

РЕФЕРАТИВНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надёжности продукции, в том числе об опыте предприятий

Владимир Шпер,

к.т.н., академик АПК РФ, Москва, Россия

Введение: Надёжность – качество во времени.

Самое простое и понятное определение того, что такое надёжность, фактически дано в заголовке этого раздела. Действительно, надёжность – это свойство объекта сохранять качество во времени, где под качеством понимается всё, что удовлетворяет нужды потребителя. Таким образом, очевидно, что надёжность – важнейшая характеристика любого объекта, поскольку нам всегда важно, чтобы то, что мы получаем от нашего поставщика, было качественным не только в момент приобретения, но в течение всего срока, когда мы будем этот объект использовать.

В данном обзоре речь пойдет о надёжности преимущественно технических объектов от простых элементов и до сложных систем. При подготовке данного материала одним из трудных вопросов, стоявших перед автором, был вопрос о периоде времени, который целесообразно рассмотреть. Ясно, что любое решение по этому вопросу, было бы всегда субъективным, поэтому я решил ограничиться примерно 10-летним периодом для журнальных статей и публикаций в периодической печати, и периодом примерно в 15 лет – для книг, монографий и прочих материалов фундаментального характера. При этом я старался придерживаться указанных ограничений, не считая их абсолютными догмами. Ссылки на некоторые книги и обзоры, не потерявшие на взгляд автора своей актуальности до настоящего момента, я, естественно старался приводить независимо от года их публикации.

Безусловно, данный обзор не является всеохватывающим, хотя бы потому, что, как известно, "нельзя объять необъятное". Тем не менее, автор попытался осветить большую часть вопросов, рассматриваемых в стандартных курсах по теории и практике надёжности. За все недостатки данного обзора, в том числе за пропущенные важные работы и не отмеченные имена, автор приносит свои извинения. Все оценки тех или иных работ являются исключительно личным мнением автора. Все замечания и предложения любого характера будут приняты благожелательно, и по возможности включены в последующие публикации, если, конечно, данная работа будет продолжена в том или ином виде.

Т.к. надёжность любых объектов закладывается на стадии их разработки и изготовления, то начать этот обзор следовало бы с раздела "Качество". Однако я довольно быстро отказался от этой мысли. Причина очень проста: обзор по проблеме "Качество" в несколько раз превысил бы всю остальную часть. Поэтому все вопросы, связанные с качеством материалов, качеством проектирования, качеством изготовления и т.д. и т.п., остаются за бортом нашего плавания. Для заинтересованных в этих проблемах читателей приведу несколько ссылок [B1-B4]. Особое внимание я бы обратил на работу [B1] - избранные главы из мемуаров Б.И. Губанова "Триумф и трагедия "Энергии". Размышления главного конструктора". На мой взгляд, это замечательный

материал о нашем отечественном опыте того, как закладывается надёжность при разработке, и как она обеспечивается впоследствии при изготовлении, доводке, испытаниях и т.д.

Сверхкраткая историческая справка.

Надёжность как наука появилась, и начала быстро развиваться в середине прошлого века. Основной вклад в развитие этого относительно нового научного направления внесли специалисты США и СССР. В 60-х ÷70-х годах появились первые фундаментальные книги по надёжности, многие из которых до сих пор могут быть рекомендованы для основательного знакомства с предметом [1-7]. В 1969 году начал издаваться журнал "Надёжность и контроль качества" (далее НКК), который много лет выходил как Приложение к журналу "Стандарты и качество", а сейчас стал самостоятельным журналом, издаваемым под названием "Методы менеджмента качества" (далее ММК). Точнее, ММК - это преемник журнала НКК, изменившийся в соответствии с изменением времени (но об этом позднее). Автор не имеет возможности обсуждать здесь проблемы, связанные с историей надёжности, поэтому вынужден отослать читателей к следующим наиболее близким к нашим дням материалам.

В 1988 году в журнале "Вестник машиностроения" был опубликован обзор двух ведущих советских специалистов по надёжности: академика Б.В. Гнеденко и д.т.н. И.А. Ушакова [8].

В 1989 году в журнале НКК был опубликован перевод обзора, написанного для одного из авторитетнейших американских научных журналов "Statistical Science" под названием "Обзор советских работ по надёжности". Собственно обзор был опубликован во 2-м номере НКК [9], а в 3-м номере были переведены комментарии известнейших зарубежных специалистов и ответы на эти комментарии авторов обзора [10]. Список литературы к работе [9] состоит из 142 наименований. Поскольку публикация такого специального обзора – явление достаточно уникальное, есть смысл остановиться кратко на выводах этой работы, тем более что, с одной стороны, она дает нам достаточно объективную картину состояния работ по надёжности в СССР в период до конца 80-х гг., а с другой стороны, мы сможем воспользоваться этими выводами при обсуждении сегодняшней ситуации в российской надёжности. Итак, основные выводы авторов таковы [9,10].

Вклад советских ученых в теорию надёжности огромен.

Слабой стороной советских работ являются статистическое обоснование моделей и отсутствие проверки моделей на практике. Ряд специалистов не знаком с близкими исследованиями западных специалистов, но в целом, советские исследователи лучше знакомы с западной литературой по теме, чем наоборот. Есть некоторое отставание в области применения байесовских методов в надёжности. Есть очень важные результаты в теории ускоренных испытаний.

Стоит подчеркнуть, что данный обзор был ориентирован на анализ математически строгих работ по надёжности, и авторы не рассматривали многочисленные работы по прикладным проблемам надёжности.

В 2001 году в журнале ММК один из основоположников советской школы надёжности И.А. Ушаков опубликовал материалы своего выступления на международной конференции

"Математические методы в надёжности", куда он был приглашен в качестве лектора, открывающего пленарное заседание конференции. Доклад называется "Надёжность: прошлое, настоящее, будущее", и, насколько мне известно, это последний по времени обзор проблем надёжности, опубликованный на русском языке, и сделанный специалистом, уровень компетентности которого в этом вопросе признан всем мировым сообществом [11]. Доклад Ушакова опубликован в 2-х номерах журнала, список литературы содержит 95 наименований, и среди многих интересных мыслей автора, я хотел бы обратить внимание на перечень проблем, ещё только ожидающих по мнению И.А. Ушакова своего решения. Вот они:

- Надёжность программного обеспечения;
- Надёжность "человеческого фактора";
- Надёжность уникальных изделий;
- Надёжность глобальных территориальных систем;
- Надёжность телекоммуникационных сетей;
- Надёжность развивающихся систем;
- Надёжность элементов с несколькими состояниями;
- Проблемы моделирования надёжности;
- Проблемы оптимизации иерархических систем запасных частей;
- Проблемы систем, не описываемых моделями с дискретными состояниями;
- Проблемы ускоренных испытаний на надёжность;
- Проблемы агрегирования данных о надёжности.

К этому перечню автора, я бы добавил вытекающую из его статьи обеспокоенность явным падением среднего уровня публикаций по надёжности в условиях все большей коммерциализации науки в мире.

Наконец, по случаю юбилея журнала ММК все тот же И.А. Ушаков опубликовал свои воспоминания о том, как зарождалась и развивалась надёжность в СССР [12]. Близкий по содержанию материал появился совсем недавно в Интернете. Это выступление И.А. Ушакова на Международном симпозиуме по стохастическим моделям в надёжности, безопасности и логистике (The International Symposium on Stochastic Models in Reliability, Safety, Security and Logistics = SMRSSL'05). Симпозиум прошел в феврале этого года (2005) в Израиле и был посвящен памяти выдающегося советского надёжника Х.Б. Кордонского. Доклад Ушакова – это воспоминания о Б.В. Гнеденко, Х.Б. Кордонском, Я.М. Сорине, Я.Б. Шоре и многих других, кто создавал и развивал теорию и практику надёжности во второй половине 20-го века [13].

Основные термины и определения.

Последнее по времени издание терминологического стандарта по надёжности появилось в разгар перестройки – в 1989 году [14]. Оно родилось под руководством чл.-корр. АН СССР В.В. Болотина, возглавлявшего в тот момент рабочую группу по подготовке нового терминологического стандарта, созданную при МНТК "Надёжность машин". Этот стандарт рождался в ходе многочисленных дискуссий, проходивших в большом коллективе разработчиков, где были собраны представители от самых различных отраслей науки и техники. Как всегда бывает с вопросами терминологии, стандарт представлял определенный компромисс взглядов специалистов из различных областей, поскольку надёжность – термин исключительно общий, применимый практически ко всему на свете. Столь же естественно, что время от

времени предпринимаются попытки дополнить и/или пересмотреть содержание отдельных терминов. В связи с этим хотелось бы обратить внимание на следующие публикации.

В 1993 г. И.З. Аронов подготовил материал [15], помогающий потребителям установить связь между показателями надежности и гарантийными показателями на изделие – вопрос, который регулярно возникал на этапе согласования терминологического стандарта, и который приобрел на определенном этапе развития РФ большую актуальность, поскольку появился закон, направленный на защиту прав потребителей. Подход, описанный в [15], был предложен Ю.И. Тарасьевым – одним из членов рабочей группы по разработке ГОСТа [14]. Дополнительные разъяснения по вопросу, чем отличаются друг от друга, и как связаны между собой гарантийные показатели и показатели надежности, можно найти в статье [16].

В 1992-1997 гг. в журнале НКК прошла очень вялая дискуссия, вызванная попытками стандартизации моделей отказов. Дискуссия проходила как бы между 119 российским ТК (Техническим Комитетом) "Надежность в технике" [17] и 68 украинским ТК "Надежность техники" [18], а на самом деле, на мой взгляд, между специалистами, ведущими работу этих ТК: Демидовичем Н.О. и Стрельниковым В.П. Анализ позиций обоих авторов показал [19], что под стандартизацией моделей отказов они понимают создание стандарта, который будет регламентировать некоторое число функций распределения (ФР) наработки до отказа в качестве универсальных (стандартных) моделей надежности (МН). Вся разница в позициях авторов [17],[18] состояла в том, что они использовали различные математические формулировки для своих "обобщенных" МН. Мне представляется, что сама идея "универсальной модели отказов" – порочна, и в подобных стандартах нет никакой реальной потребности [19].

На протяжении ряда лет журнал НКК публиковал так называемые спецномера, посвященные проблемам стандартизации в области надежности. Вот их перечень:

НКК, 1993, №3;
НКК, 1994, №9;
НКК, 1995, №9;
НКК, 1997, №1;
НКК, 1998, №9;
НКК, 1999, №9.

В частности, в них были опубликованы состав и структура системы стандартов "Надежность в технике", планы работы по межгосударственной стандартизации, перечни стандартов МЭК ТК 56 "Надежность", выходивших в те годы. К сожалению, начиная с 2000 года, такая информация перестала публиковаться в журнале по неизвестной мне причине. (Обзор международных стандартов в области безопасности см. в журнале ММК, 2001, №9, с.34-37. Авторы: И. Аронов, В. Версан).

Наконец, стоит остановиться на одной из последних по времени попыток обсуждения проблем в области стандартизации терминов по надежности. Это публикация ответственного секретаря ТК 119 Демидовича Н.О. в журнале ММК в конце 2002 года [20]. Эта статья посвящена проблеме гармонизации терминов по надежности – т.е. состыковке терминов, используемых в РФ с терминами, разрабатываемыми ТК 56 МЭК (МЭК – Международная Электротехническая Комиссия, ТК 56 МЭК – ТК по проблеме "Надежность"). Среди прочих обсуждаемых вопросов, в [20] предлагается обсудить определение основополагающего термина

- надёжность. В частности, предлагается определить надёжность так, как это сделано в соответствующем стандарте МЭК: "Собирательный термин, применяемый для описания свойства готовности и влияющих на него свойств безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта" (цит. по [20]). Не вдаваясь здесь в дискуссию, замечу, что

а) как отмечает сам автор статьи, по сути, термины совпадают;

б) в 2002 году на эту статью не последовало ни одного отклика – т.е. впечатление такое, что сегодня в России уже некому обсуждать проблемы терминологии в области надёжности.

Не без интересна статья группы авторов, которые попытались обсудить взаимосвязь понятий надёжности и безопасности [21]. Однако, по сути эта работа посвящена анализу терминов в области безопасности, причем все эти термины вводятся авторами с позиций расчета вероятностей наступления соответствующих событий, т.е. с позиций надёжности.

В заключение этого подраздела привожу перечень действующих основополагающих стандартов по надёжности (www.gosts.ru/products/nt.html):

ГОСТ 27.001-95 - Система стандартов "Надёжность в технике". Основные положения.

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

ГОСТ 27.003-90 - Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности.

ГОСТ 27.004-85 - Надёжность в технике. Системы технологические. Термины и определения.

ГОСТ 27.202-83 - Надёжность в технике. Технологические системы. Методы оценки надёжности по параметрам качества изготавливаемой продукции.

ГОСТ 27.203-83 - Надёжность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надёжности.

ГОСТ 27.204-83 - Надёжность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надёжности по параметрам производительности.

ГОСТ 27.301-95 - Надёжность в технике. Расчет надёжности. Основные положения.

ГОСТ 27.310-95 - Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

ГОСТ 27.402-95 - Надёжность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение.

ГОСТ 27.410-87 - Надёжность в технике. Методы контроля показателей надёжности и планы контрольных испытаний на надёжность.

Все эти стандарты можно заказать по указанному выше адресу, а также в магазине стандартов - www.docum.ru/gost.asp?soks=21.020, и во ВНИИКИ - www.vniiki.ru/catalog_v.asp?page=173

Общие прикладные проблемы надёжности

Как уже отмечалось выше, в обзорах, упомянутых в разделе 2, рассматривались преимущественно строгие в математическом отношении работы, где развивались те или иные

идеи теории надёжности. Параллельно шло развитие так называемой прикладной теории надёжности, куда я отношу работы, в которых теми или иными способами решались конкретные задачи надёжности в конкретной области техники. Как отмечали в своем обзоре Рухин и Хсиех [9], в этой области в СССР делалось очень много, причем советские инженеры были склонны подходить к решению задач весьма прагматически, и не стремились к математической строгости аппарата. Ясно, что охватить область прикладных работ по надёжности сколь ни будь полно в одном обзоре, подготовленном одним автором, просто невозможно. Поэтому присущая этому разделу избирательность полностью обусловлена личным опытом и интересами автора.

В 1985 году вышел фундаментальный справочник по надёжности технических систем - [22]. Он был подготовлен международным коллективом авторов, и содержит все необходимые сведения для расчетов надёжности систем на различных этапах жизненного цикла, а также сведения, необходимые для проведения различных видов испытаний на надёжность. В 1990 г. вышел последний (10-й) том многотомного справочника под названием "Надёжность и эффективность в технике" [23], издававшегося с 1987 года. Он был подготовлен также большим коллективом авторов, среди которых довольно много пересечений с коллективом справочника [22]. В 1997 г. в журнале НКК в двух номерах был опубликован большой обзор известного в области конструкционной и прочностной надёжности специалиста Л.В. Коновалова [24] (этот же обзор был несколько ранее опубликован в журнале "Вестник машиностроения"). Автор обращает внимание на то, что с ростом единичных мощностей и энерговооруженности машин и механизмов, что имеет место практически во всех отраслях промышленности (включая такие ответственные, как АЭС, летательные аппараты, транспортные средства и т.д.), усилилось несоответствие между требованиями к показателям надёжности и реальной надёжностью машин. Это, по мнению автора, ведет к прямой угрозе безопасности людей и природы. Особо опасно, считает Л.В. Коновалов, стремление к экономии затрат на этапе проектирования и создания надёжных единичных изделий.

Далее в этом подразделе обзора я кратко остановлюсь на некоторых книгах по надёжности, изданных за последние годы, и предлагаемых 18 ведущими русскоязычными интернет-магазинами. При этом я не привожу ссылок на книги, относящиеся к узким конкретным отраслям, например, "Надёжность железнодорожного пути" и т.п.

Самое последнее по времени издание известной книги давно работающего в области надёжности специалиста Г.В. Дружинина вышло в 1986 году в Энергоатомиздате [25].

Столь же хорошо известный специалист И.А. Рябинин опубликовал в 2000 году книгу по надёжности сложных систем [26]. На мой личный и весьма прикладной взгляд, все книги Рябинина перегружены логико-вероятностными методами анализа, что делает их малопривлекательными для практиков.

В 2001 году в рамках многотомной энциклопедии "Машиностроение" вышел том, посвященный надёжности машин [27].

Очень давно работающий в области надёжности машин автор – Проников А.С. - выпустил новое улучшенное издание своей книги, посвященной параметрической надёжности, т.е. расчету и прогнозированию отказов при заданных моделях старения выходных параметров машин [28].

Учебник по надёжности для студентов ВУЗов в 2003 году выпустил В.А. Острейковский [29]. Но я бы хотел обратить внимание на другую книгу с участием того же автора, вышедшую в 1993 году, и посвященную методам расчета надёжности ядерных энергетических установок [30] (в Интернете она не предлагается). В ней, на мой взгляд, довольно удачно сочетаются аккуратность математического аппарата, практические данные и примеры расчетов, и, кроме того, в отличие от традиционных книг по надёжности, в неё включены некоторые относительно новые направления анализа и обеспечения надёжности, как то: байесовское оценивание надёжности ЯЭУ, непараметрические методы оценивания (бутстреп процедура), и т.п.

Давно занимающийся уточнением планов контроля качества и надёжности Н.Е. Ярлыков выпустил книгу, посвященную как теоретической базе последовательных планов контроля, так и полученным им результатам, вошедшим в ряд стандартов по испытаниям [31]. С кратким описанием содержания этой книги в изложении самого автора можно ознакомиться по заметке в журнале ММК, 2003, №9, с.62-63.

Наконец, ещё один давно и хорошо известный автор – Г.Н. Черкесов – выпустил в 2005 году усовершенствованный вариант своего пособия по надёжности АСУ, только теперь оно стало называться пособием по надёжности аппаратно-программных комплексов – [32].

В дополнение к этому весьма небольшому перечню книг ещё несколько, заслуживающих, на мой взгляд, внимания, и отсутствующих в Интернет-магазинах.

Как бы в ответ на отмеченное выше некоторое отставание в области применения байесовских методов в надёжности в 1989 году В.П. Савчук выпустил книгу, целиком посвященную данному подходу [33]. Книга, безусловно, ликвидирует определенный пробел в русскоязычной литературе по данной тематике. Достаточно сказать, что список цитируемой автором литературы состоит из 247 наименований. Основной недостаток книги, как мне кажется, следующий: она все-таки рассчитана не на инженера по надёжности, а на специалиста по статистическим методам. Тем не менее, и такая направленность важна для развития отечественных работ в области надёжности.

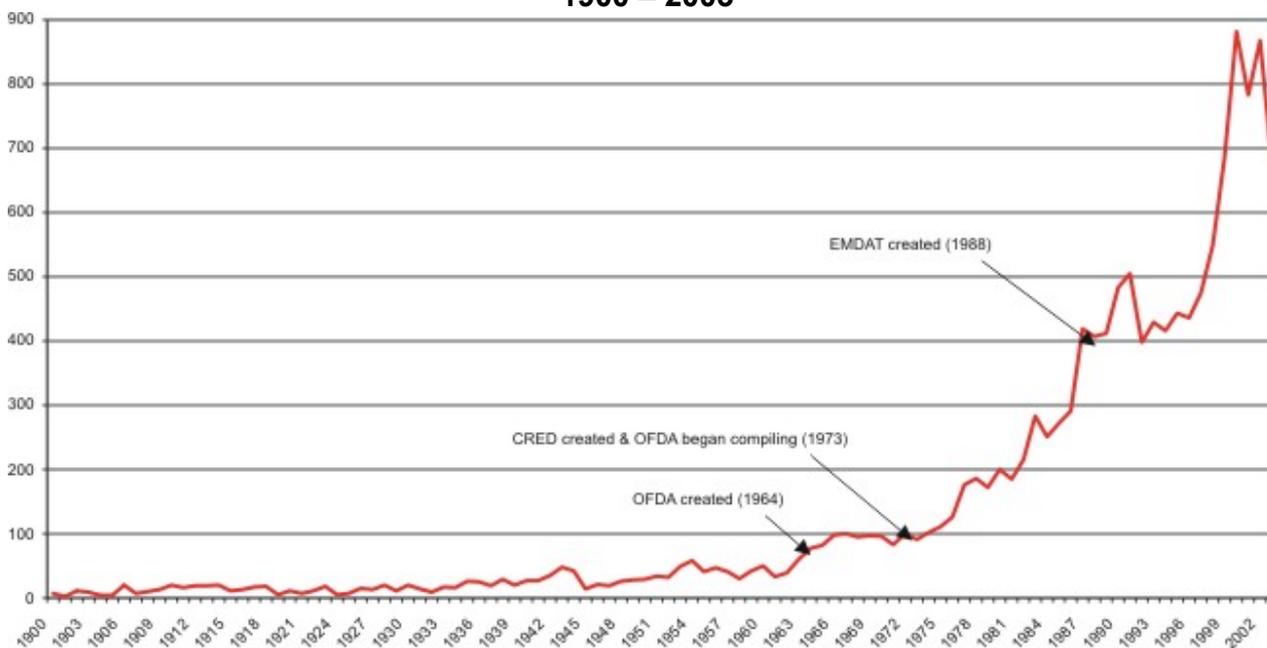
Известный украинский специалист Е.С. Переверзев опубликовал в 1990 году книгу "Надёжность и испытания технических систем" [34]. Книга содержит один из самых полных известных мне перечней ФР различных видов. С 26-й по 107-ю страницу в книге [34] перечислено 200 различных ФР, причем для каждой из них приведены функция плотности и кумулятивная функция распределения, а также первый и второй моменты (т.е. среднее и дисперсия). К сожалению, автор не всегда приводит ссылки на источники информации. Тем не менее, в книге довольно много весьма экзотических ФР, которые помимо этого издания можно найти только в малодоступной специальной справочной литературе, и именно поэтому я рекомендую это издание как относительно легко доступный и очень широкий список возможных моделей ФР⁵.

Институт проблем машиноведения РАН в 2001 году выпустил коллективную монографию по проблемам теории точности, в которой ряд работ посвящен проблемам надёжности [35].

⁵ Конечно же, "Справочник по статистическим распределениям" Хастингса, Пикока (М.: Статистика, 1980) дает гораздо большую информацию по каждой из ФР, но там их только 24. С другой стороны, для реальной практики, конечно же, 200 ФР вряд ли нужно, но ведь для конкретного применения никогда заранее не известно, а какое распределение окажется наиболее подходящим.

Наконец, нельзя не отметить, что понятие надёжности теснейшим образом связано с понятием безопасности. Ситуация с безопасностью в мире в целом очень хорошо иллюстрируется приведенным ниже графиком, скопированным мною на сайте организации "Международная стратегия для снижения числа бедствий" - www.unisdr.org/, где размещено очень много разнообразной, в том числе статистической информации о бедствиях и катастрофах в различных уголках Земли. На рисунке показано, как росло полное число природных и техногенных катастроф в 20-м веке (адрес рисунка: www.unisdr.org/disaster-statistics/occurrence-trends-century.htm).

Total number of natural and technological disasters registered in EMDAT 1900 – 2003



Хотя тема безопасности и не является предметом рассмотрения данного обзора, я хотел бы отметить книгу, написанную известным российским специалистом по надёжности И.З. Ароновым (с соавторами) "Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем" [36]. Особо мне бы хотелось подчеркнуть тот факт, что в книге присутствует глава под названием "Анализ надёжности персонала" (Гл.5, с.183-200). Выше, в перечне проблем, ожидающих своего решения, И.А. Ушаков сформулировал проблему надёжности человеческого фактора. Гл.5 в книге [36] - один из немногочисленных ответов на этот вызов в русскоязычной литературе последнего времени (см. также [37]). Авторы при проведении вероятностного анализа безопасности выделяют три подзадачи [36], причем все три формулируются именно как задачи надёжности:

- оценку показателей надёжности персонала при эксплуатации, когда невыполнение или ошибочное выполнение функций приводит к возникновению исходного события (т.е. аварии, неготовности к выполнению заданных функций и т.д.);
- оценку показателей надёжности персонала при техническом обслуживании и ремонте элементов, когда невыполнение или ошибочное выполнение функций приводит к неготовности этих элементов при возникновении исходного события;

- оценку показателей надежности персонала при аварии, когда невыполнение или ошибочное выполнение функций приводит усугублению последствий аварии.

Анализ надежности персонала может быть как качественным, так и количественным. В частности, в [36] приведены интересные количественные данные относительно вероятностей некоторых стандартных ошибок персонала. В табл. 1 (табл.5.4 в [36]) показаны значения вероятностей ошибок оператора при выполнении некоторых операций, в табл.2 приведены данные по вероятности безошибочного выполнения сенсорных операций, а в табл.3 – вероятность ошибочных действий квалифицированного персонала в зависимости от времени на принятие решения.

Вообще книга [36] содержит большое число практических данных и примеров расчета, что придает ей дополнительную ценность. (Я ещё вернусь к данным из [36], когда мы доберемся до раздела показателей надежности отдельных элементов и систем).

Таблица 1.

Вероятность ошибки оператора при выполнении различных операций	
Название операции	Вероятность ошибки
Восприятие устного сообщения (1-3 слова)	0,0002
Выдача речевого сообщения (1-3 слова)	0,0002
Чтение (1-3 слова)	0,0010
Выполнение записи (1-3 слова)	0,0003
Восприятие свечения сигнальной лампы, транспаранта	0,0035
Восприятие указаний таблички	0,0014
Восприятие показаний стрелочного прибора	0,0072
Восприятие показаний цифрового прибора	0,0012
Нажатие кнопки	0,0025
Нажатие требуемой клавиши	0,0050
Включение тумблера	0,0020
Установка многопозиционного переключателя в требуемое положение	0,0044
Соединение кабелей посредством штепсельных разъемов	0,0032
Разъединение штепсельных разъемов	0,0009
Установка параметра вращением ручки управления	0,0094
То же, вращением штурвала	0,0100
То же, перемещением рычага	0,0150
Выбор переключателя из нескольких различных	0,0001
Напряженная работа, при которой происходит быстрая смена ситуаций	0,2-0,3

Таблица 2.

Вероятность безошибочного выполнения сенсорно-моторных операций			
Параметр органа управления	Вероятность	Параметр органа управления	Вероятность
Диаметр кнопки, мм		Длина ручки	
Миниатюрный	0,9995	управления, мм	
Более 12,7	0,9999	152,4-228,6	0,9963
		305-458	0,9967

Вероятность безошибочного выполнения сенсорно-моторных операций			
Параметр органа управления	Вероятность	Параметр органа управления	Вероятность
		533-686	0,9963
Число кнопок: с 1-й по 5-ю	0,9997	Пределы перемещения ручки, град.: 5-20 30-40 40-60	0,9981 0,9975 0,9960
с 6-й по 10-ю	0,9995		
с 11 по 25-ю	0,9990		

Таблица 3.

Вероятность ошибочного действия	
Время для принятия решения и осуществления действий	Вероятность ошибочных действий квалифицированного персонала
Очень короткое (менее 5 мин)	0,1
Короткое (от 5 до 60 мин)	0,001
Продолжительное (более 1 часа)	0,0003

Обработка данных по надежности (модели надежности).

Чтобы как-то систематизировать информацию в этом разделе обзора, я решил сначала изложить некую общую классификацию моделей надежности. Теоретическая дискуссия на тему, что такое модель надежности (МН), могла бы быть бесконечной, поэтому предлагается подойти к этому вопросу прагматически, т.е. с инженерной точки зрения. Что мы хотим получить в итоге, создавая ту или иную модель? Общий ответ ясен: мы хотим иметь возможность оценивать (прогнозировать) тот или иной показатель надежности (ПН) в зависимости от внешних воздействующих факторов (ВВФ) с достаточной для наших целей точностью. Поэтому предлагается следующее рабочее определение [19]:

Модель надежности – это математическая модель, позволяющая с заданной точностью рассчитывать те или иные ПН и их зависимость от ВВФ.

Ясно, что МН несть числа, и для целей нашего обзора их следует как-то систематизировать. Одна из возможных классификаций МН представлена на рис.2. В рамках этой классификации все МН разбиты на 4 больших класса:

обобщенно-статистические – те МН, в основе которых лежит постулат о существовании некоторого обобщенного параметра или свойства, распределение которого меняется во времени и приводит к отказам объектов. Так возникают модели дрейфа параметров и модели типа нагрузка – прочность;

функциональные – те МН, в основе которых лежат постулаты о существовании ФР отказов и об определенных зависимостях этих функций от ВВФ. Если далее предполагается, что ФР принадлежит к определенному параметрическому семейству, то возникает подкласс

параметрических моделей, если такое допущение не используется, то возникают так называемые непараметрические МН;

кинетические – те МН, в основе которых лежат уравнения, описывающие кинетику конкретного процесса деградации (физического, физико-химического, механического и т.д.);

феноменологические (ресурсные) – те МН, в основе которых лежат постулаты о существовании у изделий (объектов) некоторого запаса работоспособности, называемого ресурсом, и об определенной зависимости скорости его расходования от ВВФ. Если далее под ресурсом понимается некая реальная физическая величина или величина, зависящая от реальных физических параметров и характеристик объекта, то я отношу возникающие МН к ресурсно-физическим. Если же рассматривается некий обобщенный параметр, то возникает подкласс вероятностных ресурсных моделей.

Дальнейшее деление некоторых классов показано на рис.2 и не требует специальных пояснений.

Модели дрейфа параметров рассматривались в очень многих книгах по надежности. Из старых нельзя не упомянуть книгу Герцбаха и Кордонского [38], а также книгу Михайлова [39]. Из относительно последних публикаций этот материал есть в уже упоминавшейся книге Переверзева [34].

Модели типа нагрузка-прочность тоже очень популярны в литературе. Одно из наиболее полных и последних по времени изложений этого материала – это книга Капура, Ламберсона, вышедшая в русском переводе в 1980 году [40]. На мой взгляд – это одна из лучших книг по надежности, переведенных на русский язык. Помимо того, что в ней очень подробно рассмотрены МН типа нагрузка-прочность, она очень просто написана, и, благодаря просчитанным до конца примерам, доступна любому инженеру.

Традиционные параметрические МН описаны практически во всех книгах и учебниках. Чтобы не повторяться, отмечу две классические работы, к сожалению, не переведенные на русский [41, 42], где, среди прочего, есть и подробное описание параметрических моделей. Стоит отметить, что в подавляющем большинстве параметрических МН авторы предпочитают иметь дело с функцией интенсивности отказов (ИО), которую принято обозначать буквой λ . Построение МН фактически означает, что либо по экспериментальным данным, либо из теоретических соображений, либо комбинируя эти источники, мы получаем соотношение типа:

$$\text{ИО} \equiv \lambda = f(t, \text{ВВФ}), \quad (1)$$

где t – время.

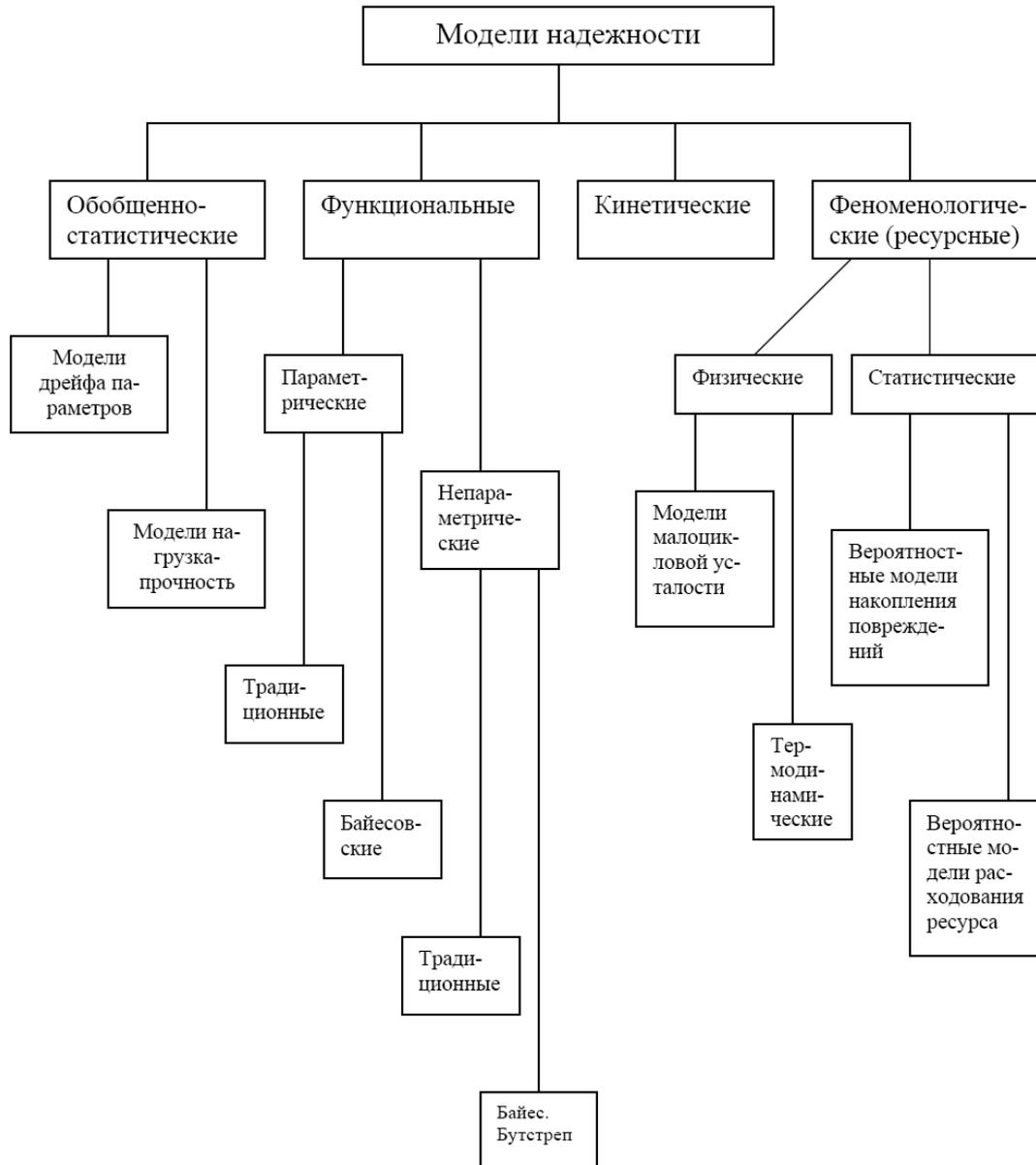
Ниже мы вернемся к соотношению (1), а пока продолжим наш краткий экскурс по МН.

В.И. Гербуз в работе [43] применил параметрический подход для анализа влияния случайной погрешности измерений на исходный уровень надежности изделий.

Как известно, зависимость ИО от времени в общем виде имеет ваннообразный характер, отражающий три характерных этапа жизни большинства объектов (см. рис.3). Первый этап

падающей ИО – этап ранней смертности, который в технике принято называть этапом приработки. В середине имеем этап постоянной ИО – этап нормальной эксплуатации. Последний этап, этап возрастания ИО – этап старения (износа). С первых работ по надёжности и до сих пор не прекращаются попытки найти математическую модель, с помощью которой было бы удобно описывать все этапы ваннообразной кривой ИО.

Рис.2. Классификация МН

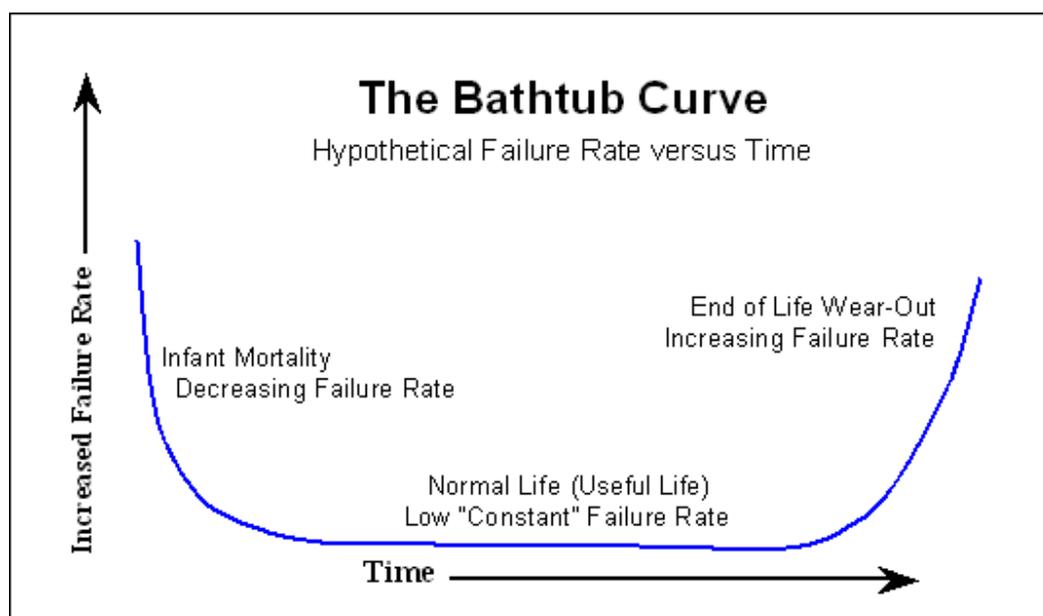


Интересная модификация распределения Вейбулла с целью описать всю кривую ИО, показанную на рис.2, содержится в одной из недавних публикаций в журнале "IEEE Transactions on Reliability" [44]. Очередная попытка в этом же направлении предпринята С.Я. Гродзенским, одним из очень немногих отечественных специалистов по надёжности, кто после перестройки

продолжает работать в этой области. В статье [45] он пытается построить МН из смеси экспоненциального и вейбулловского распределений с целью анализа надёжности элементов систем управления. К сожалению, не все выводы и заключения статьи [45], на мой взгляд, безупречны, тем не менее, сама попытка представляет безусловный интерес. Надо отметить, что С.Я. Гродзенский не остановился на построении МН, а попытался довести эту работу до логического конца, для чего рассмотрел задачу об оценке ПН по данным эксплуатации в случае применимости модели вышеописанной смеси ФР. При этом он проанализировал эту задачу для так называемых цензурированных испытаний, т.е. таких испытаний, когда не все элементы в процессе испытаний отказали, и часть элементов доработала до конца испытаний без отказов [46, 47]. В итоге автор рекомендует для оценки ПН в случае, когда ФР описывается смесью экспоненциального и вейбулловского распределений, делать сначала так называемый "разведочный" анализ графоаналитическим способом, т.е. с помощью построения ФР на сетке распределения Вейбулла, а уже потом уточнять оценки методом максимального правдоподобия.

Как уже отмечалось выше, байесовский подход к построению МН в России развит не слишком сильно. Кроме книги [33], можно отметить статью В.А. Громацкого в журнале НКК [48]. В ней автор решает задачу оценки нижней доверительной границы для вероятности безотказной работы при испытаниях небольшой по объёму выборки в условиях наличия некоторой априорной информации о параметрах исходного распределения. В примере к статье объём выборки составил 20 наблюдений. В зарубежных изданиях недостатка в ссылках не ощущается. Только на сайте Американского общества качества поиск по ключевому слову "Bayesian" даёт более 80 ссылок на соответствующие статьи. Приведу парочку показавшихся мне интересными. Статья группы авторов по оптимальной стратегии обслуживания опубликована в журнале "Technometrics" [49]. В [50] предлагается использовать байесовские процедуры для планирования испытаний на надёжность, подтверждающих выполнение требований по значению среднего времени между отказами.

Рис.3. Ваннообразная кривая для гипотетической зависимости ИО от времени



По непараметрическим МН стоит отметить две книги отечественных авторов [51,52], причем в обеих речь идет о непараметрических оценках ПН по цензурированным испытаниям. Книга [51] заслуживает дополнительного внимания в связи с тем, что в ней есть отдельная глава (5-я), в которой обсуждается важнейшая проблема – проблема достоверности исходных данных. Очевидно, что никакие математические ухищрения не способны возместить отсутствующую или искаженную первичную информацию об отказах. К сожалению, систематических работ о методах сбора и хранения информации о надежности в периодической печати я не обнаружил. До перестройки такую информацию регулярно собирали головные отраслевые институты и МО (например, Электронстандарт выпускал соответствующие справочники по изделиям электронной техники, аналогичную работу выполнял ЦНИИ-22 и т.д.). После перестройки, насколько я могу судить по собственному опыту, даже те головные институты, какие ещё сохранились и продолжают функционировать, лишились каких либо реальных возможностей систематически собирать данные по надежности. К этому стоит добавить, что и до перестройки значения ПН, приводившиеся в различных справочных изданиях, не заслуживали особого доверия. Дело в том, что эти значения брались, как правило, из технических условий (ТУ) на соответствующее изделие. Но в ТУ это значение, зачастую, попадало не по результатам специальных испытаний или сбора данных об эксплуатационной надежности, а волонтаристским путем из-за необходимости быть не хуже, чем у зарубежного аналога. Это на самом деле очень большая проблема, и автор данного обзора не видит путей её решения в ближайшем будущем.

В табл.4, взятой из работы [51], воспроизведены типичные значения процента ошибок (как объективных, так и субъективных) в зависимости от типа формы первичного сбора и учета данных. Легко видеть, что эти проценты весьма высоки, что делает задачу анализа первичных данных на их достоверность чрезвычайно актуальной. Некоторые статистические способы выделения недостоверных данных (методы так называемой очистки данных) приведены в [51]. В первом и достаточно грубом приближении они сводятся к анализу на наличие выбросов и к проверке случайности цифр в записях. Замечу мимоходом, что на одной из недавних конференций, где присутствовал автор данного обзора, представитель одной из фирм, поставляющих статистические пакеты для обработки данных, сказал, что работа по очистке данных в среднем отнимает до 30% всего времени, затрачиваемого на обработку заданного массива информации.

Таблица 3.

Распределение ошибок по типам первичных форм учета			
Тип информации	Кол-во ошибок от общего числа, %	Тип информации	Кол-во ошибок от общего числа, %
Адресная	10	Кодовая	30
По реквизитам:			
- наименование изделия	2	- код отказа	6
- завод-изготовитель	2	- код причины отказа	18
- место проведения испытаний	3	- код условий испытаний	4
- прочие	3	- прочие	2
Описательная	20	Параметрическая	40
По реквизитам:			
- характер отказа	3	- наработка	18
- причина отказа	9	- ресурс	10
- условия испытаний	6	- срок службы	5
- прочие	2	- время восстановления	7

Ещё одна близкая проблема – объединение информации, полученной по разным выборкам (проверка однородности информации). По этому вопросу весьма полезной для практиков может оказаться работа Ю.Ф. Буртаева, который рекомендует для этой цели использовать критерий Сэвиджа, и который рассчитал критические значения для этого критерия в своей статье [53].

Бутстреп модели слабо представлены в отечественной литературе по надёжности последних лет. Тем не менее, нижеследующие публикации, безусловно, заслуживают внимания. Группа авторов во главе с известным российским статистиком Ю.П. Адлером выполнила целый комплекс работ по применению бутстреп-моделирования в задачах надёжности. В статье "Бутстреп-моделирование при построении доверительных интервалов по цензурированным выборкам" они описывают применение этого подхода к анализу результатов цензурированных испытаний [54]. Достоинство метода в том, что он не требует априорных предположений о виде ФР. В работе [55] Ю.П. Адлер с соавторами применяют бутстреп для оценки нижней доверительной границы долговечности изделий. В этой и в двух последующих работах той же группы авторов [56,57] предлагается, в частности, использовать данный подход для решения чрезвычайно актуальной для России задачи продления ресурса тех или иных изделий или систем. Как известно, проблема старения действующего оборудования стоит для нашей страны крайне остро. Наихудшая точность прогноза на пятилетний период по данным работы [57] составила около 18%. При этом следует иметь в виду, что речь идет о процедуре, когда группа экспертов в течение некоторого времени проводила регулярное освидетельствование объекта, после чего по их оценкам ресурса и строится соответствующая МН. Прежде, чем перейти к очень большому разделу, связанному с ресурсом изделий и методам его оценки, отмечу ещё одну работу на тему бутстреп-моделирования. Эта статья [58], авторы которой применяют этот метод для анализа безопасности конструкций.

Остановимся теперь на феноменологических/ресурсных МН и их применениях к различным объектам и ситуациям. А.В. Антонов в работе [59] обсуждает возможность прогнозирования ресурса атомных станций. В этой области машиностроения фундаментальными работами по данной проблеме, на мой взгляд, являются книги Болотина В.В. [60] и Острейковского В.А. [61]. Важным акцентом статьи [59] представляется вывод о том, что чисто вероятностные методы анализа недостаточны применительно к атомным станциям, поскольку последствия отказов могут приводить к колоссальному ущербу. В этой ситуации он предлагает прогнозировать ресурс с учетом функции риска, под которым понимается стоимость причиненного ущерба, взвешенная по вероятностям наступления соответствующих событий. Надо заметить, что такое определение того, что такое риск, не согласуется с многочисленными работами по безопасности, поэтому к численным выводам автора работы [59] я бы отнесся с определенной сдержанностью.

Ц.Е. Мирцхулава в работе [62] обсуждает проблемы старения не менее важного для страны объекта – плотин и прочих гидротехнических сооружений. Основная идея этой работы – аналогия между старением плотин и старением людей. Автор предлагает использовать методы, применяемые в демографии для прогнозирования ресурса гидротехнических сооружений. К сожалению, в работе отсутствуют практические данные и прогнозы.

Авторы работы [63] решали другую задачу: прогнозирование ресурса изделий, работающих в условиях ударных нагрузок. Ими получены пессимистические оценки долговечности, не зависящие от вида ФР. Полученные в [63] результаты применялись для оценки срока службы труб парогенераторов. Однако, справедливости ради должен заметить, что, во-первых, в работе

используется довольно серьезный математический аппарат, и, во-вторых, чтобы дойти до практического результата оказалось необходимым знание скорости расходования ресурса трубой парогенератора, плюс допущение о линейном характере функции усталости.

Проблема оценки ресурса силовых полупроводниковых приборов в случае, когда известна зависимость определяющих параметров от времени, была рассмотрена в 8-й главе монографии [64]. Там предложен очень простой графоаналитический способ нахождения γ -процентного ресурса силовых выпрямительных диодов.

Более подробно ресурсные МН и полученные с их помощью результаты будут рассмотрены чуть ниже при обсуждении моделей ускоренных испытаний на надежность, поскольку именно там они в основном и используются.

Работ по кинетическим МН, т.е. по анализу конкретных механизмов отказа и оценке ПН с их помощью, в русскоязычной литературе оказалось очень мало. По-видимому, это связано в первую очередь с тем, что для анализа реальных физических процессов деградации необходимо довольно дорогостоящее современное оборудование, которого у российских предприятий, как правило, просто нет. Самое интересное, что мне удалось обнаружить – это брошюра А.Е. Клиота, посвященная механизмам деградации электрорадиоэлементов [65]. В этой работе проведены расчеты механических напряжений, возникающих при прохождении тока в проводах, полупроводниковых приборах, конденсаторах и т.п. Обсуждается физика механизмов деградации, но не собственно ПН. За рубежом физикой отказов занимаются давно, много и вполне успешно. Достаточно обратить внимание на ежегодные конференции по физике надежности, проводимые аж с 1962 года. На странице <http://www.irps.org/> Интернета находится адрес этого симпозиума. Гиперссылки на материалы этих конференций с 1996 по 2004 гг. можно найти на странице <http://www.irps.org/ProcVideoHist.html>.

Наконец, по общим моделям накопления повреждений, самое интересное – это книга [66], вышедшая в издательстве Мир в 1989 году. Как это видно из самого названия, в ней обсуждаются вероятностные МН, причем, что интересно, возникающие в рамках излагаемого авторами подхода ФР, не описываются никакими широко распространенными стандартными моделями. Математическая основа книги [66] - марковские цепи, однако наряду с математическим аппаратом в книге много реальных примеров из разработок НАСА, аэрокосмических и машиностроительных фирм, например, по долговечности шарикоподшипников, по усталостной долговечности сталей, по росту усталостных трещин и т.д. Важным обстоятельством мне представляется тот факт, что описанные в [66] МН обладают большей гибкостью, чем обычно используемые для тех же целей распределение Вейбулла, логнормальное распределение, обратное распределение Гаусса и т.п.

В заключение этого подраздела обзора обсудим важный вопрос из области обработки данных, касающийся подбора вида ФР по эмпирическим данным. Строго говоря, это не совсем задача из области надежности, поскольку её приходится решать при обработке практически любых видов данных. Тем не менее, в области надежности, подбор ФР имеет свои особенности, связанные с характером данных о надежности и их обычной ограниченностью.

В 1999 году в журнале НКК в рамках рубрики "Дискуссия" были опубликованы две статьи по проблеме проверки согласия опытного распределения с теоретическим применительно к задачам надежности [67, 68]. В дальнейшем один из участников этой дискуссии - Б.Ю. Лемешко

- вернулся к этой проблеме, и опубликовал в 2001 году статью с критикой позиции, изложенной в [67], где довольно подробно разъяснил некоторые "тонкости" применения стандартных статистических критериев (Пирсона, Колмогорова, Мизеса) для задач оценивания параметров ФР и проверки гипотез по цензурированным выборкам [69]. В [69] приведена важная табличка (с.35-36), показывающая, какую часть информации мы теряем при оценивании того или иного параметра в результате цензурирования. Автор проделал большую вычислительную работу, в результате которой мы имеем возможность оценить степень потери информации для следующих видов ФР: экспоненциального, Вейбулловского, минимальных и максимальных значений (Гумбеля), нормального и логнормального, Лапласа, Рэлея, логистического, Коши и гамма. Стоит отметить, что ещё более подробные результаты тех же самых расчетов практически в то же самое время были опубликованы в журнале "Заводская лаборатория" [70]. (Я бы рекомендовал регулярно просматривать этот журнал всем, кто занимается обработкой экспериментальных данных. Он отличается высокой степенью аккуратности в применении математического аппарата. В частности, для задач надежности стоит обратить внимание на статьи [71,72]). Результаты расчетов приведены в [70] в виде таблиц 2-7, где дано отношение той информации, которую мы получаем при цензурированных испытаниях к тому, что мы имели бы без цензурирования, т.е. при испытаниях до отказа всех испытуемых элементов⁶. Например, из табл.2 следует, что при испытаниях 100 объектов в случае, когда отказало всего 20% выборки, мы, оценивая параметр экспоненциального распределения, получаем $16,83\% \approx 17\%$ той информации, которую имели бы, если бы продолжали испытания до отказа всех 100 объектов. Что это означает для практики? Это означает, что дисперсия оценки интересующего нас параметра экспоненциального распределения будет больше той, которая соответствует нецензурированным испытаниям, в $1/0,17 \approx 5,9$ раз (стандартная ошибка оценки будет больше примерно в 2,4 раза).

Что касается общих соображений о проверке вида ФР в задачах надежности, то автор остается горячим приверженцем графоаналитического метода, лучше всего описанного в старой, но очень хорошей книге Хана, Шапиро [73] (см., также, [74, 75]).

Надежность элементов.

Поскольку различных элементов бесчисленное количество, то в этом разделе обсуждаются данные по ПН тех элементов, к которым автор имел за прошедший период то или иное отношение.

В гл.8 книги [64] приведено много данных по надежности силовых полупроводниковых приборов - активных элементов всех преобразовательных устройств, без которых невозможно никакое преобразование электроэнергии. Длительность периода приработки (этап падающей ИО на рис.3) для этих элементов силовой электроники составляет от 100 до нескольких тысяч часов, и зависит от степени жесткости режима эксплуатации. ИО в период нормальной эксплуатации лежит в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-6} 1/час, этап возрастания ИО (т.е. долговечность приборов) начинается при наработках, больших 100000 часов. Все это вполне соответствует аналогичным зарубежным приборам (см. в [64] подробный список литературы к гл.8). Как и абсолютно для всех полупроводниковых приборов ИО в первую очередь зависит от температуры (Т). В случае

⁶ Таблицей 1 на практике пользоваться не надо, т.к. там приведены так называемые асимптотические оценки, т.е. оценки при $n \rightarrow \infty$.

силовых полупроводниковых приборов эта зависимость имеет вид широко применяемой для всех изделий электронной техники модели Аррениуса:

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (2)$$

где $\lambda(T)$ и $\lambda(T_0)$ - ИО при температурах T и T_0 , соответственно, E_a - константа, называемая энергией активации, k - постоянная Больцмана ($8,625 \times 10^{-5}$ эВ/град). Энергия активации для отечественных приборов лежит в диапазоне 0.3-0.6 эВ. Для зарубежных аналогов этот диапазон чуть выше: 0.5-1.0 эВ.

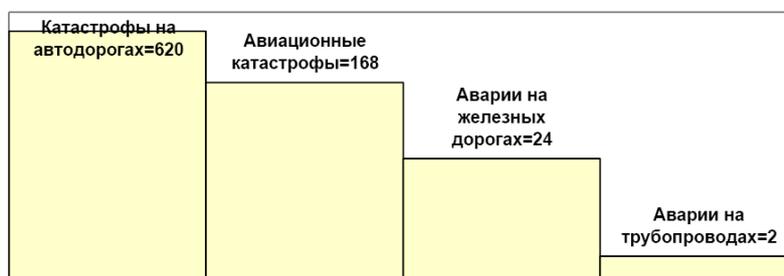
Надо отметить, что зарубежная преобразовательная техника сегодня ориентируется на новое поколение приборов - так называемые IGBT-транзисторы. Их надежность в условиях эксплуатации в первую очередь определяется числом циклов (N_c) температурных перепадов (ΔT), какие они выдерживают⁷. Зависимость числа циклов от ΔT определяется усталостными явлениями в припое, поскольку все вышеупомянутые приборы представляют из себя некий пирог, различные компоненты которого припаиваются друг к другу. Здесь работает хорошо известный всем специалистам по длительной прочности металлов и сплавов закон малоциклового усталости, в силу чего функциональная зависимость числа циклов от перепада температур дается выражением:

$$N_c = \Phi_c / (\Delta T)^m, \quad (3)$$

где Φ_c и m - константы. В [76] приведены данные, из которых следует, что в зависимости от тока и частоты, циклоустойкость IGBT-модулей может меняться в очень широких пределах от миллионов до сотен циклов. Интересная работа по физике отказов силовых диодов, тиристоров и транзисторов опубликована Европейском журнале по силовой электронике [77]. Обзор современных методов анализа отказов и поиска причин их возникновения опубликован в журнале "Quality Digest" [78].

Как я уже отмечал выше, в книге [36] довольно много интересных данных по надежности. В частности, по данным табл.1.6 построена приведенная ниже (рис.4) диаграмма Парето по числу погибших в транспортных авариях в России в 1995 году.

Рис.4. Число погибших в транспортных авариях (Россия, 1995) ([36])

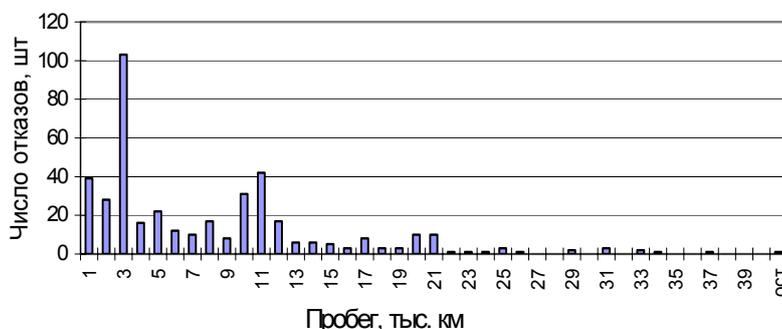


⁷ Дело в том, что, когда через прибор идет ток, он нагревается до некоторой температуры T_{\max} , а потом во время паузы - он остывает до другой температуры - T_{\min} . Разность между T_{\max} и T_{\min} и дает величину температурного перепада ΔT .

Легко видеть, что больше всего людей гибнет у нас на дорогах РФ. Отчасти (но только отчасти!) это связано с проблемами надежности автотранспорта. Интересный материал по надежности иномарок приведен в ссылке [79]. Согласно этому источнику по данным о надежности с 1998 по 2003 гг. лидерами по надежности являются японские автомобили: Honda, Lexus, Mazda, Nissan, Toyota. Однако по данным этого года о надежности автомобилей возрастом до трех лет, первыми идут Lexus, Porsche и Hundai, а Toyota не попала даже в пятерку - [80].

Весьма обширные данные по видам отказов в период гарантийной эксплуатации для отечественных автомашин марки ВАЗ приведены в работе [81] (данные относятся к 1999 году). На рисунке, взятом из работы [81] показано типичное распределение числа отказов для а/м 2110 в зависимости от величины пробега. Из рисунка хорошо виден этап приработки, длящийся примерно до 20000 км пробега.

Рис. 3г Распределение числа отказов для автомобиля ВАЗ 2110 в зависимости от пробега



На втором месте по числу погибших (см. рис.4) идет авиация. То, что с надежностью российской авиации не все в порядке, по-видимому, вполне очевидно. Данных по ПН мне найти не удалось. Однако, определенная информация, имеется.

В статье, посвященной столетию авиации [82], отмечается очень важный момент, не до конца прочувствованный российскими руководителями всех уровней:

**Надежность, так же, как и качество,
очень сильно зависит
от культуры общества и организаций.**

Я не могу выразить это утверждение в виде формулы, но если бы такая формула существовала, то вклад культурной составляющей, возможно, перевешивал бы многие чисто технические проблемы. В частности, в [82] отмечается, что в странах, где приняли систему так называемых "добровольных сообщений", количество аварий снижается. Там, где эта система не принята, количество аварий растет. Дело в том, что боязнь наказаний приводит к сокрытию происшествий, неисправностей, поломок и т.п., если они не повлекли трагического исхода. А если они скрываются, то их причины не ищутся, и значит повышения надежности произойти просто не может, поскольку возможные причины отказов не устраняются. В статье "Выжить удастся редко?" [83] отмечается, что выживаемость отечественных вертолетов примерно в два

раза хуже, чем у американцев. В результате при каждом падении "вертушки" в среднем погибает 60% находившихся на борту людей, тогда как в Америке эта цифра равна 30%. "О какой надёжности можно вести речь, если руководство "Аэрофлота" стремится выпустить самолет в рейс любой ценой" - это цитата из материала, озаглавленного "Аэрофлот" теряет надёжность" [84]. В качестве основных причин отмечены низкая заработная плата и тяжелые условия труда, из-за чего растёт дефицит технического состава и падает его квалификация. При этом отдельные элементы и/или устройства мы по-прежнему можем делать на уровне зарубежных аналогов и превосходя их. Например, в статье [85] рассказывается об устройстве для регистрации, имеющем наработку на отказ свыше 700000 часов при динамическом коэффициенте готовности 0.998.

Теперь вернемся к электронике, но не сильноточной, о которой говорилось выше, а к слаботочной, т.е. той, на которой основан весь современный высокотехнологический мир. Общую ситуацию в нашей стране по этому вопросу лучше всего, на мой взгляд, отражают материалы под общим названием "Качество продукции радиоэлектронного комплекса России. Научно-практическая конференция в Омске" - [86]. Это краткий отчет о совещании, где тон задавали военные, и где было отмечено, что отечественная элементная база по надёжности уступает зарубежной на 1,5-2 порядка. Более того, ряд докладчиков на основе собственного опыта пришли к выводу, что отечественная элементная база даже с приемкой "5" и "9" зачастую уступает зарубежной базе класса "промышленная" во всем диапазоне температурных и механических воздействий. Ещё более грустно, что отечественного кремния, пригодного для нужд современной электроники в России нет и не предвидится. Вот перечень основных причин отказов электрорадиоизделий (из доклада М.И. Критенко):

- схемно-конструктивные недоработки;
- неудачные технические решения;
- неправильное применение электрорадиоизделий (превышение допустимых электрических и температурных воздействий);
- недостатки и нарушения технологического процесса (недопустимые уровни технологических воздействий при монтаже электрорадиоизделий на печатные платы).

Мне кажется, что все вышеперечисленное можно смело отнести к проблемам низкой культуры процесса разработки и постановки на производство, т.е. при наличии реальной, а не бумажной системы качества, соответствующей стандарту ИСО 9001, все перечисленные причины отказов могли бы быть устранены при верификации и валидации соответствующих процедур.

На той же конференции шла речь и новом комплексе военных стандартов по надёжности "Климат" и "Мороз" (более подробно об этих стандартах см. в [87]). Отмечалось и то, о чем выше я уже писал: "Практически разрушена централизованная система сбора, учета и анализа отказов электрорадиоизделий как в сфере производства, так и при эксплуатации..."[86].

На том же сайте www.electronics.ru есть статья [88], посвященная проблемам расчета надёжности при проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Надёжность отечественных элементов предлагается рассчитывать по справочнику, издаваемому "Электронстандартом", надёжность зарубежных элементов - по справочнику MIL-HdBk-217F. И отечественный справочник, и справочник MIL-HdBk-217F имеют одну и ту же методологическую основу: расчет ИО по формулам типа (1)-(3) плюс учет реальных условий с

помощью набора эмпирических коэффициентов. Надо заметить, что в зарубежной литературе по надёжности РЭА, регулярно возникают дискуссии о правомерности коэффициентного метода прогнозирования надёжности, заложенного в справочник MIL-HDBK-217. Одна из относительно недавних статей по этому поводу была опубликована в журнале "Quality and Reliability Engineering International" - [89].

Упомянувшийся выше институт "Электронстандарт" имеет свой сайт, на котором можно заказать нужную литературу - www.elstandart.spb.ru/Core/100/dest_9_1.htm.

Зарубежных работ по механизмам отказов элементов РЭА просто море. Кроме уже упомянутых конференций по физике надёжности, достаточно открыть любой номер журнала "Microelectronics and Reliability", и почти любой номер журнала - "IEEE Transactions on Reliability", или "IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing". В частности, отмечу статью [90] из последнего, которая показалась мне весьма важной для решения проблемы надёжности внутренних межконтактных соединений - проблемы, актуальной для всех изделий электроники. Из журнала "IEEE Transactions on Reliability" хотелось бы обратить внимание на статью с названием "Практическое встраивание надёжности в полупроводниковое производство" [91]. Основная идея статьи очень проста: при современной скорости развития полупроводниковой технологии ждать результатов испытаний на надёжность малоперспективно, поэтому надо заниматься надёжностью на уровне пластин и создавать базу данных о "встроенной" надёжности с априорной информацией, которую можно потом использовать при расчетах надёжности.

Теперь рассмотрим некоторое количество информации о компьютерах и их элементах. Большой фирменный материал по оценке надёжности накопителей для персональных компьютеров приведен в [92]. Речь идет о дисках фирмы "Seagate", а материал фактически содержит методику расчета надёжности в реальных условиях потребителя. Для расчетов предлагается использовать модель Аррениуса (формулу (1)) и ФР Вейбулла. Единственное "но" к этому материалу состоит в том, что параметры распределения Вейбулла предлагается оценивать по результатам реальных испытаний с помощью статистического пакета некоей американской фирмы, каким вряд ли кто из российских пользователей захочет воспользоваться. Но это обстоятельство не является препятствием, поскольку для использования приведенной в [92] методики нужно оценить параметры двухпараметрического распределения Вейбулла, т.е. значения β и θ в формуле (4):

$$F(t) = 1 - \exp(- (t / \theta)^\beta), \quad (4)$$

где β и θ - параметры формы и положения, соответственно. Чтобы это сделать, можно в первом приближении построить эмпирическую ФР на сетке распределения Вейбулла. Техника этого построения лучше всего описана в [40] и [73]. Полученные в [92] значения для наработки на отказ превышают 200000 часов.

В статье [93] приведены достаточно подробные рекомендации по оценке надёжности большого числа компьютеров, используемых на том или ином предприятии, а также по оптимизации способов их резервирования.

Гречкин, Сидельников в своей статье [94] обсуждают вопрос о том, так ли уж надёжно хранить информацию на надёжных накопителях? Суть проблемы вполне тривиальна и связана с

количеством используемых компьютеров и временем хранения информации. В [94] показано, что даже если принять среднюю наработку на отказ равной 750000 часов, то при работе на предприятии 20 компьютеров вероятность отказа одного из винчестеров через три года эксплуатации становится большей 50%. А если на нем хранилось что-то очень важное?! Авторы обсуждают, как наилучшим образом выбрать систему резервного копирования.

Данные по надежности карманных компьютеров, продаваемых на российском рынке, приведены в заметке [95]. Наихудшие показатели у компьютеров фирмы Compaq - коэффициент ненадежности равен 27%, наилучшие - у фирмы Palm - 1% (авторы под коэффициентом ненадежности понимают отношение числа отказов за определенный период времени к количеству проданных за тот же период времени устройств).

В.Н. Ручко в статье "Моделирование повреждений в деталях и надежность металлургического оборудования" [96], ссылаясь на уникальность металлургического оборудования и его высокую безотказность, утверждает, что наиболее перспективным путем обеспечения надежности этого оборудования является "создание специальных систем информации о степени повреждения ремонтируемых деталей, не достигших предельного состояния и не имеющих отказов" и использование впоследствии этой информации для управления надежностью оборудования. Мне кажется, что уникальность оборудования вовсе не мешает использовать гигантский материал, накопленный именно в металлургии по проблеме накопления усталостных повреждений, хотя это совсем не противоречит идее использования информации, появляющейся задолго до наступления критического состояния. К достоинствам статьи [96], на мой взгляд, надо отнести большой список использованной в ней литературы (40 наим.). В работе одной из кафедр Бауманки также рассматривается проблема анализа процесса накопления повреждений в инструменте [97]. В работе разработаны методики оценки ПН массовых быстрорежущих осевых инструментов, и предложены методы повышения этих показателей в 2-2.5 раза.

В журнале "Заводская лаборатория", который я выше уже хвалил, есть очень важная постоянная рубрика - "Обмен опытом". В ней довольно часто публикуются материалы, которые стоило бы брать на вооружение другим предприятиям. В частности, применительно к проблемам надежности, хотелось бы обратить внимание на статью [98], в которой на практическом примере показано, как следует применять метод экспертной оценки в ситуации, когда необходимо ранжировать большое число технологических факторов, влияющих на возникновение дефектов в детали сложного профиля (речь идет об отливках ответственного назначения типа "ротор"). Анкеты экспертных оценок по каждой из двух проанализированных деталей включали по 8 видов дефектов и по 21 и 19 факторов, соответственно. Результатом этой работы стало изменение конструкции литниково-питающей системы и корректировка технологии, что позволило получить 100%-ю годность деталей по рентгеновскому просвечиванию, и снизить в 2-3 раза их отсев другими методами.

Естественно, что занимаются проблемами надежности и в электротехнике и энергетике. Вот несколько примеров из опыта этих отраслей. Ю.Н. Самородов проклассифицировал дефекты турбогенераторов, что позволило повысить надежность этих ответственных изделий электроэнергетики [99]. И.С. Минкина с соавторами разработали алгоритм оценки остаточного ресурса, применительно к высоковольтным выключателям [100]. Рамочкин и Лукацкая получили зависимость числа циклов высоковольтного выключателя до отказа от силы протекающего через него тока [101]. Проблема долговечности контактных соединений в

энергетике больших мощностей изучалась в работе [102], где на основе диагностических данных была построена физическая модель надёжности контактов. В [103] группа авторов обсуждает проблемы эксплуатационной надёжности и продления сроков службы оборудования для Сургутской ГРЭС, а в [104] Л.К. Осика излагает общий подход к обеспечению надёжности электроснабжения потребителей в современных условиях.

Наконец, в конце этого подраздела немного информации о надёжности высоковольтных трансформаторов - очень актуальная тема в свете недавно произошедшего в Москве энергетического кризиса. В июне с.г. в Москве прошел colloquium СИГРЭ, на котором среди прочих обсуждались и проблемы надёжности мощных трансформаторов. В одном из докладов (авторы: Соколов В., Цурпал С., Дробышевский А. "Проблемы надёжности мощных трансформаторов и реакторов. Виды и причины отказов") приведены данные об ИО мощных трансформаторов в зависимости от их наработки. Из рисунков следует, что, например, ИО автотрансформаторов на 500/220 kV примерно постоянна во времени для наработок от нуля и до 30 лет, и колеблется от 0,2 до 0,5%/год. Для трансформаторов на 400MVA, 330kV наблюдается явно выраженный участок приработки длительностью до 3 лет, после чего ИО примерно постоянна, и колеблется от 0,4 до 1,5%/год. (Материалы colloquium будут вскоре доступны для приобретения. Соответствующая информация должна появиться на сайте ВЭИ им. В.И. Ленина – www.vei.ru).

Литература

- В1. Губанов Б.И. Триумф и трагедия "Энергии". Размышления главного конструктора – <http://www.buran.ru/hm/18-3.htm>
- В2. **Щурин В.К.** Проблема надёжности в философском аспекте. - http://www.orenburg.ru/culture/credo/04_2002/14.html
- В3. **Madu Ch.N.** Reliability and quality interface. – International Journal of Quality & Reliability Management, 1999, #7, pp.691-698.
- В4. **Rojas A.R.-F.** Reliability Improvemant vs Quality? An Integrated Approach. – www.aidic.it/italiano/congressi/esrel2001/webpapersesrel2001/349.pdf
1. **Ллойд Д.К., Липов М.** Надёжность. Организация, исследования, методы, математический аппарат. – М.: Сов. Радио, 1964. – 688с.
 2. **Базовский И.** Надёжность. Теория и практика. – М.: Мир, 1965. – 376с.
 3. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности. – М.: Сов. Радио, 1962. – 552с.
 4. **Справочник по надёжности/Под ред. Левина Б.Р.** (в 3-х т.). – М.: Мир, 1969, 1970.
 5. **Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.** Математические методы в теории надёжности. – М.: Наука, 1965. – 524с.
 6. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Математическая теория надёжности. – М.: Сов. Радио, 1969. – 488с.
 7. **Козлов Б.А., Ушаков И.А.** Справочник по расчету надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. Радио, 1975. – 472с.
 8. **Гнеденко Б.В., Ушаков И.А.** О некоторых современных проблемах теории и практики надёжности. – "Вестник машиностроения", 1988, №12, с.3-9.
 9. **Рухин А.Л., Хсиех Х.К.** Обзор советских работ по надёжности. – НКК, 1989, "2, с.3-25.
 10. **Комментарии к статье А.Л. Рухина и Х.К. Хсиеха "Обзор советских работ по надёжности".** – НКК, 1989, №3, с.3-16.

11. Ушаков И.А. Надёжность: прошлое, настоящее, будущее. – ММК, 2001, №5, с.21-25; №6, с.29-32.
12. Ушаков И.А. У истоков. – ММК, 2004, №1, с.
13. <http://iliaf.folderhost.com/smrssl05/index.htm>
14. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38с.
15. Аронов И.З. Методические рекомендации по установлению сроков гарантии, службы (годности) на товары народного потребления в соответствии с требованиями Закона Российской Федерации "О защите прав потребителей". – В сб. Методические рекомендации по исполнению Закона Российской Федерации "О защите прав потребителей". – М.: АО "Сертификация в бизнесе и торговле", 1993. – С.22-35.
16. Аронов И.З., Шпер В.Л. О гарантийных показателях и показателях надёжности. – НКК, 1998, №3, с.54-58.
17. Демидович Н.О. Стандартизация модели отказов. – НКК, 1994, №9, с. 35-64.
18. О стандартизации модели отказов. – НКК, 1997, №3, с.26-40.
19. Шпер В.Л. О стандартизации модели отказов. – НКК, 1997, №10, с. 40-48.
20. Демидович Н.О. Гармонизация терминологии в области надёжности. – ММК, 2002, №10, с.43-47.
21. Белов В.П. и др. О понятиях "надёжность" и "безопасность" технических систем с позиций разработчиков. – ММК, 2003, №10, с.46-49.
22. Надёжность технических систем: Справочник. – Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608с.
23. Надёжность и эффективность в технике: Справочник: В 10т./Ред. Совет: В.С. Авдудевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение.
24. Коновалов Л.В. Роль и приоритетные направления конструкционной надёжности машин при современных тенденциях машиностроения. – НКК, 1997, №5, с.3-17; №6, с.3-18.
25. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем. 4-е изд., испр.и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480с. – www.alib.ru/bs.php4?bs=Lider&id=1150321
26. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – М.: Политехника, 2000. – 248с. - http://chaconne.ru/public_html/shop/index.php?id=2081546
27. Энциклопедия "Машиностроение". Том IV-3. "Надёжность машин". – <http://www.mashin.ru/book/bookcontent.php?kodbook=67>
28. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560с. - <http://www.ozon.ru/?context=detail&id=1345909>
29. Острейковский В.А. Теория надёжности. – М.: Высшая школа, 2003. – 463с. - <http://www.colibri.ru/binfo.asp?cod=139095&prt=359>
30. Антонов А.В., Острейковский В.А. Оценивание характеристик надёжности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 368с.
31. Ярлыков Н.Е. Повышение эффективности контроля надёжности. – М.: Радио и связь, 2004. – 151с. - <http://www.colibri.ru/binfo.asp?cod=143942&prt=359>
32. Черкесов Г.Н. Надёжность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 480с. - <http://www.ozon.ru/?context=detail&id=1904328>
33. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надёжность технических объектов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 328с.
34. Переверзев Е.С. Надёжность и испытания технических систем. – Киев, Наук. думка, 1990. – 328с.

35. **Фундаментальные** проблемы теории точности. Коллектив авторов. – СПб, Наука, 2001. – 504с.
36. **Статистические** методы анализа безопасности сложных технических систем: Учебник/Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, А.И. Елизаров и др. – М.: Логос, 2001. – 232с.
37. **Аронов И.З., Штерн Л.М.** Оценка надёжности персонала в целях анализа безопасности технических систем. – ММК, 2001, №11, с.29-36.
38. **Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б.** Модели отказов. – М.: Сов. Радио, 1966. – 166с.
39. **Михайлов А.В.** Эксплуатационные допуски и надёжность в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. Радио, 1970. – 216с.
40. **Капур К., Ламберсон Л.** Надёжность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 606с.
41. **Mann N.R., Shafer R.E and Singpurwalla N.D.** Methods for Statistical Analysis of Reliability and Lifetime Data. – N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1974.
42. **Lawless J.F.** Statistical Models and Methods for Lifetime Data. - N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1982. – 583P.
43. **Гербуз В.И.** Обеспечение требуемого уровня начальной параметрической надёжности изделий. – НКК, 1994, №5, с.47-53.
44. **Lai C.D., Min Xie, Murthy D.N.P.** A modified Weibull distribution. – IEEE Transactions on reliability, 2003, #1, pp.33-37.
45. **Гродзенский С.Я.** Об универсальных распределениях моментов наступления отказов элементов систем управления. – ММК, 2001, №12, с.34-37.
46. **Гродзенский С.Я.** Оценка надёжности изделий по данным эксплуатации. – ММК, 2002, №8, с.38-40.
47. **Гродзенский С.Я.** Оценка показателей надёжности в случае смеси распределений экспоненциального и Вейбулла. – ММК, 2003, №7, с.43-45.
48. **Громацкий В.А.** Байесовская оценка надёжности для нормального распределения с параметрами из сопряженного семейства распределений. – НКК, 1997, №5, с.45-50.
49. **Merrick, J.W., et al.** A Bayesian Semiparametric Analysis of the Reliability and Maintenance of Machine Tools. - Technometrics, 2003, No. 1, pp. 58-69.
50. **Huei-Yaw Ke.** A Bayesian/Classical Approach to Reliability Demonstration. – Quality Engineering, 2000, #12(3), pp.365-370.
51. **Аронов И.З., Бурдасов Е.И.** Оценка надёжности по результатам сокращенных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 184с.
52. **Скрипник В.М. и др.** Анализ надёжности технических систем по цензурированным выборкам. – М.: Радио и связь, 1988. – 184с.
53. **Буртаев Ю.Ф.** Проверка однородности информации о надёжности при альтернативе общего вида. – НКК, 1998, №6, с.16-22.
54. **Адлер Ю.П. и др.** Бутстреп-моделирование при построении доверительных интервалов по цензурированным выборкам. – Заводская лаборатория, 1987, №10, с. 90-94.
55. **Адлер Ю.П. и др.** Использование бутстреп-метода при определении нижней доверительной оценки показателя долговечности. – НКК, 1987, №9, с.50-54.
56. **Адлер Ю.П. и др.** Применение бутстреп-метода при комплексном прогнозировании ресурса изделий с учетом экспертных оценок. – НКК, 1988, №8, с.29-33.
57. **Адлер Ю.П. и др.** Прогнозирование экспертных оценок технического состояния с использованием метода бутстреп. – НКК, 1989, №12, с.13-21.
58. **Савчук В.Л., Гайдученко П.А.** Опыт применения метода бутстреп для оценивания коэффициента безопасности при расчете конструкций на прочность. – НКК, 1988, №8, с.3-7.

59. Антонов А.В. Об определении индивидуального ресурса изделий атомных станций. – НКК, 1996, №10, с.42-49.
60. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. - 380с.
61. Острейковский В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288с.
62. Мирцхулава Ц.Е. Об одном подходе прогноза старения и надежности плотин. – ММК, 2000, №6, с.37-40.
63. Андреев А.Г., Перегуда А.И. Экспоненциальная оценка показателей долговечности изделия, функционирующего в условиях ударных нагрузок. – ММК, 2004, №12, с.37-41.
64. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках/М.И. Абрамович и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432с.
65. Клиот А.Е. Механизм износа и разрушения электрорадиоэлементов под воздействием приложенного потенциала/В сб. Качество и надежность изделий. – М.: "Знание", 1991, с.53-85.
66. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. - М.: Мир, 1989. - 344с.
67. Демидович Н.О. Особенности проверки соответствия опытного распределения теоретическому в задачах надежности. – НКК, 1999, №11, с.29-33.
68. Лемешко Б.Ю., Постовалов С.Н. О правилах проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – НКК, 1999, №11, с.34-43.
69. Лемешко Б.Ю. Об оценивании параметров распределений и проверке гипотез по цензурированным выборкам. – НКК, 2001, №4, с.32-38.
70. Лемешко Б.Ю. и др. К оцениванию параметров надежности по цензурированным выборкам. – Заводская лаборатория, 2001, №1, с.52-64.
71. Лемешко Б.Ю. О распределениях статистики и мощности критерия типа χ^2 Никулина. – Заводская лаборатория, 2001, №3, с.52-58.
72. Золотухина Л.А. Доверительные интервалы наименьшей длины для параметров показательного двухпараметрического распределения. - Заводская лаборатория, 2000, №11, с.54-57.
73. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 396с.
74. Шпер В.Л. Лучше один раз увидеть, чем много считать. –
75. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312с.
76. Avertin F. et al. Reliability of IGBT-Modules for Traction Applications. - Power Electronics Europe, 2001, #7, pp.15-19.
77. Januszewski St. et al. Semiconductor Device Failures in Power Converter Service Conditions. - EPE Journal, 1998, #3-4, pp.12-17.
78. Martin P.L. Analyzing Semiconductor Failure. - www.qualitydigest.com/dec99/html/semiconductor.html
79. Самые надежные автомобили. - www.n-t.org/tp/ts/na.htm
80. Самые надежные автомобили 2005 года. - www.astera.ru/auto/?id=25726
81. Зенин С.В., Шпер В.Л. Применение диаграмм Парето для анализа качества автомашин ВАЗ. – ММК, 2000, №11, с.4-10.
82. Сто лет авиации. - www.rg.ru/2003/12/17/aviaciya.html
83. www.rg.ru/2003/08/26/Vyjitudaetsvaredko.html

84. **Виркунен В.** "Аэрофлот" теряет надёжность. Техники авиакомпании предупреждают: качество ремонта самолетов падает. - www.newizv.ru/news/?id_news=26044&date=2005-06-10
85. **Шагаев И., Пляскота С.** - www.aviation.ru/afherald/7896/pg82.rhtml
86. www.electronics.ru/640.html?searchstring=Надёжность
87. **Писарев В. и др.** Система испытаний - основа обеспечения надёжности РЭА. - www.electronics.ru/267.html
88. **Лунев С., Майоров В.** Расчет надёжности в процессе проектирования радиоэлектронных систем. - www.electronics.ru/430.html
89. **Wong Kam L.** What is wrong with the existing reliability prediction method? - Quality and Reliability Engineering International, 1990, pp.251-257.
90. **Runnels S.R. et al.** Advanced Experimental and Computational Tools for Robust Evaluation of On-Chip Interconnect Reliability. - IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2002, #3, pp.355-365.
91. **Wei-Tin Kary Chen, Ch. Hung-Jia Huang.** Practical "building-in reliability" approaches for semiconductor manufacturing. - IEEE Transactions on Reliability, 2002, #4, pp.469-481.
92. **Оценка** надёжности накопителей, установленных в настольных компьютерах и бытовых электронных устройствах. - www.ixbt.com/storage/reliability.shtml
93. **Гайлунов В.** Рекомендации по оценке надёжности функционирования компьютеров и использованию резервных компьютеров на предприятии. - www.cio-world.ru/techniques/argument/33594/
94. **Гречкин А.Н., Сидельников А.И.** Техничко-экономическое обоснование системы резервного копирования. - www.ntfnt.ru/publ/store.htm
95. **Хавжу Д.** Надёжность карманных компьютеров. - www.hpc.ru/lib/arts/1140/
96. **Ручко В.Н.** Моделирование поврежденности в деталях и надёжность металлургического оборудования. - www.techno.edu.ru:16000/db/msg/22348.html
97. www.techno.edu.ru:16000/db/msg/22348.html
98. **Крушенко Г.Г. и др.** Анализ дефектности отливок методом экспертных оценок. - Заводская лаборатория, 2000, №5, с.64-66.
99. **Самородов Ю.Н.** Атлас дефектов и неисправностей турбогенераторов. - Электрические станции, 2004, №12, с.50-55.
100. **Минкина И.С. и др.** Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя. - Электрические станции, 2004, №12, с. 58-62.
101. **Рамочкин Ю.Г., Лукацкая И.А.** Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер с аксиальным магнитным полем. - Электротехника, 2005, №2, с.9-15.
102. **Власов А.Б.** Прогнозирование долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики. - Электротехника, 2003, №12, с.27-33.
103. **Резинских В.Ф. и др.** Эксплуатационная надёжность и перспективы продления сроков службы тепломеханического оборудования Сургутской ГРЭС-2. - Электрические станции, 2005, №3, с.11-15.
104. **Осика Л.К.** Пути обеспечения надёжности электроснабжения потребителей - субъектов оптового и розничного рынков электроэнергии на современном этапе реформирования энергетики. - www.np-ats.ru/getfile.jsp?fid=177

(продолжение – в следующем номере журнала)