

Б. Р. Левин

Справочник по надежности

Том 1

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
Б11

Б11 **Б. Р. Левин**
Справочник по надежности: Том 1 / Б. Р. Левин – М.: Книга по Требованию,
2013. – 338 с.

ISBN 978-5-458-34429-6

ISBN 978-5-458-34429-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРВОГО ТОМА РУССКОГО ИЗДАНИЯ СПРАВОЧНИКА

Одной из характерных примет научно-технического прогресса является резкое возрастание потока информации и связанное с ним развитие новых технических средств передачи, переработки и хранения информации. Постоянное усложнение этих технических средств, находящихся в прямой зависимости от многообразия и ответственности функций, выполняемых современными автоматизированными системами, выдвигает ряд проблем научной методологии, технического проектирования, технологии производства, испытаний опытных образцов и эксплуатации серийных или уникальных изделий. Центральное положение занимает комплексная проблема эффективности больших систем, неотъемлемую часть которой составляет проблема обеспечения надежности.

Проблема обеспечения надежности, четко сформулированная в ее современном виде примерно лет пятнадцать назад применительно к радиоэлектронным устройствам, построенным из большого числа элементов, состоит в разработке методов создания таких изделий, которые способны выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени. В таком общем виде надежность является универсальным понятием, охватывающим любую техническую специализацию. Методы изучения и контроля надежности широко используются во многих отраслях промышленности. Обеспечение надежности выпускаемой продукции стало одной из важнейших общегосударственных задач прежде всего потому, что ненадежность наносит огромный экономический ущерб народному хозяйству, связанный с затратами на запасные части, ремонтное оборудование и содержание технического персонала, не говоря уже об угрозе безопасности и здоровью людей, о политических и моральных факторах, которые даже не поддаются оценке обычными экономическими показателями. Практический опыт показывает, что в большинстве случаев выгоднее затратить дополнительные средства на обеспечение надежности на этапе разработки изделия, чем расплачиваться ненадежностью изделия при его эксплуатации за кажущуюся экономию средств при проектировании.

Поэтому не случайно, что последние годы к проблеме надежности приковано внимание больших коллективов ученых и инженеров. В ряде промышленно-развитых стран в государственных масштабах созданы специальные службы надежности. Опубликовано огромное количество работ, посвященных вопросам надежности. Вместе с развитием теории и накоплением практического опыта в области надежности, ростом количества публикаций и специалистов, заинтересованных в непосредственном использовании достижений в указанной области, постоянно возникает необходимость в монографиях, обобщающих и систематизирующих результаты (в достаточно компактном виде). Если несколько лет назад существовал пробел в монографической литературе по надежности, то в настоящее время положение существенно изменилось. На русском языке нет теперь острого недостатка в подобных монографиях, способных удовлетворить интересы специалистов различных профилей и уровней. Издательство «Советское радио» начиная с 1966 г. выпускает специальную библиотеку инженера по надежности. Однако все еще мало работ, посвященных практическим методам обеспечения надежности при проектировании, производстве и эксплуатации, методам испытаний и отработки схем и конструкций. Важнейшей задачей является также издание учебных пособий, поскольку самостоятельные курсы надежности постепенно прочно внедряются в программы высшей школы и факультетов усовершенствования, и справочников, необходимых широкому кругу специалистов в их повседневной практической работе.

Предлагаемый русский перевод американского справочника по надежности, составленного высококомпетентными авторами, многие из которых известны по многочисленным публикациям в специальной периодической литературе и выступлениям на ежегодных американских симпозиумах по надежности и контролю качества, несомненно, привлечет внимание советских специалистов не только обширным собранием полезных фактов и рекомендаций, формул, вспомогательных таблиц и номограмм, но и обзором состояния проблемы надежности в США.

Изображения удобства пользования весьма объемистый справочник при переводе был разделен на три тома, соответствующие приблизительно трем основным направлениям проблемы, которые отмечены в предисловии В. Айресона. Отбор и характер изложения материала во всех трех томах не соответствуют установившимся представлениям о построении справочников. Так, например, в первом томе «ортодоксально» справочными являются лишь четвертая глава и приложения, а остальные главы — обзорные статьи, которые содержат основные результаты, относящиеся к обсуждаемой теме.

Любой перевод научно-технической литературы с иностранного языка сопряжен с неизбежными трудностями, которые возникают в связи с расхождениями в терминологии и обозначениях, используемых в оригинале и принятых в отечественной литературе. В области надежности, как и во многих других «молодых» научных и технических дисциплинах, вопросы терминологии связаны не только и, возможно, не столько с семантическими аспектами, сколько с неустановившимися определениями понятий и количественных характеристик. Поскольку эти вопросы сосредоточены главным образом в первом томе предлагаемого перевода справочника, мы сочли уместным не ограничиться как неизменным элементом редакторского этикета лишь формальным упоминанием о сложности терминологической проблемы.

В начале 1958 г. на страницах журнала «Радиоэлектронная промышленность» была проведена широкая дискуссия по вопросам терминологии в теории надежности, итоги которой были подведены 25 июля того же года на заседании секции надежности Научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова. Почти одновременно попытки точных определений надежности были предприняты в США. Как отмечает Райерсон (автор пятой главы настоящего справочника) в обзорной статье, посвященной 50-летию Института радиоинженеров¹⁾, «этот вопрос (терминологии. — Б. Л.) является, вероятно, одной из главных проблем в существующем положении с надежностью в нашей стране». При обсуждении проекта терминологии на IV американском симпозиуме по надежности и контролю качества (Вашингтон, 1958) выявилось, что почти каждое предлагаемое определение является спорным. Это обсуждение продолжалось на следующем симпозиуме, а тем временем по объединенной программе ряда ведомств США был выпущен прсменный словарь терминов и определений, связанных с надежной продукцией. Аналогичную задачу выполнил Комитет по терминологии АН СССР, опубликовав в 1962 г. терминологию по теории надежности в области радиоэлектроники. В настоящее время действует утвержденный Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР государственный стандарт «Надежность в технике. Термины» (ГОСТ, 13377-67, группа ТОО), содержащий 24 основных термина.

Определение значительного количества терминов в данном американском справочнике отличается от определения основных терминов, которые установлены упомянутым выше ГОСТом. Переводчики и редактор не ставили перед собой задачу строго

¹⁾ Proc. IRE, 50, № 5, 1321—1339 (May 1962).

соблюдать рекомендации ГОСТа при переводе, так как для этого потребовалась бы существенная переработка, а в некоторых случаях и оригинальное творчество. Ни то, ни другое не представлялось возможным. Однако, имея в виду утилитарную роль этого справочника в повседневной практике инженера, мы считаем необходимым обратить внимание читателя здесь (а также в подстрочных примечаниях к переводу) на основное отличие терминологии, принятой в данном издании, от рекомендуемой ГОСТом.

Авторы справочника часто отождествляют определенное свойство изделия с соответствующей количественной характеристикой. Таковы, например, основополагающие определения в разд. 1.3д (курсив мой. — Б. Л.):

а) «Надежность — *вероятность* того, что система сохранит работоспособность по крайней мере на протяжении заданного промежутка времени при использовании ее в определенных условиях».

б) «Оперативная готовность — *вероятность* того, что в любой момент времени система либо работает удовлетворительно, либо готова к работе по требованию в заданных условиях эксплуатации».

в) «Ремонтоспособность — *вероятность* того, что неисправная система будет доведена до состояния работоспособности за данное время ремонта».

Некоторые термины размножаются добавлением эпитетов и не имеют эквивалентов в отечественной литературе (надежность при выполнении задачи, внутренняя готовность и др.). Иногда же, напротив, в одном термине объединяются несколько понятий. Таков, например, термин «время жизни», который может означать либо долговечность, либо ресурс, либо срок службы. В некоторых случаях при переводе пришлось отказаться от авторского термина для более точного воспроизведения смысла. Архаический термин «опасность отказов» заменен везде «интенсивностью отказов».

Следует отметить также и другую особенность справочника, которая относится к его методическому построению и состоит в том, что вопросы выбора моделей отказов, расчетов на стадии проектирования и испытаний изготовленной аппаратуры не разграничиваются отдельными главами. Эти вопросы рассматриваются параллельно в нескольких главах, иногда с различных принципиальных позиций. Читатель должен, хотя бы в самом общем виде, иметь четкие представления о принципиальной и практической стороне каждой из указанных групп вопросов.

Общепринято в современной теории надежности рассматривать отказ, т. е. нарушение работоспособности, как случайное

событие. Для количественного описания отказов вводятся математические модели — функции распределения вероятностей различных интервалов времени, отражающих процессы функционирования изделий и их элементов. В настоящее время используется небольшое число математических моделей отказов, внезапных и постепенных (износных), которые не охватывают всех, иногда даже и основных взаимосвязей (с точки зрения надежности), имеющих место в аппаратуре. Однако без таких моделей построение содержательной и конструктивной теории вообще невозможно. Пригодность модели отражает уровень наших знаний о физике отказов.

Расчет надежности на стадии проектирования, когда конструктор уже составил примерную схему устройства, возможен лишь в том случае, если математическая модель отказов задана полностью. Такой расчет авторы справочника называют предсказанием надежности, что, строго говоря, не совсем точно. На наш взгляд, предпочтительнее называть этот расчет априорным анализом надежности выбранной схемы по заранее принятой модели отказов. Продуктивность и реализуемость априорного анализа зависят от того, насколько модель близка к действительности и проста для практического использования. Даже в тех случаях, когда результаты априорного анализа в силу несовершенства модели не могут претендовать на хорошее соответствие истинным показателям надежности, ими нередко можно воспользоваться с целью сравнения различных вариантов построения или отыскания относительно «слабых» мест конструкции. Математическим аппаратом априорного анализа надежности является в основном теория вероятностей и теория случайных процессов, а для восстанавливаемых систем также и теория массового обслуживания.

В справочнике обстоятельно рассмотрены большинство используемых в настоящее время моделей надежности. Априорному анализу надежности отводится сравнительно мало места. Тем, кому потребуется произвести расчет надежности сложных резервированных систем (невосстанавливаемых или с восстановлением) и решать специальные задачи резервирования, необходимо будет воспользоваться дополнительной литературой, указанной в конце первого тома. Для получения сведений о методах априорного анализа постепенных отказов, расчета вероятности невыхода за границы поля (объема) допусков совокупности параметров изделия, определяющих его работоспособность на заданном интервале времени, также придется обратиться к другим источникам. Нет в справочнике указаний на методы оптимального синтеза системы из ненадежных элементов, обладающей заданными показателями надежности. Наконец,

отсутствуют необходимые сведения о таком перспективном методе исследования функционирования и надежности сложных систем на стадии проектирования, доводки и модернизации, как вероятностное моделирование на электронных цифровых вычислительных машинах. Этому вопросу в последние годы посвящена обширная литература (см., например, § 4.5 и библиографию в книге И. А. Большакова, Л. С. Гуткина, Б. Р. Левина, Р. Л. Стратоновича «Математические основы современной радиоэлектроники», «Советское радио», 1968).

Большое внимание авторы справочника уделяют вопросам испытаний изделий на надежность и анализу эксплуатационных данных. Эти вопросы, пожалуй, выдвинуты на первый план и обсуждаются с различных точек зрения: теоретической, технической и организационной. Читатель обнаружит их в каждой главе первого тома, хотя здесь в соответствии с назначением этих глав содержатся главным образом статистические методы извлечения информации о показателях надежности из выборочных данных, получаемых в результате специальных испытаний, или из эксплуатационных данных. Они имеются и в большинстве глав второго и третьего томов. Как правило, речь идет о параметрических методах, которые указывают наилучшие (в смысле некоторого критерия качества) алгоритмы обработки наблюдаемых величин (так называемые статистики), позволяющие оценить неизвестные параметры модели отказов или принять решение о соответствии этих параметров заданным техническим условиям. Иначе говоря, и в этом случае модель отказов (т. е. функция распределения вероятностей) может быть известной, но не полностью, а лишь с точностью до некоторых неизвестных параметров, информация о которых в виде оценок или решений извлекается из конечной совокупности выборок. В справочнике содержатся краткие указания и на непараметрические методы (критерии согласия, порядковые статистики), которые могут быть использованы при отсутствии априорной информации о виде функции распределения вероятностей, определяющей модель отказов. Один из разделов (разд. 5.4.5) посвящен ускоренным испытаниям на надежность элементов, при которых создаются форсированные нагрузки, приводящие к повышенной частоте отказов, и устанавливаются соотношения, позволяющие расчетным путем перейти от количественных показателей надежности при форсированных нагрузках к показателям, соответствующим условиям нормальной эксплуатации.

Следует отметить, что положения, связанные с целесообразностью априорного и апостериорного (т. е. по результатам испытаний) анализа надежности, до сих пор в значительной мере остаются дискуссионными. Существуют еще диаметрально про-

тивоположные точки зрения: согласно одной из них, вероятностная количественная оценка показателей надежности некоторых технических устройств на отдельных этапах разработки принципиально невозможна, согласно другой, практически возможно дать такую оценку любым техническим устройствам. Даже в одном авторском коллективе американского справочника нет единого мнения по этому вопросу. Оптимизму К. Райерсона, утверждающему, что «большинство испытаний на надежность просты и осуществить их нетрудно, если понаты основные требования», противостоит умеренная осторожность Д. Деллинджера, который предупреждает, что без довольно обширной предварительной информации результаты испытаний «либо бесполезны, либо, что еще хуже, приводят к ошибочным заключениям».

Первый том содержит пять глав и приложения; остальные главы включены в последующие два тома справочника. Первая глава, хотя и называется «Эффективность систем», посвящена главным образом определениям основных понятий и количественных показателей надежности, связанных с безотказностью, готовностью и восстанавливаемостью. Дается несколько упрощенное определение эффективности как вероятности того, что система выполнит свое назначение на заданном интервале времени при работе в определенных условиях. При более полном определении вводится пространство состояний системы и распределение вероятностей состояний, причем для каждого состояния определяется функция, характеризующая показатель качества функционирования системы. Эффективность представляет среднее значение этого показателя по вероятностной мере в пространстве состояний. В конце первой главы приведены статистические данные, полученные при эксплуатации 24 однотипных радиолокационных станций.

Во второй главе обстоятельно рассмотрены математические модели отказов, включая распределение Вейбулла, гамма-распределение, нормальное, логарифмически нормальное, Гумбеля и др. Третья глава посвящена планированию испытаний на надежность. Здесь рассмотрены три этапа, предшествующие испытаниям: проверка однородности испытываемой партии изделий, в частности при экспоненциальном распределении, выбор вида математической модели отказов для проведения испытаний и, наконец, принятие одного из известных планов (процедур) испытаний на основании анализа рабочих характеристик планов применительно к конкретным задачам испытаний. К этой главе непосредственно примыкает пятая глава (включенная по этой причине в первый том; в оригинале это глава 15), в которой дается краткая характеристика различным видам приемочных

испытаний на надежность и подробно излагаются статистические методы обработки результатов испытаний для трех групп изделий: элементов, аппаратуры, систем.

Четвертая глава представляет математический справочник (в строгом смысле) по теории вероятностей и математической статистике, составленный в очень удобной для использования форме, объем которого вполне достаточен для большинства инженерных расчетов. Ее хорошо дополняют приложения А (таблицы) и Б (графики). В конце приводится библиография по надежности, дополненная редактором перевода.

Следует отметить, что в оригинале имеется относительно большое число опечаток, пропусков и даже ошибочных формул и определений. Замеченные недостатки подобного рода исправлялись, конечно, при переводе, но было бы нереальным для редактора и переводчиков надеяться, что обнаружены все погрешности оригинала. Подавляющее большинство обозначений оставлено такими же, как и в оригинале, хотя не всегда эти обозначения удачны и многие не соответствуют привычным символам, используемым в отечественной литературе по надежности и математической статистике. Все ссылки на библиографические источники перенесены в конец соответствующих глав. Дополнительные ссылки, сделанные редактором, отмечены звездочкой. В некоторых случаях представлялись целесообразными небольшие сокращения в тексте. Предметный указатель ко всему справочнику помещен в конце третьего тома.

Перевод первого тома справочника выполнен Ю. Г. Епишиным (гл. 2, 4, 5, приложения) и Б. А. Смирениным (гл. 1, 3).

Б. Р. Левин

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Надежность как отдельное требование при проектировании и производстве и как самостоятельная дисциплина сформировалась сравнительно недавно, хотя изучение последствий отказов той или иной системы началось вместе с зарождением промышленности. Понятие «надежность» тогда не использовалось, однако изобретателей первого парохода интересовала способность котлов и двигателей выдерживать длительные трансатлантические рейсы. На случай отказа паровой машины предусматривался резерв в виде парусов. В городах не решались переходить на газовое освещение улиц и прокладывать газопроводы из-за опасения, что весь город погрузится в темноту при аварии на газовой магистрали. Предполагалось даже, что злоумышленники могут специально повредить газопровод с целью совершения преступлений в темноте.

Фирма «Додж Бразерз», придумав много лет назад лозунг «Доверие к Доджу», имела в виду надежность. Несмотря на то что в автомобилях американского производства давно применялся электростартер, они еще долго снабжались ручным стартером (например, автомобиль «Триумф TR-3» выпуска 1960 г.). «Титаник» считался судном, которое не может затонуть, и, по-видимому, переоценка его надежности сыграла определенную роль в гибели корабля.

Вопросы, затронутые в этих примерах, аналогичны основным современным проблемам, связанным с обеспечением надежности. Будет ли аппаратура работать тогда, когда это понадобится? Будет ли она работать достаточно долго, выполняя требуемые функции? Сможет ли оператор или потребитель, устранив отказы и неисправности, выполнить намеченную программу? К каким затратам или издержкам приведет отказ? Какой ценой достигается снижение вероятности отказов или их предупреждение? Как долго может работать аппаратура без ремонта или профилактического обслуживания? Осуществляемые в настоящее время программы в области надежности должны, с одной стороны, ответить на поставленные вопросы, а с другой стороны,

дать методы, гарантирующие достижение наиболее экономичного соотношения между затратами и выгодами при проектировании, разработке и производстве той или иной продукции.

Хотя еще в прошлом веке и первой четверти этого столетия, для которых был характерен неторопливый ритм жизни, эти проблемы являлись весьма серьезными, однако последствия отказов не были столь драматичны и столь катастрофичны, как в настоящее время. Появление мощной скоростной авиации и очень сложной военной техники, а также необходимость сокращения сроков разработки означают, что теперь нет времени на то, чтобы действовать старыми методами проектирования, проверки, повторного проектирования и повторной проверки до тех пор, пока будет получена вполне удовлетворительная продукция. В период с 1945 по 1951 г. стало очевидно, что существующие методы проектирования, разработки и производства необходимо изменить с тем, чтобы исключить сложные системы, зачастую требующие принципиально новых научно-технических решений, можно было проектировать и изготавливать в относительно короткие сроки, обеспечивая при этом высокую вероятность удовлетворительного выполнения требуемых функций. Таким образом, надежность обуславливается практической необходимостью.

Как и при развитии любой новой области исследований, цели в области надежности были сформулированы достаточно ясно, однако не было единого мнения о методах их достижения. К тому же промышленные организации и правительственные комитеты внезапно были поставлены перед необходимостью осуществлять реальные программы в области надежности. Эти программы требовали не только строгого соблюдения сроков выпуска сложнейших систем, но и количественного измерения показателей надежности. Крайне необходимо было дать количественное определение понятия надежности системы. С этой целью было накоплено много данных в виде математических и статистических моделей. Однако количественное измерение успеха той или иной программы мало помогало в решении вопроса о том, какие разделы следовало бы включить в программу обеспечения надежности. Инженеры, ученые и специалисты в области промышленного производства не получали почти никаких указаний относительно того, каким образом им следует добиваться необходимой надежности. Руководители предприятий, ответственные за осуществление конкретных программ, также получали мало помощи в вопросе правильного распределения имеющихся в их распоряжении средств, отпущенных для повышения надежности продукции. В 50-е годы по этому вопросу высказывалось мно-