{τ} , коэффициент снижения предела прочности коленчатого вала K_{np} и допускаемые напряжения $\tau_{дон}$ для рассмотренных выше вариантов расчетных моделей. Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 6.5, показал, что для оценки достоверности расчета допускаемых напряжений следует выбрать формулу (6.15) в которую подставляются величины, определяемые по формулам (6.19), (6.20), (6.21) и (6.22). Основным этапом исследования стала разработка алгоритмов и программ расчета допускаемых напряжений кручения в коленчатых валах дизелей с учетом требований ГОСТ 25.504-82. В своей совокупности получена новая методик на основе современных технологий компьютерного моделирования.

Таблица 6.4

Исходные данные о коленчатых валах типовых дизелей

Тип дизеля	d/S	Rm, МПа	d, мм	ρ
МОД	0.360	440	600	0,050
СОД	0.450	600	250	0,075
ВОД	0.650	900	100	0,100

Полная версия новой методики расчета, реализуемая в виде законченного программного продукта, включает в себя ряд последовательных операций. Исходными данными для расчета по этой методике являются: ход поршня двигателя S (мм), диаметр шейки коленчатого вала (минимальный) d (мм), радиус галтели ρ_2 (мм), марка материала (легированная или углеродистая сталь), предел прочности Rm (МПа), шероховатость поверхности Rz , коэффициент упрочнения поверхности (выбирается в зависимости от способа и технологии упрочнения по ГОСТ [10]).

Результаты сравнительных расчетов допускаемых напряжений

Формулы	Тип двигателя								
	МОД при d = 600 мм			СОД при d = 250 мм			ВОД при d = 100 мм		
	К _τ	К _{пр}	τ _{-доп}	К _τ	К _{пр}	τ _{-доп}	К _τ	К _{пр}	τ _{-доп}
(6.15) и (6.19)	2.13	28.84	15.26	1,78	22.21	27.01	1.56	17.57	51.22
(6.15) и (6.20)	1.73	23.49	18.73	1.62	20.28	29.58	1.59	17.88	50.33
(6.15) и (6.20) при ρ = 0.05	1.73	23.49	18.73	1.80	22.44	26.73	1.92	21.56	41.74
(6.15) и (6.21)	1.72	23.36	18.84	1.78	22.24	26.98	1.89	21.24	42.38
(6.15) и (6.22)	1.68	22.78	19.31	1.96	24.52	24.47	2.40	27.04	33.28
(6.14)	—	22.00	20.00	—	22.00	27.27	—	22.00	40.91

По перечню исходных можно судить о том, что новая методика учитывает больше факторов, чем рассмотренные выше методы.

Если вернуться к основной формуле расчета допускаемых напряжений (6.1), то коэффициент снижения предела выносливости K_d в этой методике оценивается произведением двух величин: $K_{баз}$ — коэффициента снижения предела выносливости при базовом числе циклов ($N_{баз} = 2 \cdot 10^6$) и K_N — коэффициента учета фактического числа циклов работы коленчатого вала.

$$K_d = K_{баз} K_N \quad (6.23)$$

Определение коэффициента снижения предела выносливости при базовом числе циклов начинается с расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений заготовки $\alpha(\rho, d, S)$, учитывающий относительный радиус галтели $\rho = \rho_r / d$ и фактор перекрытия шеек S/d .

В методике уделяется большое внимание учету масштабного фактора путем расчета таких параметров как относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентрации напряжений и относительный критерий подобия усталостного разрушения детали и образца, коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений и масштабному фактору. По этим параметрам затем определяются функция учета абсолютных размеров и общий коэффициент учета влияния концентрации напряжений и абсолютных размеров

В отличие от методики [45], где факторы влияния абсолютных размеров и концентрации напряжений определяются по двум разным формулам, в ГОСТ эти факторы явно не разделены и учитываются в более сложном алгоритме определения $K_{ад}$. Кроме того, ГОСТ учитывает влияние марки материала на усталостную прочность с помощью коэффициента влияния абсолютных размеров заготовки KI . Для углеродистой стали этот коэффициент $KI = 1$. Для легированной стали при $d > 150$ мм величина $KI < 1$. Еще один коэффициент KF позволяет учесть шероховатость Rz поверхности шеек вала.

Расчет коэффициентов, учитывающих влияния основных факторов на несущую способность вала при кручении, позволяет затем найти общий коэффициент снижения предела выносливости для базового числа циклов по следующей основной формуле

$$K_{\text{баз}} = \left(K_{\tau d} + \frac{1}{KF} - 1 \right) \frac{1}{K_u K_1}. \quad (6.24)$$

Важной особенностью новой методики является то, что она учитывает накопление усталостных циклов за требуемый срок службы коленчатого вала (например, за 60000 часов для среднеоборотных и 120000 часов — для малооборотных судовых дизелей).

Если за частоту изменения тангенциальных суммарных напряжений в коленчатом валу принять частоту рабочего цикла двигателя, то требуемый ресурс детали соответствует условным 10^9 циклам изменения суммарных напряжений, что в 500 раз больше базового числа циклов.

ГОСТ [10] позволил определить наиболее вероятную степень кривой усталости $m = 5$ и значение соответствующего ей коэффициента учета фактического числа циклов работы коленчатого вала K_N .

Выполнение расчетов допускаемых напряжений для ряда двигателей по рассматриваемой методике и методикам, которые выше были рекомендованы для оценки достоверности расчета допускаемых напряжений, позволили установить величину $K_N = 2.717$ и получить формулу для коэффициента учета относительной частоты вращения для любого значения $r > 1/500$:

$$K(r) = \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6.25)$$

Таким образом, новая формула для расчета допускаемых напряжений может быть записана в следующем виде

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{\tau_{-1}(Rm)}{2,717 K_{\text{баз}}} \cdot \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6.26)$$

Для проверки достоверности этой методики фактические суммарные напряжения в коленчатых валах ряда ДВС были сравнены с допускаемыми напряжениями, определенные всеми указанными выше методами, а именно: по новому алгоритму (6.26); по формуле (6.14); по формуле (6.15), в которую подставляются величины, определяемые по формулам (6.19), (6.20), (6.21) и (6.22), а также по действующей формуле правил РС. Исходные данные, которые удалось получить для решения поставленной задачи, приведены в табл. 6.6, а результаты определения допускаемых напряжений перечисленными методами сведены в таблицу 6.7.

Результаты поверочных расчетов, во-первых, подтвердили ранее сделанное заключение о том, что правила РС дают заниженное значение допускаемых суммарных напряжений.

Исходные данные для поверочных расчетов

№	Двигатель	Диаметр, мм	Материал*	Радиус галтели
1	8VD18\16VD	115	1000 (лег)	7
2	6M25	193	930 (угл)	23
3	8ДКРН60/225	730	590 (угл)	55
4	6ДКРН72/250	780	550 (угл)	39
5	8чн17/21,5	136	1000 (лег)	7
6	M43	380	860 (угл)	28
7	ЗД6	85	1100 (лег)	5
8	8NVD48	200	560(угл)	15
9	6ДКРН70/120	480	500 (угл)	30

Примечание. Обозначение *: угл — углеродистая сталь, лег — легированная сталь

Во-вторых, было показано, что для номинальной частоты вращения результаты расчета допускаемых напряжений по новому методу и по методу, основанного на формуле (6.15), практически совпадают в широком диапазоне изменения характеристик коленчатых валов и хорошо согласуются с рекомендациями [29].

При этом фактические суммарные напряжения от крутильных колебаний коленчатых валов исследованных двигателей, которые не удовлетворяли требования правил РС, оказались меньше допускаемых, определенных по новому методу.

Тем самым подтверждена достоверность предлагаемого метода оценки допускаемых напряжений основанная на ГОСТ и целесообразность использования его алгоритма для разработки новой формулы РС.

Вопрос о форме кривой допускаемых напряжений при относительных оборотов $r < 1$ требует дополнительного обсуждения.

Линейные зависимости допускаемых напряжений от оборотов типа (6.17), которые применяются в формулах РС и (6.15), имеют явно субъективное происхождение и основаны на попытках учесть длительность работы валов на различных режимах. При этом в правилах РС разрешается для зон оборотов, не предназначенных для длительной работы, увеличивать допускаемые напряжения не только в соответствии с этой линейной функцией (6.17), но еще и за счет умножения на коэффициент $K_{кр}$, который равен 2 — для главных и 5 — для вспомогательных двигателей. В результате напряжения, допускаемые для быстрого прохода оборотов, могут оказаться неправдоподобно высокими (до 200 МПа). С другой стороны в комментариях к формулам (6.15) и РС сказано, что для буксиров, ледоколов, траулеров и других судов, длительно эксплуатирующихся на различных режимах при многократном маневрировании, реверсировании и пусках следует положить $r = 1$. Такие допускаемые напряжения принимаются постоянными величинами для всего диапазона эксплуатационных оборотов. Эти противоречия снимаются в случае применения предлагаемой формулы (6.26) для зон частот вращения, предназначенных для длительной работы.

Для запретных зон оборотов, которые разрешены для быстрого прохода, суммарные напряжения могут превышать некоторого критического уровня

$$\tau_{кр} = K_{кр} \tau_{дон}. \quad (6.27)$$

Таблица 6.7

Результаты поверочных расчетов

№	Двигатель	Формула или данные					Режим работы
		новая (6.26)	(6.15)	(6.14)	РС	Фирмы	
1	8VD18\16VD	46.754	47.138	45.455	28.780	40	r = 1
2	6M25	50.339	50.177	42.273	27.344	44	r = 1
3	8ДКРН60/225	26.387	26.47	26.618	18.961	28.5	r = 1
4	6ДКРН72/250	22.597	22.366	25	17.852		r = 1
5	8чн17/21.5	45.622	44.246	45.455	28.319		r = 1
6	M43	40.649	38.551	39.091	25.677		r = 1
7	3Д6	54.229	55.083	50	38.967	52	r = 1
8	8NVD48	28.428	28.496	25.455	20.438	23	r = 1
9	6ДКРН70/120	23.1	24.7	22.73	19.7	17.3	r = 0.83

В данном случае $\tau_{кр}$ логично принять равным пределу выносливости детали при базовом числе циклов, поскольку суммарное число циклов, накопленное за весь срок службы двигателя при быстрых проходах резонансных зон наверняка не превысит базового числа циклов $N_G = 2 \cdot 10^6$. Это значит, что коэффициент $K_{кр}$ будет изменяться от 2.36 при минимально-устойчивых оборотах до 2.72 — при номинальных оборотах.

В результате выполненного исследования были получены рабочие формулы и программы для расчета допускаемых суммарных напряжений от крутильных колебаний коленчатых валов дизелей, которые приведены на фрагментах программ работы [23].

7. Контроль технического состояния техники

7.1. Постановка задачи

Контроль технического состояния машин и их элементов в процессе их эксплуатации является необходимым условием обеспечения их требуемого качества и надежности. Существует множество методов и средств контроля технического состояния. В зависимости от этапа жизненного цикла эти методы можно условно разделить на следующие группы: функциональный контроль технического состояния при работе машины, дефектация деталей и узлов разобранной машины и техническое диагностирование элементов машин без существенной разборки при их эксплуатации.

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

Во время плановых ремонтов осуществляется дефектация, т.е. более 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.

Как было показано, 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, что бы гарантировать безотказную работу любого, даже самого некачественного экземпляра машины, в межремонтный период эксплуатации.

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

Этим и определяется актуальность проблемы контроля (мониторинга) внутренних элементов машины без ее разборки. Такую задачу призвана решать

техническая диагностика — область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. При этом сам процесс определения технического состояния объекта принято обозначать термином техническое диагностирование (или просто — диагностирование), которое 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.

Наибольший эффект можно получить при системном подходе к решению данной проблемы. Системой диагностирования (контроля) называется совокупность средств, объектов и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации [9]. Поэтому для организации такой работы необходимы разумные затраты на приобретение средств диагностирования и документации, а так же на обучение и повышение квалификации исполнителей.

7.2. Средства и методы диагностирования

Классификация средств. В зависимости от задач в области применения методов и средств технической диагностики (СТД) их можно классифицировать по разным признакам. Прежде всего, СТД можно подразделить на штатные и специализированные. К штатным СТД относятся инструменты, приборы и системы контроля технического состояния, 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 решение можно считать весьма актуальной тематикой научных исследований. Согласно ГОСТ [9] 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 СТС для контроля конкретных параметров, например, температуры выхлопных газов с помощью термометров, давления наддува дизеля с помощью манометров, расхода топлива или пара с помощью расходомера и т.д.

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

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

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

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

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

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

параметрические методы;

инструментальные методы;

методы диагностирования по герметичности замкнутых полостей;

виброакустические методы;

электрические и электромагнитные методы;

теплоизмерительные методы;

методы оценки износа по содержанию металла в масле и выхлопных газах;

методы неразрушающего контроля деталей и материалов (дефектации) и др.

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

Устройство СТД. В общем случае любое СТД состоит из следующих элементов (блоков): источник воздействия (при тестовом методе), датчик, каналы связи, усилитель и преобразователь сигнала, блоки измерения, расшифровки и регистрации (записи) диагностического параметра, блок накопления и обработки информации (рис. 7-1). 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).

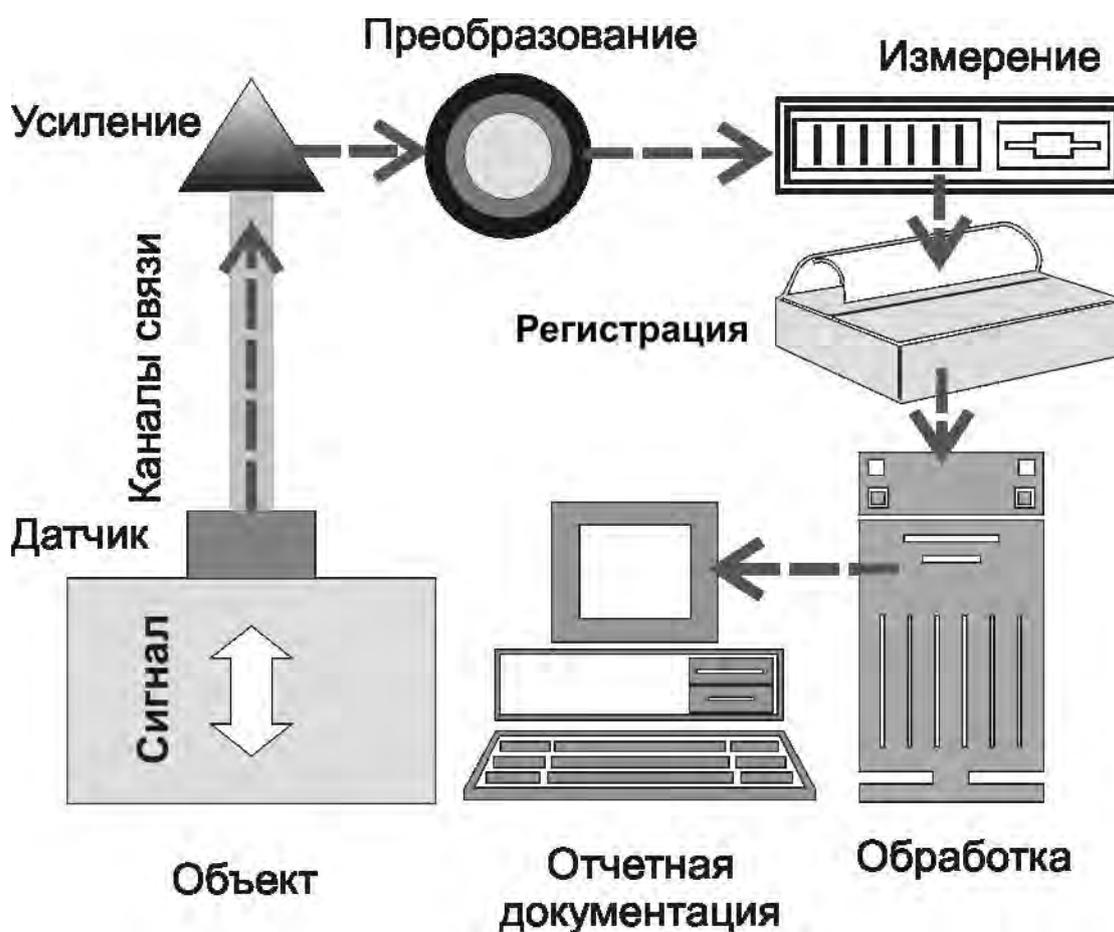


Рисунок 7-1 Основные блоки средств технической диагностики

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 и преобразуют исследуемые физические показатели сначала в электрические, а затем уже с помощью преобразователей напряжение-код — в цифровые величины.

7.3. 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. Поэтому предлагается следующее уточнение понятия.

Диагностический параметр — это физическая величина, непосредственно замеряемая средством диагностирования и функционально зависимая от степени повреждения исследуемого внутреннего элемента машины. 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.

Важнейшим критерием оценки технического состояния СТС являются номинальные, допустимые и предельные значения диагностических параметров.

Номинальный диагностический параметр соответствует начальному (идеальному) техническому состоянию изделия, в котором оно находится после изго-

товления или ремонта и периода приработки деталей.

Допустимый диагностический параметр характеризует переход от нормально-го технического состояния к нестабильному, когда дальнейшая эксплуатация возможна, но повышается вероятность отказа.

Предельный диагностический параметр соответствует переходу в опасную зону эксплуатации, когда вероятность отказа очень высокая (более 50 %).

Таким образом, номинальный, допустимый и предельный диагностические параметры характеризуют поля работоспособности машины, которые можно разбить на три зоны (рис. 7-2):

зона уверенной эксплуатации, ограниченная номинальной и допустимой величиной диагностического параметра;

зона неуверенной эксплуатации, требующая восстановления номинальной величины в удобное время и ограниченная допустимой и предельной величиной диагностического параметра;

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

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

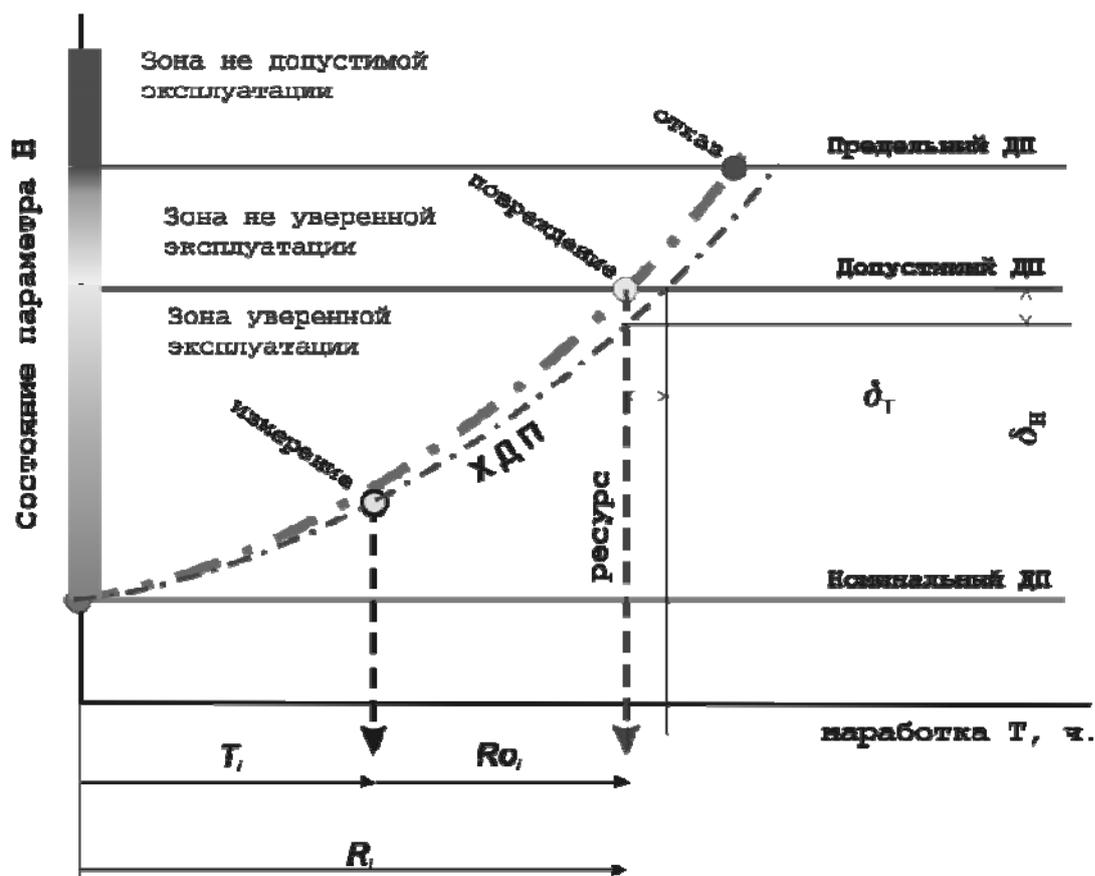


Рисунок 7-2 Принцип прогнозирования остаточного ресурса

Например, система непрерывного контроля вибрации типа VIB-20 (фирма SPM INSTRUMENT, Австрия) настроена по следующим критериям оценки скорости вибрации (мм/с): номинальная — не более 1.1, допустимая — 4.5 и предельная — 11. В данном случае диагностическим параметром является скорость вибрации от неуравновешенных сил инерции масс машины, которая может возрасти из-за увеличения дисбаланса по мере износа подшипников (рис. 7-2)

В системе сигнализации имеется два диапазона измерения скорости вибрации — ALERT и ALARM. Уровень ALERT, это диапазон измерения скорости вибрации в диапазоне от 1.1 до 4.5 мм/с. Эта ступень предусмотрена для контроля медленного повышения уровня вибраций машины, вызванного износом и незначительными дефектами. По достижении установленного значения (барьера) дается сигнал обслуживающему персоналу. Уровень ALARM служит для защиты от неожиданных опасных повышений уровней вибраций, как например дисбалансы, вызванные повреждениями набора лопаток и промежуточных элементов. Посредством реле включается сигнальное предупредительное устройство и/или производится аварийное отключение. Сигнальный барьер может быть установлен на многократное (от 1 до 3х-кратного) значение ALERT. Подходящие для каждого типа машин предельные значения определяются по соответствующим международным стандартам.

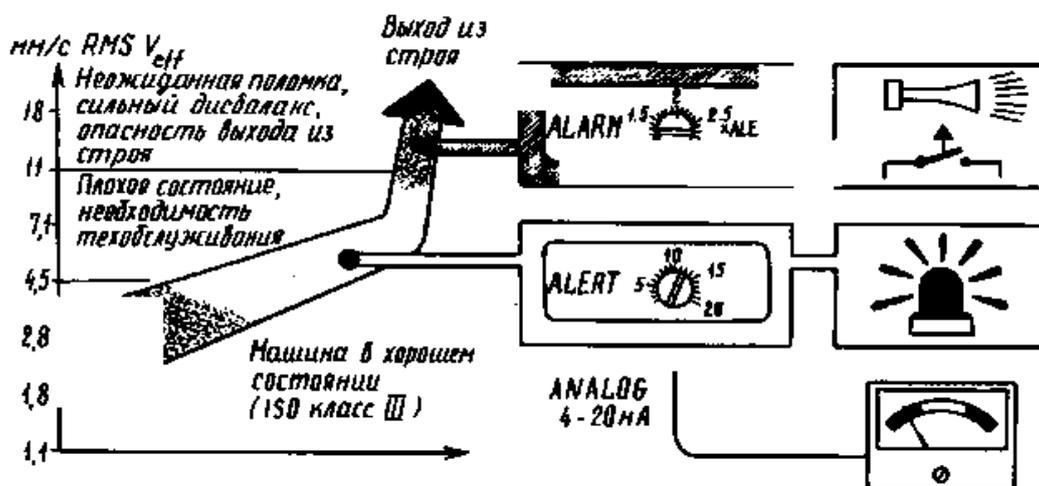


Рисунок 7-3 Схема сигнализации о достижении допустимого и предельного уровней диагностирования

К наиболее важной задаче диагностирования относится прогнозирование технического состояния техники. Согласно ГОСТ [9] этим термином обозначается процесс определения технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Поэтому целью прогнозирования может быть оценка либо общего ресурса объекта R , либо остаточного ресурса R_0 .

Как показано на рис. 7-2, для этого, кроме указанных выше критериев предельного состояния, необходимо располагать характеристикой диагностического параметра (ХДП), т.е. зависимостью изменения диагностического параметра H от времени T .

ХДП определяется путем периодического измерения диагностического параметра H при наработках T с одновременным построением по этим точкам аппроксимирующей функции вида

$$H = f(T) \pm \delta_H, \quad (7.1)$$

где δ_H — среднеквадратичное отклонение износа

Введение в функцию (7-1) величины δ_H означает, что методика прогнозирования ресурса должна учитывать вероятностную природу ХДП не смотря на то, что коэффициент вариации износостойкости при диагностировании одного объекта обычно заметно меньше, чем в случае разработки нормативов по данным большой выборки. Поэтому прогнозируемый ресурс приходится определять по нижней границе его рассеивания. с учетом среднеквадратичной ошибки путем решения уравнения с применением метода наименьших квадратов. Решение этой задачи показано в разделе 3.2 при рассмотрении вероятностной модели типа «Тренд» для двух вариантов аппроксимации ХДП — степенной и линейной. Было рекомендовано отдавать предпочтение линейным моделям, поскольку они имеют более спокойные тренды по сравнению со степенными моделями.

Для демонстрации практического применения методов прогнозирования технического состояния рассмотрим пример мониторинга изнашивания конкретного узла трения — цилиндровой втулки судового двигателя внутреннего сгорания.

7.4. Пример мониторинга изнашивания узла трения

Задачи исследования. В этой книге рассмотрен пример мониторинга изнашивания зеркала втулки цилиндров дизеля 8NVD-48 с целью решения следующих задач:

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

Исходные данные [51] . По данным документации этого дизеля, для цилиндровой втулки предельно-допустимой износ составляет 2.1 мм, который не должен быть превышен после отработки назначенного ресурса до среднего ремонта, равного 24 тыс. ч. При этом предельная норма для износа на эллипс составляет 0.6 мм. Поскольку, эти параметры определяются непосредственным измерением линейных значений износа, то они одновременно являются и диагностическими параметрами.

Выбор средств измерений. В соответствии с правилами технического обслуживания и ремонта рассматриваемых дизелей износ зеркала цилиндров должен выполняться с помощью индикаторного нутромера НИ по ГОСТ 868-72. Такие нутромеры выпускаются для различных диапазонов диаметра отверстий от 6 до 1000 мм. Например возможна поставка нутромеров с комплектацией

наконечников следующих размеров: 7—10, 10—18, 250—450, 700—1000 мм. Для данного двигателя ($D = 320$ мм.) выбрана комплектация 250—450 мм. Основные элементы конструкции подобного нутромера показаны на рис. 7-4.

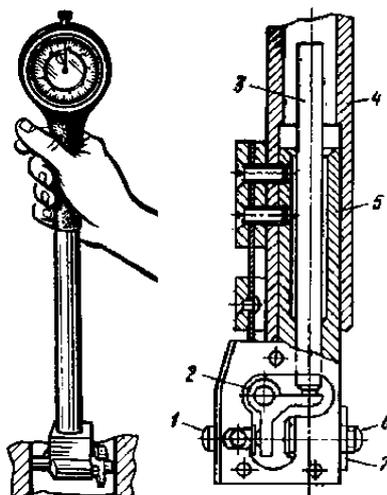


Рисунок 7-4 Обозначения: 1 — подвижный стержень, 2 — рычаг, 3 — шток, 4 — трубка, 5 — корпус, 6 — неподвижный стержень, 7 — контргайка

Иностранные фирмы создают подобные нутромеры с применением цифровых технологий с возможностью автоматизированного ведения протокола результатов измерений на ПК. Путем поиска в Интернете современных мерительных инструментов был выбран нутромер фирмы SYLVAC (рис. 7-5).

Нутромеры Серия CBG: Нутромеры CBG — это быстрое и простое измерение размеров отверстий, овальности, конусности. Центрируются по трем точкам, производят измерения по двум. Эта серия позволяет производить измерения на большом диапазоне одним нутромером.

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

Обозначения:

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

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

Техническое описание:

Запатентованная измерительная система SYLVAC,

Измерительный диапазон 12.5 — 600 мм,

Вывод данных RS232,

Отражает фактический или относительный диаметр

Конструкция прибора:

Трехточечное центрирование, двухточечное измерение,

Твердосплавные наконечники,

Термически изолирован для обеспечения стабильности показаний,

Легкий и удобный в обращении,

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

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

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



Рисунок 7-5 Нутромер серии CBG

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

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

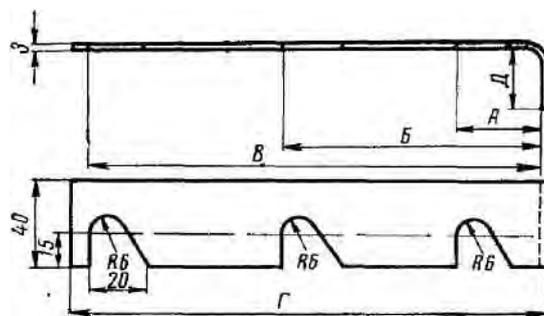


Рисунок 7-6 Рейка-шаблон.

Таблица 7.1

Характеристики рейки-шаблона

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

Измерения выполняются в трех горизонтах по высоте.

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

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

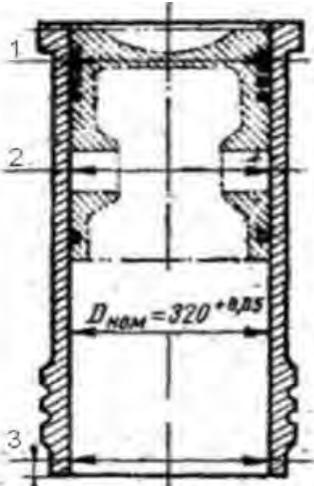
Горизонт 3 расположен на 15 мм выше нижней кромки втулки.

Обмеры втулок цилиндров производятся с обязательным использованием рейки-шаблона, позволяющей выполнять обмеры всегда в одних и тех же местах. Эскиз рейки-шаблона с указанием размеров по табл. 7.1 применительно к двигателям типа *NVD-48*, *NVD-36* и *NVD-24* приведен на рис. 7-6. Рейки-шаблоны изготавливаются ремонтными предприятиями для каждой марки ремонтируемых двигателей и используются ОТК этих предприятий и машинными командами. Хранятся рейки-шаблоны на судне и в ОТК ремонтного предприятия. Результаты измерений по горизонтам оформляются в стандартных картах обмеров по инструкции фирмы—изготовителя дизеля (см. табл. 7-2). При этом для каждого измерения должны рассчитываться следующие параметры по вращению и по оси вала (мм): максимальный износ по диаметру и максимальная эллиптичность. На основании сравнения результатов измерений с допускаемыми износами в карте делается запись о допуске цилиндрических втулок в эксплуатацию.

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

Таблица 7.2

Карта измерений износов цилиндровой втулки судового дизеля

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

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

Результаты таких измерений рекомендуется оформлять в картах обмеров по форме табл. 7.2. Карта заполняется для каждой втулки в отдельности по мере выполнения каждого i — го измерения с регистрации даты, фактической наработки T_i и результатов измерений диаметра втулки в плоскостях по вращению $D1_i$ и по оси $D2_i$ коленчатого вала. Эти данные предназначены для расчета максимального износа H_i и эллиптичности E_i для каждого i — го измерения по формулам

$$\begin{aligned} H_i &= D1_i - D_o, \\ E_i &= D1_i - D2_i. \end{aligned} \quad (7.2)$$

где D_o — номинальный (построечный) диаметр втулки, мм.

Прогнозирование остаточного ресурса. Определение параметров H_i и E_i входят в состав вычислительных операций по прогнозированию остаточного ресурса путем корреляционного анализа статистической зависимости износа от наработки втулки. Кроме указанных переменных параметров для решения этой задачи необходимо знать постоянные параметры: номинальный (построечный) диаметр втулки D_o , предельно допустимый износ H_d , допустимую эллиптичность E_d , а так же назначенный ресурс втулки до ремонта Rn и возможная периодичность измерений износа tk .

В нашем случае, на основании документации по данному дизелю, применяются такие постоянные величины:

$$D_o = 320.01 \text{ мм}, H_d = 2.1 \text{ мм}, E_d = 0.6 \text{ мм}, Rn = 24 \text{ тыс.ч и } tk = 6 \text{ тыс.ч.}$$

Существуют различные способы корреляционного анализа парных значений переменных (случайных) величин X и Y путем составления и решения уравнения регрессии вида (2-42). Эта задача решается с применением метода наименьших квадратов, что показано в разделе 2.6.6. Корректность решения поставленной задачи в первую очередь зависит от выбора вида предполагаемой функции $Y(X)$.

В данном примере предлагается использовать вероятностную модель ВМ типа «Тренд» с линейной характеристикой (см. фрагменты 3-7 и 3-8)

$$T(H) = A + B \frac{H}{H_d} + \begin{pmatrix} +\Delta_T \\ -\Delta_T \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

Обратная функция износа от наработки будет иметь следующий вид

$$H(T) = \left[a + bT + \begin{pmatrix} +\Delta_u \\ -\Delta_u \end{pmatrix} \right] H_d, \quad (7.4)$$

где Δ_T — среднеквадратичное отклонение наработки от средней линии, образующая доверительные границы ресурса, Δ_u — среднеквадратичное отклонение износа от линии, образующая доверительные границы износа.

Результаты измерений износа

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

На фрагменте 7-1 показана процедура ввода исходных данных для каждого i -го замера при заданном последнем номере замеров m . При этом номер m устанавливается (заменяется) на заключительном этапе вычислений (см. фрагмент 7-4).

Во второй части фрагмента выполняется первый этап вычисления параметров корреляционного уравнения: коэффициента корреляции, среднеквадратичных отклонений (СКО) по осям и параметры A и B .

Особенностью данного корреляционного анализа является то, что здесь применена так называемая центральная корреляции при которой ее параметры справедливы для решения как для прямой, так и обратной задачи.

На фрагменте 7-2 приводятся обоснования искомых функций наработки от износа (прямая задача) и износа от наработки (обратная задача). Полученные функции позволяют вычислять как их математическое ожидание, так и нижнюю и верхнюю доверительные границы с учетом СКО. Это демонстрируется графиком на второй части фрагмента 7-2.

Третий фрагмент 7-3 посвящен прогнозированию полного и остаточного ресурса до наступления предельного износа. При этом там показаны программы логического анализа для выработки решения о возможности работы детали до следующего замера (т.е. допуска в эксплуатацию).

На последнем фрагменте 7-4 приводятся таблицы с исходными данными и основными результатами расчета, которые составляются автоматически по специальной программе (на фрагментах они не показаны). При этом к просмотру этого фрагмента можно переходить сразу же после установки следующего номера замера, перехода в начало программы путем нажатия на этикетку «Нажать для перехода в начало» и ввода в вектора исходных данных (фрагмент 7-1) новых замеров.

Эти процедуры повторяются до тех замеров, пока вместо решения «допустить» или «пропустить» появится рекомендация о выполнении ремонта детали. В заключении можно составить итоговую таблицу по всем измерениям по специальной программе для просмотра истории изнашивания втулки в период ее эксплуатации.

**Прогнозирование технического состояния
по результатам диагностирования объекта**

Объект исследования : износ цилиндрической втулки дизеля

Постоянные исходные данные:

Номинальный диаметр $h_0 := 320.01$

Предельный износ $U_d := 2.1$

Предельный эллипс $O_{vd} := 0.6$

Назначенный ресурс $R_N := 24$

Периодичность измерений $R_n := 6$

Переменные исходные данные :

число замеров $m = 5$ устанавливается в конце программы (НАЖАТЬ 2 РАЗА).

Наработка до замера t_{1_i} , размер по вращению h_{1_i} и размер по оси h_{2_i}

вводятся в вектора для каждого i - го замера в диапазоне $i := 0.. m - 1$

$t_{1_i} :=$

$h_{1_i} :=$

$h_{2_i} :=$

0
7.2
10
18
25
31
37
42

h_0
320.7
321.01
321.2
321.5
321.8
322.1
322.5

h_0
320.65
320.95
321.12
321.4
321.75
322.06
322.45

$t_{1_{m-1}} = 25$

Вычисление переменных износов и эллиптичности

$$U_{1_i} := h_{1_i} - h_0 \quad O_{v_i} := h_{1_i} - h_{2_i}$$

Максимальная эллиптичность $\max(O_v) = 0.1$

Расчет параметров уравнения линейной регрессии

Вводим обозначения случайных переменных

$$x_i := \frac{U_{1_i}}{U_d} \quad y_i := t_{1_i}$$

Анализ проводится по центральной корреляции с одинаковыми параметрами для прямой и обратной функций

вычисляем коэффициент корреляции $rh := \text{corr}(x, y) \quad rh = 0.953$

Доверительные границы

$$\Delta x := \sqrt{(1 - rh^2) \cdot \text{Var}(x)} \quad \Delta y := \sqrt{(1 - rh^2) \cdot \text{Var}(y)}$$

Получение прямой функции наработки (ресурса) от износа

$$B := rh \cdot \frac{\sqrt{\text{var}(y)}}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot rh^2}} \quad B = 35.813$$

Фрагмент 7-1

$$\frac{A}{B} := \text{mean}(y) - B \cdot \text{mean}(x) \quad A = -2.865$$

Центральная функция

$$Rb(U1) := A + B \cdot \frac{U1}{Ud} \quad Rb(Ud) = 32.948$$

Функция доверительных границ

$$Rbm(U1) := \left(A + B \cdot \frac{U1}{Ud} \right) + \begin{pmatrix} \Delta y \\ -\Delta y \end{pmatrix} \quad Rbm(Ud) = \begin{pmatrix} 35.872 \\ 30.025 \end{pmatrix}$$

Получение обратной функции износа от наработки

$$B1 := \frac{1}{B} \quad B1 = 0.028 \quad A1 := \text{mean}(x) - B1 \cdot \text{mean}(y) \quad A1 = 0.08$$

Центральная функция

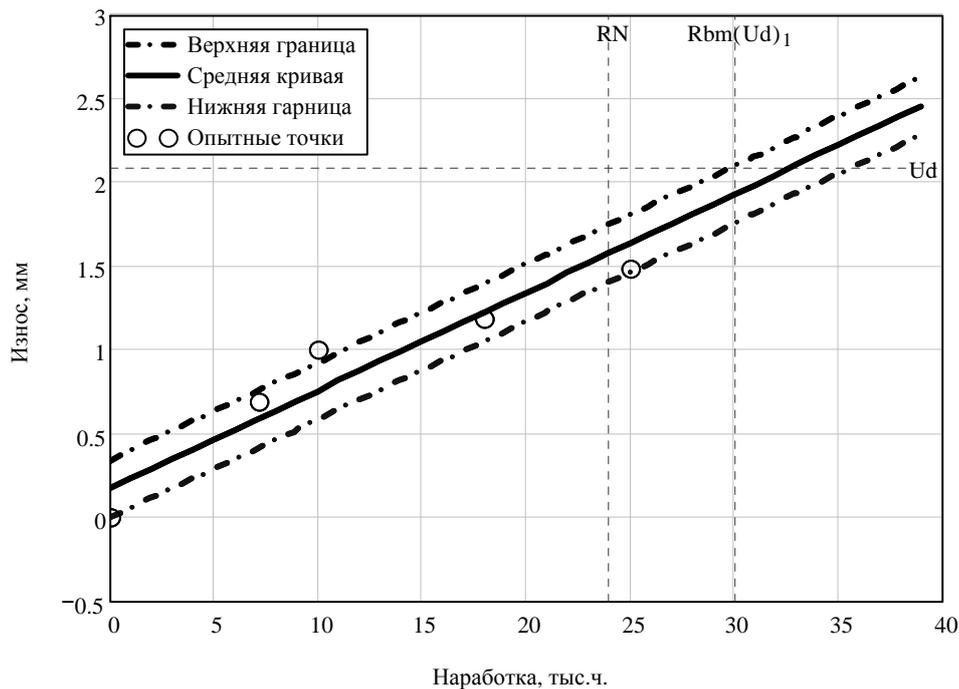
$$hh(T) := (A1 + B1 \cdot T) \cdot Ud \quad hh(24) = 1.575$$

Функция доверительных границ

$$hhm(T) := \left[A1 + B1 \cdot T + \begin{pmatrix} \Delta x \\ -\Delta x \end{pmatrix} \right] \cdot Ud \quad hhm(24) = \begin{pmatrix} 1.747 \\ 1.404 \end{pmatrix}$$

Анализ результатов

Диапазон возможного времени работы изделия $t := 0.. 1.1 \cdot Rbm(Ud)_0$

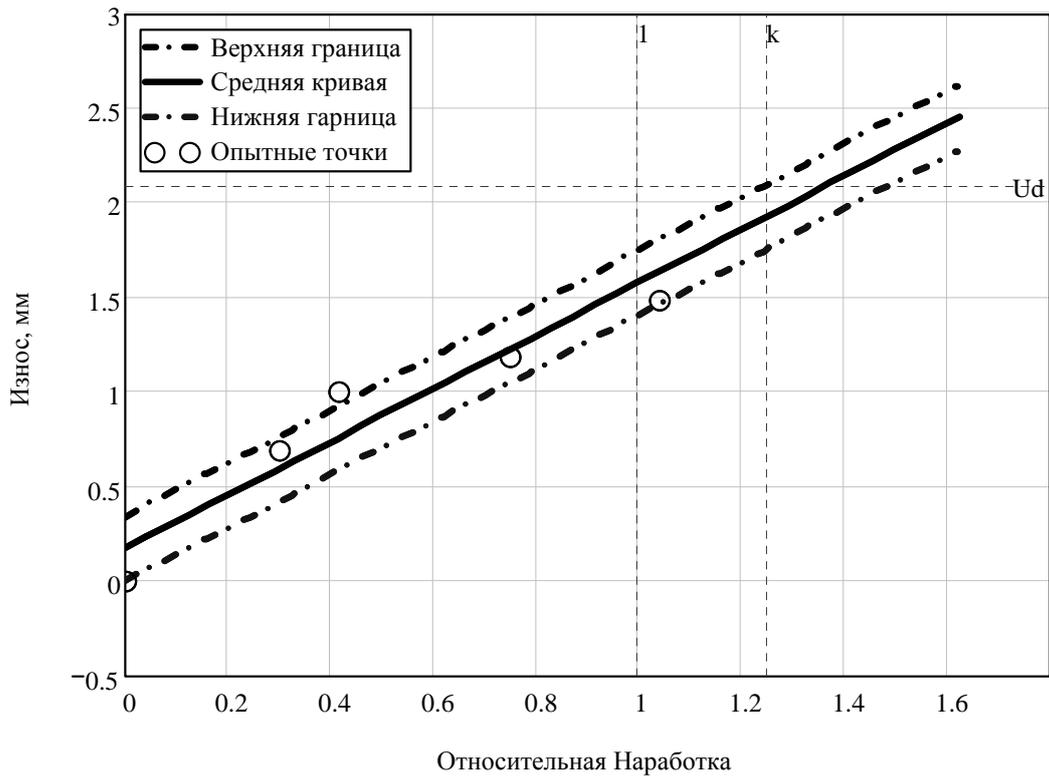


Коэффициенты превышения назначенного ресурса

$$k := \frac{Rbm(Ud)_1}{RN} \quad k = 1.251 \quad k1 := \frac{Rbm(Ud)_0}{RN} \quad k1 = 1.495$$

Фрагмент 7-2 (продолжение Фрагмента 7-1)

График относительной наработки



Проверка соблюдения отработки назначенного ресурса

ОтрРназн := $\begin{cases} \text{"Сомнительна"} & \text{if } k_1 < 0.9 \\ \text{"Вероятна"} & \text{if } 1 > k_1 \geq 0.9 \\ \text{"Уверенная"} & \text{if } 1.8 > k_1 \geq 1 \\ \text{"Наверняка"} & \text{otherwise} \end{cases}$

ОтрРназн = "Уверенная"

Остаточный ресурс

Время замера $t_{1_{m-1}} = 25$ Прогноз ресурса (минимального) $Rbm(Ud)_1 = 30.025$

Остаточный ресурс $ОстРес(m) := Rbm(Ud)_1 - t_{1_{m-1}}$ $ОстРес(m) = 5.025$

Поверочный коэффициент $Kos := \frac{ОстРес(m)}{Rn}$ $Kos = 0.837$

Принятие решения о допуске в эксплуатацию или о необходимости ремонта

Решение := $\begin{cases} \text{"Ремонт"} & \text{if } Kos < 0.80 \\ \text{"Допустить"} & \text{if } 1.8 > Kos \geq 0.8 \\ \text{"Пропустить"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Решение = "Допустить"

Фрагмент 7-3 (продолжение Фрагмента 7-2)

ИсхДан =			Итог =	
"Тыс.ч"	"Замер мм"	"Износ мм"	"Номер m"	5
0	320.01	0	"Наработка"	25
7.2	320.7	0.69	"ПрогнРес"	30.025
10	321.01	1	"ОстРес"	5.025
18	321.2	1.19	"Отработка Rназн"	"Уверенная"
25	321.5	1.49	"Решение"	"Допустить"

Проверить овальность Овал := $\begin{cases} \text{"Нормально"} & \text{if } \max(Ov) \leq Ovd \\ \text{"Брак"} & \text{otherwise} \end{cases}$ Овал = "Нормально"

Все расчеты для m = 5 завершены

Установить новый номер измерений !!

Фрагмент 7-4 (продолжение Фрагмента 7-3)

Пример подобной таблицы приведен в табл. 7.4. Эта таблица подобна табл. 7.3, но в табл. 7.4 показано обоснование решений о допуске втулки в эксплуатацию или выемки для ремонта или замены. Таблица подтверждает актуальность выполнения диагностирования износа деталей машины. Видно, что это позволило не только оценивать возможность допуска в эксплуатацию, но и продлить срок ее службы до 31000 ч по сравнению с плановым ресурсом 24000 ч. Можно отметить, что при выполнении первых двух замеров подтверждался допуск в эксплуатацию втулки на срок до следующего замера, хотя отработка полного ресурса не гарантировалась. Это можно объяснить несколько повышенной скоростью износа в начальный период. Затем скорость износа снизилась и полный ресурс был гарантирован при всех замерах. Однако при шестом замере при наработке 31000 ч пришлось принять решение о ремонте втулки, поскольку остаточный ресурс составил всего 1000 ч при требуемой периодичности замеров 5000 — 6000 ч.

Таблица 7.4

Итоговая таблица анализа результатов измерений износа

Номер m	Наработка, тыс.ч	Полный ресурс, тыс. ч	Остаточный ресурс, тыс.ч	Возможность отработки назначенного ресурса	Решения о допуске
2	7.2	21.913	14.713	Вероятная	Допустить
3	10	21.051	11.051	Сомнительная	Допустить
4	18	26.070	8.071	Уверенная	Допустить
5	25	30.025	5.025	Уверенная	Допустить
6	31	32.029	1.029	Уверенная	Ремонт

Заключение

Читателям, которые имеют обычай знакомятся с любой новой книгой с ее конца, рекомендуем обратить внимание на следующие особенности данного труда и возможные области его применения.

Прежде всего монографию следует рассматривать и применять как учебное пособие по надежности при изучении проблем и дисциплин, связанных с проектированием, эксплуатацией и ремонтом техники. Для этого в первой главе дается конкретная информация о терминах и определениях, которая базируется в основном (но не во всем!) на государственных стандартах в области надежности. Однако, уже на первом этапе изложения можно заметить особый подход автора к обеспечению безотказной долговечности техники. Основная идея базируется на предложенном принципе одинаковых последствий [24] из которого следует классификация оборудования, машин и их элементов с учетом последствий отказов для объекта конечного применения. Исходя из этого принципа были введены понятия о двух уровнях предельного состояния — назначенного и критического, которым соответствуют два вида событий — повреждение и отказ. Тогда задача обеспечения надежности сводится к предупреждению постепенных отказов за счет нормирования и (или) контроля сроков наступления повреждения по мере развития соответствующего ему деградационного процесса. Это позволяет, с одной стороны, грамотно формировать плановую систему технического и обслуживания и ремонта машин (ТОР), но с другой стороны — дает возможность внедрять средства диагностики и корректировать параметры ТОР конкретных экземпляров машин по результатам технического диагностирования при эксплуатации.

Главной особенностью предлагаемой методики является учет вероятностной природы процессов деградации элементов машин (изнашивания, коррозии, усталостных разрушений и пр.). Поэтому при нормировании ТОР предусматривается расчет так называемых гамма-процентных ресурсов для исследуемых процессов деградации, которые характеризуются нормами допустимых вероятностей не достижения предельных состояний γ . Тем самым в расчет ресурса вводится некоторый (часто двойной) запас надежности по сравнению с математическим ожиданием ресурса в зависимости от последствий потенциальных отказов.

Необходимостью расчета гамма-процентного ресурса и других вероятностных показателей оправдано то большое внимание, которое уделяется в этой книге статической обработке информации о случайных событиях и определению параметров теоретических распределений вероятностей. Сложные расчетные операции при решении вероятностных задач теперь легко выполнять на персональных компьютерах в математическом редакторе MATHCAD, который отличается наибольшей простотой и наглядностью. Для этого в книге приводятся многочисленные фрагменты оригинальных программ, составленные в этом редакторе. К подобным программам следует отнести построение эмпирических распределений вероятностей для так называемых цензурированных выборок, позволяющих рассчитывать их матожидание и дисперсию при любом плане

испытаний одним из двух методов — по точкам или по интервалам.

Важно напомнить, что построение эмпирических распределений выполняется здесь с целью расчета параметров двухпараметрических законов распределений (нормального, логнормального, Вейбулла, равномерного и др.) с проверкой согласия между ними и эмпирическим распределением с последующим выбором наилучшего закона по максимальному коэффициенту корреляции. В монографии рассмотрено несколько методов решения этой проблемы, среди которых наибольшей достоверностью обладают метод наименьших квадратов и метод на основе оператора *Minerr*.

Для стадии проектирования машин и другой техники весьма полезным разделом является третья глава о вероятностных моделях. Здесь можно выбрать программы для расчета запасов надежности и ресурсов в зависимости от физической природы и способа исследования процессов деградации элементов техники. Рекомендуется обратить внимание на корректное обоснование вероятности повреждения элемента на нижней границе рассеивания ресурса при разных законах распределения.

Следующие три главы книги (с 4 по 6) посвящены оценке надежности техники на различных этапах ее жизненного цикла. В четвертой главе отражен опыт организации работ по изучению и повышению надежности судового оборудования на промысловых судах отечественного флота. В пятой главе достаточно подробно рассмотрена проблема обеспечения требуемых ресурсов узлов трения машин путем управления коэффициентом запаса долговечности, предельно-допустимыми износами и износостойкостью. Например здесь показано как изменяется коэффициент запаса долговечности от качества изготовления, ремонта или эксплуатации машин. Подробно изучены факторы, влияющие на износостойкость пар трения: площадь контакта, амплитуда и частота нагрузки, твердость поверхности, путь и коэффициент трения. Дается пример обеспечения требуемого запаса долговечности поверхности конкретной детали — цилиндрической втулки дизеля. Пятую главу завершает оригинальная программа обработки результатов стендовых испытаний образцов на износ.

Шестая глава относится к области обеспечения усталостной долговечности деталей машин. Важное значение для практики имеет обоснование логнормальной модели кривой усталости степенного вида при нулевой асимптоте, позволяющей оценивать предел выносливости при любом числе циклов (например при $10^9 \dots 10^{10}$ циклов). Эта модель была положена в основу программ расчета усталостной прочности валов при изгибе и кручении по ГОСТ 25.504-82 [10] с добавлением программы оценки ресурса детали.

Завершает сей труд седьмая глава о методах и средствах технической диагностики с приложением программы оценки остаточного ресурса после каждого диагностирования.

Автор будет весьма признателен заинтересованным читателям и организациям, которые сообщат по гостевой книге на нашем сайте <http://levlefre.narod.ru/> свое мнение о данной монографии.

Литература

1. *Efremov L. V., Sapozhnikova K.*, Assessment of the Sensors Lifetime on the Basis of Test Results // 10th IMEKO TC7 International Symposium. Saint-Petersburg, 2004.
2. *Боровков А. А.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1988.
3. *Брандт З.* Статистические методы анализа наблюдений. Пер с англ, М.: Мир, 1975.
4. *Ваганов Р. Д.* Вероятностно-детерминистская механика усталости. М.: Наука., 2003.
5. *Веденко В. В.* Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1988.
6. *Вейбулл В.* Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964
7. *ГОСТ 17509—72.* Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений. М.: Госстандарт, 1972
8. *ГОСТ 17510—72.* Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. М.: Госстандарт, 1989
9. *ГОСТ 20911-89.* Техническая диагностика Термины и определения. М.: Госстандарт, 1989.
10. *ГОСТ 25.504-82.* Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Госстандарт, 1982.
11. *ГОСТ 27.002-89.* Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1989.
12. *ГОСТ 27.301-95.* Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: Госстандарт, 1995.
13. *ГОСТ 27.310-95.* Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. М.: Госстандарт, 1987.
14. *ГОСТ 27.410-87.* Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Госстандарт, 1987.
15. *ГОСТ 27674-88.* Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. М. Госстандарт. 1988.
16. *ГОСТ 30858-2003.* Обеспечение износостойкости изделий. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2005.
17. *Дьяконов В. П., Абраменкова И. В.* МАТНСАD 7.0 в математике, физике и в Internet. М.: Нолидж, 1998.
18. *Ефремов Л. В., Черняховский Э. Р.* Надежность и вибрация дизельных установок промысловых судов. М.: Пищевая промышленность, 1980.
19. *Ефремов Л. В.* Аппроксимирующее распределение вероятностей для анализа и прогнозирования надежности изделий // Вестник машиностроения, 1976. № 6. С. 15 — 18.
20. *Ефремов Л. В.* Практика инженерного анализа надежности судовой техники. Л.: Судостроение, 1980.

21. *Ефремов Л. В.* Практикум по расчетам надежности судовой техники: Учеб. пособие для спец. 140200 «Судовые энергетические установки». Мурманск.: МГТУ, 2000.
22. *Ефремов Л. В.* Проблемы прогнозирования усталостной долговечности деталей машин в вероятностном аспекте // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 5, С. 84—89.
23. *Ефремов Л. В.* Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. СПб.: Наука, 2007.
24. *Ефремов Л. В.* Принцип одинаковых последствий и его применение при анализе надежности машин // Надежность и контроль качества. 1983. № 5. С. 33 — 36
25. *Ждановский Н. С., Николаенко А. В.* Надежность и долговечность автотракторных двигателей. Л.: Колос, 1981.
26. *Иванова В. С.* Обзор теорий усталости // Усталость металлов, М.: АН СССР, 1960.
27. *Ивановский Р. И.* Теория вероятностей и математическая статистика. СПб.: ВНУ, 2008.
28. *Когаев В. П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993.
29. *Конструкция и прочность коленчатого вала.* Сб. статей / Под ред. Н. С. Ханина. М.: Машгиз. 1963.
30. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977.
31. *Кугель Р. В.* Долговечность автомобиля. Л.: Энергия, 1976.
32. *Очков В. Ф.* МАТНСАД 14 для студентов, инженеров и конструкторов. СПб.: ВНУ—Петербург, 2007.
33. *Методика расчета нормативных показателей надежности судовых технических средств.* РД 15-127-90. Л.: Гипрорыбфлот, 1990.
34. *Методика статистической обработки информации о надежности технических изделий на ЭЦВМ.* М. : Изд-во стандартов, 1978.
35. *Основы трибологии // Учеб. для техн. вузов / Под ред. А. В. Чичинадзе.* М.: Машиностроение, 2000
36. *Проников А. С.* Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978.
37. *Расчет точности машин и приборов / Под общ. ред. В. П. Булатова и И. Г. Фридендера.* СПб.: Политехника, 1993.
38. *Решетов Д. Н. и др.* Надежность машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. Вузов. М.: Высш. шк., 1988.
39. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Политехника, 2001.
40. *Сотсков Б. С.* Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М.: Высш. школа, 1970.
41. *Справочник по надежности.* Том I. Пер с англ, М.: Мир, 1969.
42. *Справочник по надежности.* Том II. Пер с англ, М.: Мир, 1970.
43. *Справочник по надежности.* Том III. Пер с англ, М.: Мир, 1970

44. *Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В.* Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973.
45. *Терских В. П.* Крутильные колебания валопровода силовых установок. Судостроение, 1971.
46. *Фундаментальные проблемы теории точности.* Коллектив авторов/ Под ред. В. П. Булатова, И. Г. Фридлиндера. СПб.: Наука, 2001.
47. *Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А.* Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение. 1986.
48. *Хрущев М. М., Бабичев М. А.* Исследование изнашивания металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
49. Чичинадзе А.В., Браун Э. Д., Гинсбург А. Г., Игнатъева З. В. Расчет, испытания и подбор фрикционных пар. М.: Наука, 1979.
50. *Школьник Л. М.* Методика усталостных испытаний. Справочник. М.: Металлургия, 1978.
51. *Эксплуатация и ремонт двигателей типа NVD-48, NVD-36 и NVD-24.* М.: Пищевая промышленность, 1965.
52. *Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И.* Таблицы для анализа и контроля надежности. М. : Советское радио, 1968.

Условные обозначения

АЦП — аналого-цифровой преобразователь
ВБР — вероятность безотказной работы
ВМ — вероятностная модель
ВНДПС — вероятность не достижения предельного состояния
ВРШ — винт регулируемого шага
ГСЧ — генератор случайных чисел
ДВС — двигатель внутреннего сгорания
ЗИП — запасные части и принадлежности
КПД — коэффициент полезного действия
КР — капитальный ремонт
МНК — метод наименьших квадратов
МРТО — межрейсовое техническое обслуживание.
ПК — персональный компьютер
ППО — система планово-предупредительных осмотров
ППР — система планово-предупредительных ремонтов
РМРТО — расширенное межрейсовое техническое обслуживание
РС — морской регистр судоходства
СКО — среднеквадратичное отклонение
СР — средний ремонт
СТД — средство технической диагностики
СТС — судовое техническое средство
ТД — техническая диагностика
ТО — техническое обслуживание
ТОР — техническое обслуживание и ремонт
ТЭ — техническая эксплуатация
ХДП — характеристика изменения диагностического параметра
ЭВМ — электро-вычислительная машина (компьютер)

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ	5
1.1. Цели и задачи изучения надежности техники.....	5
1.2. Термины и определения по надежности	7
1.2.1. Общие замечания.....	7
1.2.2. Свойства.....	7
1.2.3. Состояния	8
1.2.4. События	9
1.2.5. Процессы	9
1.2.6. Объекты	10
1.2.7. Измерители надежности	11
1.2.8. Показатели надежности.....	11
1.2.9. Резервирование	14
1.2.10. Теория вероятности	14
1.2.11. Техническая диагностика.....	16
1.2.12. Принцип одинаковых последствий.....	17
1.2.13. Альтернативные термины.....	17
1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	18
1.3.1. Классификация оборудования.....	18
1.3.2. Классификация машин.....	19
1.3.3. Классификация элементов машин.....	20
1.4. КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ.....	21
1.4.1. Классификация отказов и повреждений элементов.....	21
1.4.2. Гамма-процентный ресурс элемента	25
1.4.3. Физическая сущность понятия предельного состояния.....	26
1.5. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ	31
1.5.1. Показатели долговечности машин и механизмов.....	31
1.5.2. Показатели безотказности	33
1.5.3. Показатели ремонтпригодности	34
1.5.4. Комплексные показатели надежности	35
1.5.5. Таблица для определения показателей надежности машин	35
1.5.6. Показатели надежности элементов изделий.....	37
1.6. НОРМЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ	37
1.6.1. Нормы надежности для судна в целом.....	38
1.6.2. Нормы надежности для машин и механизмов	38
1.6.3. Нормы надежности для элементов изделия.....	41
2. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ.....	45
2.1. ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	45
2.2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.....	50
2.3. ОСОБЕННОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДОЛОГИИ	52

2.4.	ЭМПИРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	54
2.4.1.	Образование выборок.....	54
2.4.2.	Проблемы построения эмпирических распределений	55
2.4.3.	Алгоритмы и программы	56
2.4.4.	Программа "PPV ТСНК"	58
2.4.5.	Программа "PUV ТСНК"	64
2.4.6.	Программа "PPV INT"	68
2.4.7.	Программа "CV ТСНК"	73
2.4.8.	Программа "CV INT"	77
2.5.	ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ	77
2.5.1.	Общие сведения о законах распределений	77
2.5.2.	Нормальное распределение	79
2.5.3.	Логнормальное распределение.....	82
2.5.4.	Закон распределения Вейбулла	84
2.5.5.	Равномерное распределение.....	88
2.5.6.	Логарифмически равномерное распределение	91
2.5.7.	Другие двухпараметрические распределения.....	95
2.6.	ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ.....	96
2.6.1.	Метод моментов	97
2.6.2.	Метод максимального правдоподобия.....	97
2.6.3.	Метод квантилей или разделяющих разбиений	98
2.6.4.	Графоаналитический метод	99
2.6.5.	Проверка согласия распределений	99
2.6.6.	Методы корреляции распределений вероятностей.....	101
2.6.7.	Типовая программа	104
2.6.8.	Определение числа объектов при испытаниях	111
3.	ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ	
	ТЕХНИКИ.....	113
3.1.	ВМ типа «ВЕЕР»	113
3.2.	ВМ типа «ТРЕНД»	119
3.3.	ВМ типа «УСТАЛОСТЬ»	128
3.4.	ВМ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА	128
3.5.	ПОСТРОЕНИЕ ВМ ПО ТРЕНДУ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ	129
4.	ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МАШИН	132
4.1.	НОРМАТИВЫ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН	132
4.2.	ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	140
4.3.	ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИКИ.....	141
4.4.	ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТЕХНИКИ.....	144
5.	ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИНЫ.....	149
5.1.	ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСА	149
5.2.	КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА ДОЛГОВЕЧНОСТИ	150
5.3.	ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫЕ ИЗНОСЫ	155
5.4.	ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УЗЛА ТРЕНИЯ	157

5.5.	ПРИМЕР ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН	163
5.6.	СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ	164
6.	ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ	169
6.1.	ЛОГНОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ.....	169
6.2.	ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛА	173
6.3.	ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ ВАЛА	180
7.	КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ.....	190
7.1.	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	190
7.2.	СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	191
7.3.	ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ.....	194
7.4.	ПРИМЕР МОНИТОРИНГА ИЗНАШИВАНИЯ УЗЛА ТРЕНИЯ.....	197
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	208
	ЛИТЕРАТУРА	210
	УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	213

Научное издание

Леонид Владимирович Ефремов

ПРАКТИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА
НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Печатается с оригинал-макета, подготовленного автором

Подписано к печати 23.10. 2008. Формат 70x100/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 17.83. Уч.–изд. л. 17.5. Тираж 150. Заказ № 69

Типография ГОУ СПО
«Санкт–Петербургский издательско-полиграфический техникум»
199004, Санкт-Петербург, В.О., 5-я лин., 28

Институт проблем машиноведения РАН (ИПМАШ РАН)
199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., 61

Санкт-петербургская издательская фирма «Наука» РАН
199034, Санкт-Петербург, В.О., Менделеевская лин., 1
E-mail: main@nauka.nw.ru
Internet: www.naukaspb.spb.ru



Лаборатория методов и средств измерений

Института проблем машиноведения

Российской академии наук

(завлаб профессор Ефремов А.В.)

принимает заказы на выполнение

расчетов крутильных колебаний валов

силовых установок любой степени

сложности (с согласованием их с Морским

Регистром судоходства) и осуществляет

консультационные услуги на основе

большого практического опыта расчетно-

экспериментальных исследований этого

опасного явления

Заявки принимаются по электронному

адресу levlefre@ya.ru

**Институт проблем машиноведения
Российской академии наук
через каждые два года проводит сессии
международной научной школы
"ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКИ
МАШИН И МЕХАНИЗМОВ»**



**Ответственная за проведение этой школы
Лаборатория методов и средств измерений
приглашает специалистов по указанной
тематике принимать участие в этом форуме
в октябре 2009 и последующих годов
Заявки (за полгода до начала) подавать по
электронному адресу**

sev@director.ipme.ru

В 2007 году вышла в свет монография

Л.В. Ефремова

«Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий»

(СПб.: Наука, 2007. — 276 с. ISBN 5-02-025134-8)



В книге описаны методы исследования этого опасного явления с использованием популярной среды MATHCAD. Практическое значение имеет включение в книгу алгоритмов и программ по расчетно-экспериментальному мониторингу крутильных колебаний. Особое внимание уделено обеспечению эффективности и надежности муфт, демпферов и других средств защиты установок от крутильных колебаний.

**По вопросу приобретения этого оригинального труда можно
обращаться на сайт автора в интернете по адресу
<http://levlefre.narod.ru/>**



Ефремов Леонид Владимирович - профессор, доктор технических наук. Специалист в области надежности, диагностики, динамики и крутильных колебаний машин и силовых установок. Автор более 200 научных трудов, статей, монографий, изобретений.



“Наука”



ISBN 978-5-02-025340-7

9 785020 253407

Л. В. ЕФРЕМОВ ПРАКТИКА АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ

Л. В. ЕФРЕМОВ

**ПРАКТИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО
АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

$$R(\gamma) := \alpha \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$