

УДК 621.396.6.019.3:621.79

# ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДИФфуЗИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

**Н. Н. Иванов,**  
канд. техн. наук  
ООО «Авангард», г. Санкт-Петербург

*Даются рекомендации по применению вместо однопараметрического экспоненциального распределения двухпараметрического диффузионного немонотонного распределения при описании надежности паяных соединений радиоэлектронных приборов.*

**Ключевые слова** — паяное соединение, вероятностная модель, радиоэлектронный прибор, надежность, диффузионное немонотонное распределение.

## Введение

При исследовании надежности элементов конструкции радиоэлектронных приборов, в том числе паяных соединений выводов компонентов с контактными площадками коммутационных плат, наиболее распространенным является так называемый метод «физики отказов», который заключается в установлении аналитических зависимостей между показателями надежности и скоростью протекания физико-химических процессов на основании кинетических уравнений. В качестве таких зависимостей обычно используют линейное уравнение, степенное, Аррениуса, диффузии и др., при этом полагают, что полученные детерминированные зависимости описывают усредненные явления и включают усредненные величины. Это позволяет перейти в дальнейшем к установлению зависимостей некоторых основных показателей надежности (математического ожидания времени до отказа или интенсивности отказов) как функций физических свойств или физических параметров изделий и условий их эксплуатации.

## Рассмотрение вариантов теоретических моделей надежности

Развитие физической (причинной) теории надежности, т. е. раскрытие механизмов отказов и их влияние на надежность изделий, имеет существенное значение и дает возможность эффек-

тивно совершенствовать технологию производства изделий и повышать их надежность. Однако чисто физический подход не позволяет непосредственно определять абсолютные значения вероятностных показателей надежности, в частности, находить закон распределения времени до отказа. Получаемые при таком подходе модели имеют частный характер — они или моделируют какой-либо преобладающий процесс деградации компонента, или выявляют многочисленные коэффициенты для конкретного режима эксплуатации. Распространение результатов таких моделей даже на аналогичный объект, но в другом режиме эксплуатации, может иметь только качественный характер.

Анализируя работы [1–4] по надежности радиоэлектронных приборов и систем, можно сделать вывод, что основная масса работ по проблеме надежности посвящена постановке и решению широкого круга оптимизационных задач, а также задачам, связанным с проблемой интервального оценивания показателей надежности по результатам испытаний или эксплуатации. Известно, что при решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности — функции распределения наработки до отказа, которые, в конечном итоге, определяют точность получаемых оценок. При этом методические погрешности, обусловленные выбором теоретической модели, могут иметь существенные значения и сводить практически на нет результаты оптимизационных задач.

Набор используемых на практике теоретических моделей надежности достаточно узок. Наиболее распространенным является однопараметрическое экспоненциальное распределение

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  — вероятность безотказной работы;  $\lambda$  — интенсивности отказов;  $t$  — время наработки.

Из двухпараметрических моделей чаще используется распределение Вейбулла

$$P(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — параметр формы (определяет форму распределения);  $\eta$  — параметр масштаба (определяет ресурсную характеристику распределения).

Из двухпараметрических моделей иногда применяются нормальное и логарифмически нормальное распределения, гамма- и альфа-распределения.

Исторически сложилось, что для решения задач надежности электронных изделий и систем стало общепринятым применение экспоненциального распределения, а для механических объектов — указанных двухпараметрических моделей. На протяжении многих лет расчеты надежности выполняются, как правило, с помощью однопараметрического экспоненциального распределения, поскольку использование вышеупомянутых более адекватных двухпараметрических моделей для получения точных решений встречает трудности математического характера.

Изложенный подход упрощает решение задач надежности, однако приводит к неадекватности результатов, так как накладывает на модель ряд существенных ограничений и делает ее весьма грубо приближенной. Например, экспоненциальное распределение абсолютно не учитывает старение и износ, т. е. не принимает во внимание возможность и необходимость выбора более качественных материалов при производстве радиоэлектронных изделий или при проведении профилактики в процессе эксплуатации. Экспоненциальное распределение имеет максимальную частоту отказов в начальный момент эксплуатации или испытания, т. е. на участке приработки, что может наблюдаться только при очень низком качестве изготовления. Другими словами, чем ниже уровень технологии и чем хуже выполнено изделие, тем более подходящей оказывается модель экспоненциального распределения для описания его надежности.

Особенно ярко недостатки однопараметрической экспоненциальной модели проявляются при решении такой задачи надежности, как дальний прогноз. Так, прогноз среднего ресурса высоконадежных изделий электронной техники или

прогноз гамма-процентного ресурса для очень малых уровней вероятности отказа отличается от прогноза более адекватных двухпараметрических моделей в 50–100 и более раз [5].

В последние годы все большее распространение получают вероятностно-физические модели надежности, которые могут успешно заменить существующий аппарат исследования и прогнозирования надежности, особенно для вновь разрабатываемых компонентов радиоэлектронных средств, в нашем случае — паяных соединений, причем таких, которые не имели отказов в процессе ускоренных испытаний.

Среди вероятностно-физических моделей, предлагаемых для оценки надежности технических объектов [6–8], представляет интерес диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение).

Априорная оценка параметра формы DN-распределения (коэффициента вариации процесса деградации объекта) требует знания физических процессов, приводящих к отказу объекта, и условий нагружения, поскольку значение коэффициента вариации зависит от указанных условий. В работе [9] приведена таблица значений коэффициентов вариации для различных технических средств. Для объектов, не включенных в приведенную таблицу, априори определяют коэффициент вариации наработки на основании анализа процессов деградации, приводящих к отказам. При этом учитываются соотношения долевых вкладов процессов деградации и значения коэффициентов вариации основных типовых процессов деградации, приведенные в табл. 1.

Принимая во внимание объем и число рассмотренных данных (многих десятков выборок), на основании которых определены вышеуказанные диапазоны коэффициентов вариации, утверждается [9], что доверительная вероятность интервалов существенно выше 0,9.

■ Таблица 1. Значения коэффициентов вариации основных процессов деградации

Вид разрушения (процесс деградации)	Коэффициент вариации процесса разрушения
Статическое разрушение	0,05–0,15
Усталость:	
малоцикловая	0,15–0,40
многоцикловая	0,40–1,00
контактная	0,40–1,20
Износ:	
механо-химический	0,20–0,50
абразивный	0,40–1,00
старение	0,40–1,00
Электрические процессы (электролиз, миграция зарядов, электродиффузия)	0,70–1,50

Следует также отметить, что коэффициент вариации — это обобщенная характеристика процессов деградации объектов, он в меньшей степени зависит от конструктивных особенностей (размеров, типа конструкции и др.).

Принятие численного значения коэффициента вариации из указанных диапазонов табл. 1 в каждом конкретном случае диктуется соображениями общего характера: увеличение отношения нагрузки к пределу выносливости (прочности) относительно среднего статистического приводит к уменьшению коэффициента вариации и наоборот, уменьшение отношения нагрузки к пределу выносливости приводит к увеличению коэффициента вариации.

Значение коэффициента вариации наработки на отказ (между отказами) объекта остается тем же самым, если не меняется структура объекта (системы), поскольку коэффициент вариации наработки определяется элементами, обуславливающими деградацию и отказ этих элементов.

При значениях коэффициента вариации  $v$  от 0,3 до 1,3 максимальное отклонение составляет 4 %. В практике измерения случайных величин это достаточно высокая точность.

Основные аналитические выражения DN-распределения для ряда характеристик приведены в табл. 2, причем в выражении DN-распределения присутствует нормированная функция Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В результате выражение DN-распределения будет выглядеть следующим образом:

$$DN(t; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right).$$

■ Таблица 2. Основные аналитические выражения DN-распределения

Характеристика, обозначение	DN-распределение
Математическое ожидание	$\mu$
Дисперсия	$\mu^2 v^2$
Коэффициент вариации	$v$
Вероятность безотказной работы $P(t)$	$\Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Интенсивность отказов $\lambda(t)$	$(vt\sqrt{2\pi t})^{-1} \sqrt{\mu} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]$ $\Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$

Необходимо отметить существенное свойство, которым обладает DN-распределение, — устойчивость к операции свертки (например, отказ одного электронного модуля произошел при времени  $t_1$ , а другой отказ другого электронного модуля произошел при времени  $t_2$ , обе величины подчиняются DN-распределению, и сумма величин также подчиняется DN-распределению). Это означает, что DN-распределение может быть использовано для описания отказов при нелинейном изменении значения параметра. При этом неоднородный процесс делится на однородные участки, и в результате свертки суммарное время наработки будет иметь линейный вид.

В странах СНГ в 1997 г. принят ГОСТ 27.005–97 [6], предлагающий для изделий, имеющих различные виды отказов, двухпараметрические модели с распределениями диффузионного типа. Однако в Российской Федерации разработчики радиоэлектронной аппаратуры при расчете показателей надежности своих изделий, в том числе при определении вклада паяных соединений в общие показатели надежности аппаратуры, по-прежнему в качестве рекомендуемых используют однопараметрические модели.

В настоящее время в связи с резким усложнением радиоэлектронной аппаратуры, применением большого числа поверхностно монтируемых многовыводных компонентов новых конструкций, введением в практику ряда новых видов паяных соединений назрел вопрос о выборе адекватной модели отказов, учитываемой при расчетах в реальной практике. Ситуация усложнена еще и тем, что многие виды аппаратуры морально устаревают раньше физического износа и выводятся из эксплуатации без набора достаточных статистических данных о конкретных отказах элементов.

Функция распределения, используемая в качестве модели отказов, должна позволять выполнять расчет надежности систем на основе известных показателей надежности ее составных частей и обеспечивать применение единого математического аппарата, отвечающего требованиям инженерной практики для решения необходимых задач надежности на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации. В то же время модель отказов должна обладать физичностью, т. е. отражать связь с физическими явлениями, приводящими к отказу.

### Основной результат рассмотрения вопроса

Упомянутые выше строго вероятностные модели (однопараметрические и двухпараметрические) не связаны с физическими явлениями, приводящими к формированию распределения отказов, т. е. эти модели не имеют физического обоснования.

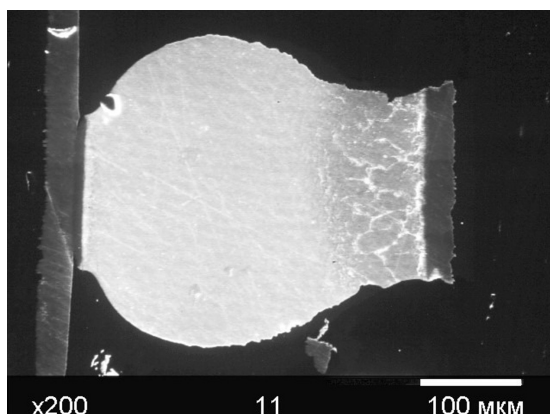
Вероятностно-физические модели, такие как диффузионное монотонное и диффузионное немонотонное распределения, специально построенные для описания отказов объектов на основе анализа физических процессов деградации, приводящих к отказам, являются, в отличие от строго вероятностных моделей, физически обоснованными моделями. Такие модели учитывают физическую природу отказов и позволяют использовать характеристики физических явлений, имеющих место в объекте, для оценки надежности.

Вероятностно-физические модели соответствуют широкому классу процессов деградации (усталости, изнашиванию, коррозии, старению и др.). Внешние факторы, определяющие надежность и связанные с конструкцией изделий, свойствами используемых материалов, технологией изготовления, уровнем производства и эксплуатации, в конечном итоге влияют на среднюю скорость процессов деградации и рассеяние реализаций, не меняя схемы формализации и типа распределения. Тип же распределения в рассматриваемой модели определяется характером физического процесса деградации, в частности, монотонным или немонотонным видом его реализаций.

Рассматривая паяные соединения выводов компонентов радиоэлектронных приборов с контактными площадками коммутационных плат в качестве объекта исследования надежности, следует учесть ряд факторов.

Паяные соединения представляют собой сложную конструкцию, состоящую из нескольких слоев разнородных материалов, каждый из которых имеет свои физические и химические свойства, привнесенные в момент изготовления. Паяным соединениям присущи дефекты реализации и создающиеся при эксплуатации механические напряжения.

На фотографии показано сечение паяного соединения шарикового вывода компонента типа



■ Сечение паяного соединения шарикового вывода компонента типа BGA

BGA с контактной площадкой печатной платы. Слева находится медная контактная площадка полимерного корпуса BGA, в средней части — шариковый вывод из бессвинцового припоя, в правой части — медная контактная площадка печатной платы. Возле контактной площадки платы виден слой оловянно-свинцового припоя, частично расплавившего шариковый вывод. В припое наблюдаются кристаллиты основной фазы и прослойки промежуточной фазы. На границе припой-медь имеются слои интерметаллидов олово-медь и олово-золото. В зависимости от режимов пайки и условий последующей эксплуатации распределение фаз в припое и, соответственно, надежность соединения будут различаться [10].

При рассмотрении физики отказов паяных соединений особый интерес представляет такой объект, как припой. Припой обладает уникальными свойствами, зависящими от температуры, времени и приложенного механического напряжения. Например, эвтектический припой олово-свинец обладает свойством текучести и релаксации напряжений при температуре выше 20 °С, тогда как ниже минус 20 °С он ведет себя как прочие металлы и выдерживает длительные нагрузки без деформации. Чем больше температура превышает 20 °С и (или) чем больше уровень нагрузок, тем быстрее проявится свойство текучести и релаксации припоя. Несмотря на то, что могут иметь место механизмы отказа, связанные с циклической или монотонной перегрузками, главную угрозу надежности представляет усталостное повреждение типа напряжение-релаксация.

Свой вклад в процесс нарастания вероятности отказа представленного монтажного соединения вносят также процессы потери адгезии контактных площадок к полимерной основе корпуса и платы, вероятное газовыделение из полимера и возможных микропустот (особенно при закипании захваченной из атмосферы воды при повышенных температурах эксплуатации).

Процессы, происходящие в паяном соединении при эксплуатации, развиваются не монотонно, одни процессы взаимосвязаны, другие развиваются самостоятельно.

Для рассматриваемого вопроса следует отметить, что, согласно работе [11], для паяных соединений поверхностно монтируемых компонентов не найдено никаких свидетельств наличия периода случайных отказов. Вполне вероятно, что все время эксплуатации интенсивность отказов описывается участками приработочных и износных отказов. Следует отметить, что для таких паяных соединений вероятность отказов на приработочном участке крайне мала, даже с учетом разброса экспериментальных значений, достигающего одного порядка величины.



Вероятность накопленных отказов компонента и его паяных соединений равна сумме вероятностей отказа компонента и соединений. Следовательно, для электронной сборки отказы за небольшой срок службы будут обусловлены, скорее, отказами компонентов, а за долгий срок — отказами паяных соединений.

Учитывая изложенное, для описания поведения паяного соединения в наилучшей степени подходит модель на основе диффузионного немонотонного распределения.

Математические модели процессов деградации в виде непрерывных марковских процессов (DN-распределение) представляются, несомненно, более адекватными для случайных процессов деградации и разрушений паяных соединений. Кроме того, диффузионные распределения имеют достаточно простые выражения для разнообразных оценок своих параметров, а также для всех основных показателей надежности. В частности, диффузионные распределения гораздо проще и удобнее при использовании по сравнению с такими двухпараметрическими моделями, как Вейбулла, гамма-распределение, альфа-распределение и др.

Диффузионные распределения, как вероятностно-физические модели надежности, имеют большое преимущество перед строго вероятностными моделями в том, что их параметры могут быть оценены как на основе статистики отказов (в этом случае они рассматриваются как строго вероятностные модели), так и на основании анализа статистических характеристик физического процесса, приводящего к отказу, а также при совместном использовании статистической информации обоих типов.

Решение основных задач надежности сводится, в конечном итоге, к оценке параметров распределения искомой величины (наработки до отказа, на отказ, ресурс и т. д.). Важнейшим фактором, способствующим решению разнообразных задач надежности с использованием диффузионных распределений, является то, что параметр формы этих распределений — коэффициент вариации — представляет собой обобщенную характеристику изучаемых процессов (процесса разрушения и распределения наработки). Коэффициент вариации как обобщенная характеристика с достаточной для инженерной практики

точностью может быть оценен априори на основании многолетних исследований как процессов разрушений (прочности, усталости, изнашивания и др.), так и статистических данных об отказах при испытаниях и эксплуатации изделий-аналогов. Именно благодаря конкретной физической интерпретации параметров диффузионных распределений удалось на их основе решить такие существенные задачи надежности, как расчет надежности систем, планирование контрольных и определительных испытаний на надежность, расчет объема запасных частей, долговечности электронной аппаратуры и др.

Подобный подход к выбору диффузионного немонотонного распределения в качестве модели отказов паяных соединений начал применяться в открытом акционерном обществе «Авангард» (Санкт-Петербург) при решении вопросов создания и применения базовой технологии автоматизированного монтажа компонентов различных радиоэлектронных приборов и систем, в том числе с использованием компонентов, рассчитанных под бессвинцовую пайку [12].

Значительный эффект дает использование диффузионных распределений в задачах планирования контрольных испытаний на надежность. Планы контроля надежности на основе диффузионных распределений являются существенно экономичнее. Для того чтобы с требуемой достоверностью и точностью сделать заключение о соответствии надежности испытываемых изделий контролируемому уровню, необходим в 1,5–2,0 раза меньший объем испытаний. Это означает, что внедрение планов контроля надежности на основе предлагаемого аппарата снизит затраты на испытания до 30 % и более.

## Заключение

Таким образом, имеются все основания для внедрения математического аппарата более адекватных двухпараметрических моделей надежности в практику исследования надежности как элементов, так и систем. Высокая универсальность двухпараметрических диффузионных распределений позволяет решить необходимую задачу унификации методов определения надежности элементной базы и технических систем.

## Литература

1. Каргашов Г. Д., Куликов В. В. Об оптимальном режиме предварительных исследований // Надежность и контроль качества. 1984. № 4. С. 38–44.
2. Манулик С. А. Использование моделей отказов при оценке результатов ускоренных испытаний интегральных схем // Надежность и контроль качества. 1987. № 1. С. 24–30.

3. Куликов И. В. Экспериментальное определение энергии активации процесса старения изделий по результатам их форсированных испытаний // Электронная техника. Сер. 8. 1983. Вып. 6(105). С. 62–67.
4. Аронов И. З., Бурдасов Е. И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. — М.: Стандарты, 1987. — 184 с.
5. Стрельников В. П., Антипенко К. А. О методических погрешностях прогнозирования ресурса высоконадежных изделий электронной техники // Математические машины и системы. 2004. № 3. С. 164–167.
6. ГОСТ 27.005–97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. — Киев: Изд-во стандартов, 1999. — 43 с.
7. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования. — Киев: Изд-во стандартов, 1995. — 39 с.
8. ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — Киев: Изд-во стандартов, 1995. — 122 с.
9. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. — Киев: Логос, 2002. — 486 с.
10. Иванов Н. Н. О применении элементов бессвинцовых технологий при создании РЭА для жестких условий эксплуатации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2010. Вып. 2. С. 141–146.
11. IPC-SM-785. Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа. <http://pcblayout.ru/pcb/download/ipc-sm-785.pdf> (дата обращения: 01.04.2012).
12. Иванов Н. Н., Ивин В. Д. ЭКБ импортного производства в бессвинцовом исполнении в аппаратуре ответственного применения // Петербургский журнал электроники. № 3–4 (68–69). 2011. С. 155–164.

### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*