

## Основные факторы эксплуатационной надежности мощных передающих установок

© Д.В. Клочкова<sup>1</sup>, Н.И. Сидняев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», Москва, 127083, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены результаты исследований основных факторов эксплуатационной надежности радиоэлектронных устройств, явлений и процессов, проходящих в материалах элементов технических устройств в зависимости от различных факторов. Рассмотрено влияние этих процессов на изменение свойств и параметров материалов элементов, на их долговечность и надежность. Предложены способы сбора и обработки информации о надежности радиоэлектронных блоков, направленные на повышение надежности посредством уточнения методов расчета, совершенствования конструкции, технологии изготовления и правил эксплуатации, контроля функционирования и ремонта. Для получения информации о надежности радиодеталей, элементов и устройств в целом в статье приведены аналитические расчеты на долговечность, стендовые и контрольные испытания на надежность, сведения о результатах эксплуатации. Проведены расчеты для определения минимально необходимого числа наблюдений наработку до отказа блока. Кратко изложены основы теории математической статистики. Значительное внимание уделено вопросам обеспечения надежности элементов, используемых в радиоэлектронике. Описана методика проверки режимов элементов по параметрам, имеющим предельно допустимые значения, а также методика расчета характеристик надежности; даны примеры расчетов. Подробно изложены мероприятия по повышению надежности аппаратуры в процессе ее проектирования и производства, рассмотрены вопросы сохранения надежности.*

**Ключевые слова:** надежность, отказ, прогноз, теория, функция распределения, наработка, интенсивность отказов, радиоэлектронное оборудование, долговечность, математическая статистика.

**Введение.** Надежность является одной из основных проблем радиоэлектронной техники [1, 2]. Особое значение приобретает надежность современной радиоэлектронной техники, устанавливаемой в сложных системах и изделиях, которые включают в себя до  $(3...5) \cdot 10^5$  компонентов, часто работающих в условиях высоких температур, скоростей, механических или электрических нагрузок, мощных радиационных излучений. В то же время отказы современных сложных технических систем (крупные электростанции, энергосистемы, радиоэлектронные станции и т. п.) сопряжены с большими техническими и экономическими потерями. Все это вызывает необходимость интенсивного развития математических и физико-технических основ надежности и разработки более полных и точных инженерных методов расчета изделий и систем на надежность [3–7]. За последние 10–15 лет существенное развитие получили математические аспекты теории надеж-

ности [1, 8–20]. Однако повышенное внимание стали уделять и вопросам, связанным с физико-техническими аспектами, с физикой отказов [13, 21–26].

Так например, надежность систем и устройств радиоэлектронных станций (РЭС) закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении [2, 4–6]. На практике при эксплуатации стоит задача не только сохранения первоначального уровня надежности: иногда этот уровень оказывается недостаточным вследствие изменения расчетных условий работы. В процессе эксплуатации нередко решаются задачи повышения надежности существующей аппаратуры путем модернизации отдельных узлов, элементов или системы управления [8, 16, 21, 22, 26].

Необходимые условия для решения указанных выше задач создают предпосылки развития науки и техники в области разработки новых конструкционных материалов [24], методов упрочнения и повышения износостойкости восстанавливаемых элементов, новых электрических систем с требуемыми характеристиками, освоение отечественной промышленностью современных устройств автоматического контроля технического состояния устройств, блоков автоматического контроля технического состояния аппаратуры и блоков автоматического управления, включая мини-ЭВМ и микропроцессоры [4, 7, 11, 13, 21]. При использовании управляющих вычислительных машин в сочетании с теорией оптимального управления не только повышается производительность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), но и стабилизируется режим ее работы, уменьшается общее число включений в течение рабочего цикла, ограничиваются динамические нагрузки и, следовательно, повышается надежность работы.

Гарантией высокого уровня надежности аппаратуры на этапе проектирования РЭС являются внедрение уточненных методов расчета на прочность и долговечность конструкций и деталей, применение многокритериальных методов оптимизации при конструировании устройств из РЭА с учетом основных эксплуатационных факторов, использование материалов с улучшенными свойствами, введение резервирования, разработка правильной технологии изготовления аппаратуры и эффективных методов контроля качества [8, 21, 26]. Важной является выработка рациональных инструкций по эксплуатации и оптимальных правил поиска неисправностей.

Обеспечение надежности аппаратуры РЭС в процессе изготовления, в первую очередь, достигается в результате строгого соблюдения технологической дисциплины и применения эффективных методов контроля готовых элементов, качества сборки узлов РЭА и устройства в целом.

В период эксплуатации можно выделить следующие основные пути обеспечения и повышения надежности аппаратуры РЛС:

- создание благоприятных условий в процессе хранения и транспортирования устройств к месту эксплуатации. Строгое выполнение правил использования устройства в целях обеспечения соответствия фактических нагрузок и режимов работы расчетным; своевременное и качественное выполнение технического обслуживания (ТО) и ремонта, в частности, строгое соблюдение регулировочных параметров; использование новых, высококачественных материалов, соответствующих конкретным условиям работы радиоэлектронных установок;

- защита устройства от вредных воздействий окружающей среды. В частности, применение материалов с малым количеством примесей и локальных дефектов структуры, защита элементов от проникновения в них веществ из окружающей среды, защита от энергетических воздействий и т. п.; установка дополнительных вентиляторов или обогревателей для обеспечения благоприятного температурного режима блоков управления РЛС;

- проведение ремонтов с использованием новейших достижений науки и техники в области создания материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, методов упрочнения и повышения износостойкости восстанавливаемых деталей, совершенствование организации и материальной базы ремонтной службы РЛС;

- внедрение эффективных методов контроля качества элементов в процессе ремонта, а также современных методов комплексного безразборного диагностирования отдельных деталей или устройства в целом и при выполнении технических осмотров и освидетельствований;

- сбор достоверной информации об условиях использования устройства, режимах работы и фактической долговечности отдельных узлов РЭА, ее обработка и анализ в целях подготовки организационных технологических и технических мероприятий по повышению надежности РЛС, используемых и вновь выпускаемых устройствах;

- модернизация узлов с недостаточной надежностью, установка дополнительных приборов безопасности, а также устройств текущего контроля технического состояния и автоматической сигнализации в случае выхода параметров устройства за установленные пределы;

- модернизация системы управления аппаратурой, включая внедрение элементов автоматического управления, в целях уменьшения электрических нагрузок и оптимизации режимов работы устройства;

- уточнение правил использования и режима ТО применительно к данным условиям работы аппаратуры на основе накопленного опыта, новых научных исследований в области эксплуатации РЛС и в других областях использования;
- повышение квалификации обслуживающего персонала, обобщение и распространение передового опыта сохранения и увеличения надежности аппаратуры РЛС;
- внедрение научной организации труда операторов, бригад ТО и ремонта, повышение персональной ответственности за техническое состояние аппаратуры РЛС и материальной заинтересованности в эффективности ее использования в течение всего срока службы РЛС;
- совершенствование структуры и содержания служб технического надзора на всех этапах эксплуатации аппаратуры РЛС — монтажа, использования, ТО и ремонта.

**Статистическая обработка первичной информации.** Целью сбора и обработки информации о надежности РЭА-блоков является повышение надежности системы посредством уточнения методов расчета, совершенствования конструкции, технологии изготовления и правил эксплуатации, включая режимы ТО, контроля функционирования и ремонта [5, 9, 13]. Для получения информации о надежности радиодеталей, элементов и устройств в целом используются следующие основные источники: аналитические расчеты на долговечность, стендовые и контрольные (приемо-сдаточные) испытания на надежность, сведения о результатах эксплуатации, содержание ремонтных работ [16, 17, 22].

После создания опытного образца или выпуска первой серии устройств информацию о надежности можно получить в результате испытаний на специальных стендах. Испытательные стенды оборудуют приводами, нагружающими устройствами, необходимыми контрольно-измерительными и записывающими приборами. На современных стендах предусмотрены программирующие устройства. С помощью таких устройств, часто на базе современных компьютеров, проводят автоматическое нагружение испытываемого изделия в режиме, близком к эксплуатационному. При наличии математического описания взаимодействия системы привод–агрегат–исполнительный орган используют метод математического моделирования при управлении испытаниями с учетом вероятностного характера реальных нагрузок в электрических устройствах [15–21].

Стендовым испытаниям обычно подвергают только отдельные узлы и элементы электрических устройств: транзисторы, резисторы, конденсаторы и т. п. Приработку элементов в сборе, приемо-сдаточные испытания проводят под нагрузкой на заводах, после чего отбраковывают отказавшие элементы со скрытыми производ-

ственными дефектами и стабилизируют параметры оставшихся элементов. Наиболее достоверным источником информации о надежности РЛС являются результаты эксплуатации при типовых режимах и условиях использования (при типовых электрических и внешних нагрузках с соблюдением заданных контролируемых параметров и критериев пригодности). Различают опытную, подконтрольную и реальную эксплуатацию.

Опытную эксплуатацию проводит проектная организация или завод-изготовитель в условиях, максимально приближенных к натурным. В ряде случаев опытную эксплуатацию осуществляют на базовых эксплуатационных предприятиях. При этом ведут регулярный контроль и учет работы аппаратуры, для чего устанавливают дополнительные устройства и приборы: счетчики часов работы, числа рабочих циклов и др. [2, 21].

Подконтрольную эксплуатацию проводят на эксплуатационных предприятиях радиоэлектронной промышленности. Специальный обслуживающий персонал не выделяют. Учет неисправностей и периодический контроль технического состояния блока осуществляют по методике и под наблюдением представителя головной организации по сбору и обработке информации.

В условиях реальной эксплуатации учет неисправностей и контроль технического состояния РЛС выполняют в порядке, установленном в системе эксплуатационного предприятия. Плановые работы проводят до наступления отказа. Однако по их содержанию можно получить информацию о характере и степени повреждения отдельных элементов, прогнозировать их срок службы, судить о ремонтпригодности и других показателях надежности устройства [2, 6]. Время, необходимое для получения достаточного объема информации, определяется не только способом испытаний (стендовые, приемо-сдаточные, эксплуатационные), но также типом плана наблюдений. Планы описывают формулой, в которой  $N$  — число объектов наблюдений;  $r$  — число отказов наблюдаемых объектов;  $T$  — календарная продолжительность наблюдений;  $R$  — признак замены новым или восстановления отказавшего изделия;  $U$  — признак исключения отказавшего изделия из числа наблюдаемых.

Согласно ГОСТ 27.502—83, предусмотрены пять основных планов:  $[NUN]$ ,  $[NUr]$ ,  $[NUT]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NRT]$ . Например, план  $[NUr]$  означает, что наблюдениям подлежат  $N$  объектов, отказавшие объекты не заменяют новыми и не восстанавливают, наблюдения прекращают, когда число отказавших объектов достигает  $r$ . При плане

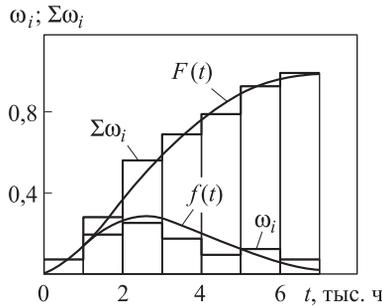
[ $NRT$ ] наблюдают  $N$  объектов, отказавшие объекты восстанавливают, наблюдения проводят в течение календарного времени  $T$ .

Каждый план наблюдений имеет свою область рационального использования. Например, план [ $NUN$ ] удобен для изучения наработки на отказ, при этом не требуется ремонт или замена изделий. План [ $NRT$ ] сложнее, так как предусмотрено проведение ремонтов. Однако информация накапливается значительно быстрее. Кроме того, получают дополнительные данные — о ремонтпригодности изделия.

Подлежащая обработке информация о надежности аппаратуры должна быть достоверной, однородной и достаточно полной. Достоверность информации обеспечивается благодаря точности контрольно-измерительных приборов, квалификации и ответственности лиц, участвующих в ее подготовке. Важны простота и однозначность форм, подлежащих заполнению в процессе сбора информации. Основные виды таких форм стандартизованы [2, 3, 9, 13, 19]. Наличие единых форм обеспечивает также полноту и однородность информации, исключая возможность использования разных единиц измерения для одинаковых показателей, объединение показателей, полученных при разных условиях для разных устройств, и т. п.

Процесс сбора и последующей обработки информации значительно упрощается при использовании электронных документов с готовыми вариантами ответов, которые легко поддаются электронной обработке. Однако требуемый в настоящее время уровень качества и регулярности информации о работе устройств можно обеспечить только при стабильном функционировании автоматизированной системы управления эксплуатацией аппаратуры.

Полученную в результате испытаний или от эксплуатирующих предприятий информацию подвергают сортировке по однородности и совместимости исходных условий, затем анализируют, отбрасывая при этом характерные данные. Проверенную информацию сводят в окончательные таблицы, удобные для последующей статистической обработки вручную или с помощью компьютера [9]. Подготовленная к использованию информация, в том числе в графической форме (рис. 1), служит для определения теоретического закона распределения исследуемой случайной величины — основы прогнозирования ее значений в процессе эксплуатации устройства. Установление теоретического распределения, соответствующего данным наблюдений, проводят методами математической статистики [1, 3, 5, 9]. Степень соответствия и, следовательно, точность дальнейших расчетов зависят от количества информации, т. е. от числа объектов и продолжительности наблюдений [9].



**Рис. 1.** Плотность  $f(t)$  и функция распределения  $F(t)$  наработки до отказа:

$\omega_i$  — частота отказов;  $\sum \omega_i$  — накопленная частота отказов

Существуют готовые таблицы и расчетные формулы для определения минимального числа наблюдений (значений случайной величины)  $N_{\min}$  в зависимости от плана наблюдений и предполагаемого теоретического закона распределения [14–19]. Этот закон применяют на основе предыдущего опыта исследований надежности аналогичных изделий. Если закон распределения невозможно прогнозировать, то значение случайной величины в первом приближении можно устанавливать из условия:

$$\frac{2N_{\min}}{\chi^2_{1-\beta}(2N_{\min})}(\delta+1)^p, \quad (1)$$

где  $\chi^2_{1-\beta}(2N_{\min})$  — квантиль распределения, хи-квадрат [12] с  $2N_{\min}$  степенями свободы, соответствующий односторонней доверительной вероятности  $\beta P\{\chi^2 < \chi^2_{1-\beta}(2N_{\min})\} = 1-\beta$ ;  $\delta$  — относительная ошибка в оценке случайной величины [9];  $p$  — параметр закона распределения Вейбулла [1, 14, 15].

Для деталей механических и электромеханических устройств принимают  $p=2$ , для деталей электронных устройств и сложных восстанавливаемых изделий в целом —  $p=1$ , что соответствует экспоненциальному распределению наработки на отказ. Значения доверительной вероятности на первом этапе наблюдений можно принимать  $\beta = 0,9 \dots 0,95$ , относительной ошибки —  $\delta = 0,1 \dots 0,05$ .

Значение параметра  $p=2$  соответствует коэффициенту вариации наблюдаемых значений  $\eta = 0,51$ . Если при  $p=2$  в выборке из  $N_{\min}$  наблюдений действительное значение  $\eta_{\text{д}} > 0,51$ , то из условия

$$\frac{\Gamma(1+2/p)}{\Gamma^2(1+1/p)} - 1 = \eta_d, \quad (2)$$

находят значение  $p$ , соответствующее реальным данным, повторно вычисляют  $N_{\min}$  и дополняют наблюдения. Значение  $\eta_d > 0,51$  свидетельствует о достаточности  $N_{\min}$ , найденного при  $p = 2$ . Среди возможных законов распределения показателей надежности [5] технических изделий наибольшее число  $N_{\min}$  требуется в случае экспоненциального закона. Поэтому значение  $N_{\min}$ , вычисленное из условия (1) при  $p = 1$ , является достаточным во всех случаях проведения наблюдений [8, 16–20].

При практических расчетах почти всегда оказывается, что  $N_{\min} > 15$ . Поэтому, исходя из приближенной зависимости  $\chi^2_{1-\beta}(2N_{\min}) \approx f(N_{\min}, \beta)$ , для определения  $N_{\min}$  можно также использовать условие

$$\left(1 - \frac{1}{9N_{\min}} + \frac{u_{1-\beta}}{3} \sqrt{\frac{1}{N_{\min}}}\right)^3 = \frac{1}{(\delta+1)^p}, \quad (3)$$

где  $u_{1-\beta}$  — квантиль нормального распределения [3], соответствующий вероятности, равной  $(1 - \beta)$ . В отличие от квантиля  $\chi^2_{1-\beta}$  таблицы значений  $u_{1-\beta}$  имеются в большинстве книг по надежности [1, 14, 15, 20, 25]. Естественно, что из условия (3) получим  $N_{\min} < 15$ , т. е. согласно условию (1) необходим пересчет.

Так, например, можно рассчитать минимально необходимое число наблюдений наработки до отказа блока 6МБ-007 (блока усилителя мощности), чтобы при односторонней доверительной вероятности  $\beta = 0,9$  ошибка в определении средней наработки не превышала  $\delta = 0,1$  [19, 23].

Полагая, что о законе распределения наработки до отказа рассматриваемых блоков нам ничего не известно, воспользуемся условием (2) при  $p = 2$ . В таблице квантилей нормального распределения находим  $u_{1-0,9} = -1,28$ . Подставляя в условие (3) значения,  $u_{0,1}$ ,  $p$  и  $\delta$ , получаем

$$\left(1 - \frac{1}{9N_{\min}} + \frac{1,28}{3} \sqrt{\frac{1}{N_{\min}}}\right)^3 = \frac{1}{(0,1+1)^2}.$$

Таким образом,  $N_{\min} \approx 51$ .

После проведения серии из 51 наблюдения оказалось, что действительный коэффициент вариации  $\eta_d = 0,64 > 0,51$ , т. е. значение  $N_{\min} = 51$  недостаточно для обеспечения требуемой точности расчетов. Поэтому из равенства (2) приходится определять уточненное значение параметра  $p'$ , соответствующее полученным данным:

$$\frac{\Gamma(1+2/p')}{\Gamma^2(1+1/p')} - 1 = 0,64.$$

Используя таблицы гамма-функции [14], находим  $p' = 1,4$ .

Повторно решая равенство (3), получаем  $N'_{\min} = 78$ . Таким образом, необходимо получить дополнительные  $N'_{\min} - N_{\min} = 27$  наблюдений. После их проведения существенного изменения коэффициента вариации наработки до отказа не произошло. Следовательно, серию из 78 наблюдений можно использовать для расчетов средней наработки до отказа блока 6МБ-007 рассматриваемого типа и установления теоретической функции распределения этой наработки.

Отметим, если предположить экспоненциальный закон распределения, т.е. принять  $p = 1$ , то получим  $N_{\min} = 175$  наблюдений.

**Определение функции распределения наработки РЛС до отказа.** Установлено, что показатели надежности элементов относятся к классу случайных величин. Поэтому их следует рассчитывать методами теории вероятностей [1, 5]. Наиболее важной характеристикой надежности элемента является закон распределения наработки до отказа, т.е. закон распределения продолжительности жизни элемента:  $F(t) = P\{\xi < t\}$  — вероятность того, что время жизни элемента  $\xi$  будет меньше некоторого заданного времени  $t$ , иными словами, вероятность того, что элемент откажет до наступления момента времени  $t$ .

Непосредственно через функцию распределения  $F(t)$  или при ее использовании определяют все показатели надежности. Поэтому важнейшей задачей исследования надежности элементов является определение математической формы функции  $F(t)$ , которой соответствует распределение времени жизни элемента. Единственным источником этого служат статистические данные, получаемые в результате специальных испытаний элементов или по наблюдениям за ними в процессе эксплуатации. Методы испытаний на надежность, сбора и обработки информации в процессе эксплуатации, рекомендуемые в инженерной практике, приведены в соответствующих государственных стандартах [16].

Математическое выражение на интервале  $\{-\infty < t < \infty\}$  функции  $F(t)$  называется теоретическим законом распределения [3] в отличие от эмпирического закона распределения, который выражается в виде статистического ряда или графика накопленных частот отказов деталей, полученных из соотношения

$$F(t)^3 = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N},$$

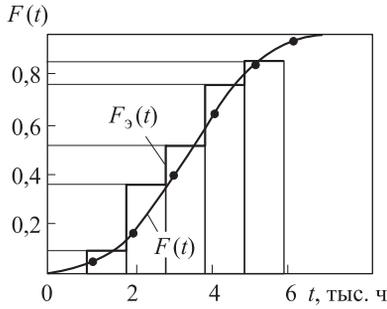
где  $k$  — число интервалов;  $i = 1..k$  — номер интервала наработки;  $m_i$  — число отказавших деталей в интервале  $i$ . Хорошего соответствия между теоретической и эмпирической функциями распределения достигают при наличии полной выборки, проводимой в процессе подконтрольной эксплуатации элементов в реальных условиях. Напомним, что полной выборкой принято называть массив наблюдений, которые получены за период наработки до отказа всех элементов, входящих в контрольную группу.

Пусть в процессе подконтрольной эксплуатации наблюдалось  $N = 30$  объектов. Последние объекты наработали до отказа  $t = 7$  тыс. ч, что составило полный период наблюдений. Данные о числе отказавших блоков в последовательные интервалы наработки через 1 тыс. ч, соответствующие им частоты и накопленные частоты отказов приведены в табл. 1. На рис. 2 показаны теоретическая функция распределения  $F(t)$ , соответствующая графику накопленных частот, и плотность распределения  $f(t) = dF(t)/dt$ , соответствующая полигону распределения частот [3, 9].

Таблица 1

**Пример обработки результатов наблюдений за блоком**

Показатель	Наработка до отказа $t_i$ , тыс. ч						
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7
Число отказавших элементов $m_i$	2	6	8	5	3	4	2
Частота отказов $\omega_i = m_i / N$	0,07	0,20	0,26	0,17	0,10	0,13	0,07
Накопленная частот отказов $\sum \omega_i$	0,07	0,27	0,56	0,70	0,80	0,93	1,00



**Рис. 2.** Эмпирическая  $F_э(t)$  и теоретическая  $F(t)$  функции распределения наработки изделия до отказа

Функция распределения изменяется в пределах  $0 \leq F(t) \leq 1$ , и на графике видно, что она равна вероятности отказа элемента за время наработки  $t$ .

К сожалению, на практике редко удается провести полный цикл наблюдений и получить полную выборку. Для этого требуется много времени и представительная группа подконтрольной аппаратуры. Чаще используют результаты периодических наблюдений и отчетные документы по эксплуатации аппаратуры. Массив данных получается неоднородным и, как правило, мало представительным, т. е. число данных недостаточно для определения достоверной зависимости  $F(t)$ . Если отсутствует возможность пополнить исходные данные, то применяют разные приближенные методы определения формы и параметров функции  $F(t)$ . При этом используют данные не только о наработках отказавших элементов, но и не отказавших, а также сведения, полученные в процессе плановых ремонтов: элемент в состоянии, близком к предельному, и подлежит замене (отказ); элемент в удовлетворительном состоянии и может проработать до следующего планового ремонта (отсутствие отказа). Далее представлен алгоритм расчета и пример вычислений одним из приближенных методов.

**I.** Весь период наблюдений делят на последовательные интервалы наработки изделия с порядковыми номерами  $i = 1, 2, \dots, k$ , где  $k$  — число интервалов наработки за период наблюдений. Рекомендуется принимать  $k \geq 6$ . Для каждого интервала  $i$  по результатам наблюдений определяют число отказавших изделий  $n_{oi}$  и число изделий, сохранивших работоспособность  $n_{pi}$ .

Пусть, например, при исследовании долговечности интегральных микросхем (ИМС) из актов технических осмотров и ремонтных ведомостей получены данные (табл. 2).

## Результаты наблюдений долговечности ИМС

Исходные данные	Состояние электронной ИМС	Интервал наработки $t$ , ч					
		700–1700	1700–2700	2700–3700	3700–4700	4700–5700	5700–6700
Технические осмотры	Близкое к предельному	2	4	2	2	0	0
	Хорошее	4	3	3	2	0	0
Плановые ремонты	Проведена замена	1	4	3	1	2	1
	Замена не проводилась	3	4	0	2	0	0
Аварийные замены	—	1	2	1	1	0	0

Значения  $n_{oi}$  и  $n_{pi}$  из табл. 2 вносят в табл. 3: состояние, близкое к предельному, и все случаи замены ИМС рассматриваются как отказ, хорошее состояние — как работоспособное. Впоследствии в табл. 3 вносят также промежуточные и итоговые результаты расчетов [9, 21–26].

Отметим, что в приведенной методике восстановления эмпирической функции распределения наработки до отказа момент обнаружения изделия в работоспособном состоянии рассматривается как момент приостановки наблюдений. Эта предпосылка и является основой расчетных формул. Такой подход можно считать наиболее приемлемым в условиях эксплуатации устройств, когда обеспечить индивидуальные наблюдения за работой каждого элемента одного наименования практически невозможно.

**II.** В каждом интервале последовательно, начиная с первого, рассчитывают значения функции распределения  $F_{opi}$  смеси, образованной наработками до отказа, и приостановки наблюдений [17–19]:

$$F_{opi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i (n_{oi} + n_{pj}), \quad (4)$$

где  $N = \sum_{i=1}^k (n_{oi} + n_{pi})$  — общее число наблюдений.

Применительно к приведенному примеру  $N = 48$ . Таким образом,  $F_{op1} = \frac{4+7}{48} = 0,229$ ;  $F_{op2} = \frac{(4+7)+(10+7)}{48} = 0,583$  и т. д. Результаты расчетов для каждого интервала записывают в табл. 3.

**III.** Статистическую оценку прогнозируемой опасности отказа проводят по формуле

$$\bar{\lambda}_i = \frac{n_{oi}}{N - \sum_{j=1}^i (n_{oj} + n_{pj})}. \quad (5)$$

В примере

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{4}{48 - (4 + 7)} = 0,108; \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{10}{48 - (4 + 7) - (10 + 7)} = 0,50.$$

Таблица 3

**Результаты наблюдений**

Показатель	Интервал наработки $t$ , ч					
	700–1700	1700–2700	2700–3700	3700–4700	4700–5700	5700–6700
$i$	1	2	3	4	5	6
$n_{opi}$	4	10	6	4	2	1
$n_{opi}$	7	7	3	4	0	0
$F_{opi}$	0,229	0,538	0,771	0,938	0,979	1
$\bar{\lambda}_i$	0,108	0,500	0,545	1,333	2,000	—
$F'_{oi}$	0,083	0,347	0,605	0,706	1,000	—
$F''_{oi}$	0,097	0,398	0,610	0,833	0,944	—
$F'_{pi}$	0,146	0,323	0,484	0,651	0,949	—
$F''_{pi}$	0,159	0,377	0,510	0,790	0,949	—
$\Delta F_{oi}$	0,180	0,745	1,215	1,539	1,944	—
$\Delta F_{pi}$	0,305	0,700	0,994	1,441	1,898	—
$F'_{oi}$	0,090	0,367	0,522	0,774	0,866	—
$F_{pi}$	0,153	0,341	0,521	0,726	0,843	—

*Замечание 1.* Если, начиная с какого-нибудь интервала, наблюдается устойчивое уменьшение значения  $\bar{\lambda}$ , т. е.  $\bar{\lambda}_i > \bar{\lambda}_{i+1} > \bar{\lambda}_{i+2}$ , расчеты следует прекратить (опасность отказа не может снижаться по мере увеличения наработки). Эмпирическую функцию распределения восстанавливают только по данным, рассчитанным до приостановки. Если окажется невозможным найти теоретическую функцию распределения, необходимо дополнить число наблюдений [9].

**IV.** Рассчитывают нижнюю  $F'_{oi}$  и верхнюю  $F''_{oi}$  оценки безусловной функции распределения наработки до отказа:

$$F'_{oi} = F'_{o(i-2)} + (1 - F'_{o(i-1)}) \frac{n_{oi} + n_{o(i-1)}}{N - \sum_{j=1}^{i-1} (n_{oj} + n_{pj})}, \quad (6)$$

$$F''_{oi} = \left[ 1 + F''_{o(i-1)} \frac{N - \sum_{j=1}^{i-1} (n_{oj} + n_{pj})}{n_{oi}} \right] \frac{n_{oj}}{N - \sum_{j=1}^{i-1} n_{oj} - \sum_{j=1}^i n_{pj}}. \quad (7)$$

*Замечание 2.* Следует иметь в виду, что  $F'_{o(-1)} = F'_{o(0)} = F''_{o(0)} = 0$ .

*Замечание 3.* Если в каком-нибудь интервале наработки  $n_{oi}$ , то принимают  $F''_{oi} = F'_{oi}$ .

Для данного примера:

$$F'_{o1} = 0 + (1 - 0) \frac{4 + 0}{48 - 0} = 0,083;$$

$$F'_{o2} = 0 + (1 - 0,083) \frac{10 + 4}{48 - (4 + 7)} = 0,037;$$

$$F'_{o3} = 0,083 + (1 - 0,347) \frac{6 + 10}{48 - [(4 + 7) + (10 + 7)]} = 0,605 \text{ и т. д.};$$

$$F''_{o1} = (1 + 0) \frac{4}{48 - 0 - 7} = 0,097;$$

$$F''_{o2} = \left\{ 1 + 0,097 \frac{48 - [(4 + 7) + (10 + 7)]}{10} \right\} \frac{10}{48 - 4 - (7 + 7)} = 0,398;$$

$$F''_{o3} = \left\{ 1 + 0,398 \frac{48 - [(4 + 7) + (10 + 7) + (6 + 3)]}{6} \right\} \frac{6}{48 - (4 + 10) - (7 + 7 + 3)} = 0,61$$

и т.д.

**V.** Нижнюю  $F'_{pi}$  и верхнюю  $F''_{pi}$  оценки функции распределения наработки [17–19, 23] выполняют до приостановки наблюдений (моментов наработки, в которые изделия остаются в работоспособном состоянии):

$$F'_{pi} = F'_{p(i-2)} + (1 - F'_{p(i-1)}) \frac{n_{pi} + n_{p(i-1)}}{N - \sum_{j=1}^{i-1} (n_{oj} + n_{pj})}, \quad (8)$$

$$F''_{pi} = \left[ 1 + F''_{p(i-1)} \frac{N - \sum_{j=1}^i (n_{oj} + n_{pj})}{n_{pi}} \right] \frac{n_{pi}}{N - \sum_{j=1}^{i-1} n_{pj} - \sum_{j=1}^i n_{oj}}. \quad (9)$$

При расчетах по формулам (8) и (9) следует иметь в виду замечания 2 и 3. Например,

$$F'_{p1} = 0 + (1-0) \frac{7+0}{48-0} = 0,146;$$

$$F'_{p2} = 0 + (1-0,146) \frac{7+7}{48-(4+7)} = 0,323;$$

$$F'_{p3} = 0,146 + (1-0,323) \frac{3+7}{48-[(4+7)+(10+7)]} = 0,484;$$

$$F''_{p1} = [1+0] \frac{7}{48-0-4} = 0,159;$$

$$F''_{p2} = \left[ 1 + 0,159 \frac{48-[(4+7)+10+7]}{7} \right] \frac{7}{48-7-(4+10)} = 0,377.$$

**VI.** Прогнозируют значения функции распределения наработки до отказа с помощью выражения:

$$F_{oi} = 1 + 0,25(\Delta F_{oi} - \Delta F_{pi}) - \sqrt{1 + [0,25(\Delta F_{oi} - \Delta F_{pi})]^2} - \Delta F_{opi}, \quad (10)$$

где  $\Delta F_{oi} = F'_{oi} - F''_{oi}$ ;  $\Delta F_{pi} = F'_{pi} - F''_{pi}$ .

В примере:

$$\Delta F_{o1} = 0,083 + 0,097 = 0,18; \quad \Delta F_{p1} = 0,146 + 0,159 = 0,305;$$

$$F_{o1} = 1 + 0,25(0,18 - 0,305) - \sqrt{1 + [0,25(0,18 - 0,305)]^2} - 0,229 = 0,09.$$

Результаты расчетов для остальных интервалов наработки приведены в табл. 3.

**VII.** Рассчитывают значения функции распределения наработки до приостановки наблюдений:

$$F_{pi} = 1 - \frac{1 - F_{opi}}{1 - F_{oi}}. \quad (11)$$

В примере

$$F_{p1} = 1 - \frac{1 - 0,229}{1 - 0,09} = 0,153 \text{ и т. д.}$$

**VIII.** Определяют статистическое значение средней наработки до отказа:

$$T_0 = \sum_{i=0}^{k+1} (F_{oi} - F_{o(i-1)}) t_{oi}, \quad (12)$$

где  $t_{oi}$  — наработка, соответствующая центру интервала  $i$  в рабочей табл. 3.

В формуле (12) предусмотрены интервалы наработки с номерами  $i=0$  и  $i=k+1$ . Дело в том, что нередко начало наблюдений не совпадает с началом эксплуатации блока. Например, в табл. 2 содержатся сведения об изделиях только после наработки 700 ч. Последнее расчетное значение  $F_{oi}$  может существенно отличаться от 1. В частности, в примере расчета  $F_{o5} = 0,866$ . В этом случае приходится интерполировать значения  $F_o$  на начальном этапе наработки и после завершения периода наблюдений. Применительно к нашему примеру (см. рис. 2) можно полагать, что в интервале наработки 0...700 ч значение  $F_{o0} \approx 0,03$ ; в интервале 5700...6700 ч —  $F_{o6} \approx 0,96$ ; в интервале 6700...7700 ч —  $F_{o7} \approx 0,99$ .

Таким образом, для данных примера по формуле (12) получим:

$$\begin{aligned} T_0 = & (0,03 - 0)350 + (0,09 - 0,03)1000 + (0,367 - 0,09)2000 + \\ & + (0,521 - 0,367)3000 + (0,774 - 0,521)4000 + (0,866 - 0,774)5000 + \\ & + (0,96 - 0,774)5000 + (0,96 - 0,866)6000 + (0,99 - 0,96)7000 = 3332,5. \end{aligned}$$

**IX.** Последовательные значения  $F_{oi}$  составляют эмпирическую функцию распределения наработки блока до отказа. На основании этих значений, представленных в численной или графической форме, определяют теоретическую функцию распределения наработки. Например, используя стандартную вероятностную бумагу для функции Вейбулла в форме

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (13)$$

можно установить, что значения  $F_{oi}$  в табл. 3 хорошо согласуются с функцией (13) при  $a = 3950$  и  $b = 2,7$ .

Математическое ожидание значений случайной величины [3] для этой функции распределения

$$M[t] = \Gamma \left( 1 \frac{1}{b} \right) \left/ \left( \frac{1}{a^b} \right)^{\frac{1}{b}} \right., \quad (14)$$

где  $\Gamma$  — символ гамма-функции [3].

Следовательно, средняя наработка РЭА до отказа

$$T_0 = \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,7}\right) / \left(\frac{1}{3950^{2,7}}\right)^{1/2,7} = 3536 \text{ ч.}$$

Это значение  $T_0$  мало отличается от среднего статистического  $T_0$  (разница около 6 %), что свидетельствует о хорошей стабильности эмпирического закона распределения. Дополнительные проверки гипотезы распределения дают основания полагать, что распределение наработки элементов до отказа подчиняется закону Вейбулла:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{3950}\right)^{2,7}\right]. \quad (15)$$

Функция (15) может служить для прогнозирования всех остальных показателей надежности рассматриваемого блока. Ее графическое изображение приведено на рис. 2.

**Заключение.** Приведены расчетные соотношения при различных видах резервирования аппаратуры в ускоренных испытаниях, продления сроков эксплуатации блоков РЭА. Методология оценки остаточного ресурса (срока службы, срока сохраняемости) является основой надежности блоков РЭА. Разработаны методики оценки ресурса технических объектов, среди которых важное место занимают методики, основанные на физических предпосылках расходования ресурса. Проведен синтез и анализ физических методов исследования ресурса для класса приборов, который, как правило, лимитирует ресурс РЭА. Необходимо отметить, что значения показателей ресурса, рассчитанные путем физических предпосылок, во много раз превышают соответствующие значения, полученные путем обработки статистических данных. Это объясняется многими причинами, в первую очередь тем, что физические методы, как правило, игнорируют случайную природу отказов, и поэтому показатель ресурса, полученный физическим способом, характеризует максимальное его значение без учета реальных режимов применения и эксплуатации, а точнее, в идеальных условиях эксплуатации технических объектов. Поэтому применение способов оценки ресурса чисто физическими методами ограничено. Однако использование физических представлений о ресурсных свойствах с использованием теоретико-вероятностных методов оценки является наиболее перспективным направлением исследований.

Необходимо также отметить важность экономического аспекта, который, собственно, и предопределяет постановку задачи при исследова-

нии проблемы продления сроков эксплуатации технических объектов. Предлагаемые в статье методы оценки рассмотрены только для изделий электронной техники в составе РЭА, которые могут стать отправной точкой для разработки частных методик оценки экономической эффективности продления сроков эксплуатации конкретных типов и видов технических объектов. Некоторые из приведенных в статье характеристик долговечности материалов и скорости процессов могут непосредственно служить показателями надежности или входить в общепринятые показатели надежности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца».*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. *Математические методы в теории надежности*. Москва, Наука, 1965, 524 с.
- [2] Судаков Р.С. *Испытания технических систем*. Москва, Машиностроение, 1988, 272 с.
- [3] Сидняев Н.И. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Москва, Юрайт, 2011, 310 с.
- [4] Маджарова Т.Б. Надежность больших интегральных схем. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1978, № 1, с. 143–147.
- [5] Павлов И.В. *Статистические методы оценки надежности сложных систем*. Москва, Радиосвязь, 1982, 168 с.
- [6] Стекольников Ю.И. *Живучесть систем*. Санкт-Петербург, Политехника, 2002, 155 с.
- [7] Горлов М.И. Современное состояние проблемы надежности кремниевых биполярных ИС. *Обзоры по электронной технике. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*. Москва, 1984, вып. 1 (1019), 63 с.
- [8] Гудкин О.П. (ред.). *Управление качеством электронных средств*. Москва, Высш. шк., 1994, 414 с.
- [9] Сидняев Н.И. *Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных*. Москва, Юрайт, 2011, 399 с.
- [10] Сидняев Н.И. Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2003, № 4, с. 24–31.
- [11] Смирнов Н.И., Широков В.Б. *Оценка безотказности интегральных микросхем*. Москва, 1983, 102 с.
- [12] Sidnyaev N.I., Andreytseva K.S. Independence of the Residual Quadratic Sums in the Dispersion Equation with Noncentral  $\chi^2$ -Distribution. *Applied Mathematics*, 2011, vol. 02, no. 10 (October), pp. 1303–1308. DOI: 10.4236/am.2011.210181. URL: <http://www.scirp.org/journal/am>.
- [13] Кейджян Г.А. *Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС*. Москва, 1987, 152 с.
- [14] Барлоу Р., Прошан Ф. *Математическая теория надежности*. Москва, Сов. радио, 1969, 488 с.
- [15] Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.Е., Каштанов В.А., Коваленко И.Н., Соловьев А.Д., Ушаков И.А. *Вопросы математической теории надежности*. Гнеденко Б.В., ред. Москва, Радио и связь, 1983, 376 с.
- [16] ГОСТ 27.503–81 (СТ СЭВ 2863–81). *Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности*. Москва, Изд-во стандартов, 1982, 29 с.

- [17] Садыхов Г.С. Показатель остаточного ресурса и его свойства. *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*, 1985, № 4, с. 98–102.
- [18] Садыхов Г.С. Гамма-процентные показатели эксплуатационной надежности и их свойства. *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*, 1983, № 6, с. 185–187.
- [19] Садыхов Г.С., Савченко В.П. Средняя доля остаточного ресурса и ее непараметрические оценки. *Вопросы теории безопасности и устойчивости систем*. Вычислительный центр РАН, 1999, вып. 1, с. 65–72.
- [20] Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Кн. 1. Изд. 2-е. Москва, Сов. радио, 1974, 220 с.
- [21] Карташов Г.Д. Модели расходования ресурса изделий электронной техники. *Обзоры по электронной технике. Сер. 8. Управление качеством и стандартизация*, вып. 1 (473). Москва, ЦНИИ «Электроника», 1977, 120 с.
- [22] Самсонов В.С. Определение экономической эффективности продления сроков эксплуатации ИЭТ. *Электронная техника. Сер. 9. Экономика и системы управления*, 1984, вып. 3(152), с. 18, 19.
- [23] Садыхов Г.С. *Показатель остаточной долговечности и их оценки в задачах продления сроков эксплуатации технических объектов*. Москва, Знание, 1986, 52 с.
- [24] Сидняев Н.И. Теория фазовых переходов и статистические явления механики наноструктурированных веществ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, спец. вып. «Наноинженерия», с. 9–22.
- [25] Малафеев С.И., Копейкин А.Н. *Надежность технических систем. Примеры и задачи*. Санкт-Петербург, Лань, 2012, 320 с.
- [26] Геликман Б.Ю., Горячева Г.А., Кристалинский Л.Л., Стальбовский В.В. *Вопросы качества радиодеталей*. Москва, Сов. радио, 1980, 328 с.

Статья поступила в редакцию 05.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Клочкова Д.В., Сидняев Н.И. Основные факторы эксплуатационной надежности мощных передающих установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1148.html>

**Клочкова Дарья Владимировна** родилась в 1986 г., окончила МАИ в 2009 г. Аспирантка заочного отделения кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор 1-й категории ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца». Автор 5 научных публикаций в области прикладной механики и радиотехники. e-mail: dKlochkova@rti-mints.ru

**Сидняев Николай Иванович** родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1985 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 220 научных работ в области прикладной математики и механики. e-mail: sidnyaev@yandex.ru