

Физическая надежность технических средств электроники

Множество и миниатюрность электронных компонентов, составляющих печатный узел (ПУ), в сочетании с экстремальными условиями эксплуатации ставят в зависимость от их надежности безотказность и эффективность работы электронных систем в целом. Возникает необходимость в интенсификации исследований и создании критериев и методов оценки качества и прогнозирования надежности ПУ. В серии статей анализируется ответная реакция ПУ на воздействия экстремальных условий эксплуатации, свойственных системам специального применения, то есть влияние конструкции, материалов и качества производства на надежность их функционирования.

**Аркадий Медведев,
д. т. н.**

В ходе применения электронных устройств может существовать множество внешних воздействий. Температурные напряжения возникают в результате колебаний температуры окружающей среды или нагрева из-за рассеивания мощности компонентами, установленными на печатной плате (ПП). Бывают температурные напряжения технологического происхождения на этапах монтажа или ремонта ПУ. Механические напряжения появляются в результате вибрационных воздействий и механических ударов. Климатические источники внешних воздействий включают повышенную атмосферную влажность, коррозионную атмосферу, формирующуюся в процессе производства или за счет сгорания топлива, и остаточные химически активные загрязняющие вещества, сохранившиеся на ПУ в ходе изготовления (например, остатки травильных растворов или флюса). Все эти реакции могут проявляться разрозненно или во взаимодействии. Дополнительно разность электрических потенциалов, естественно присутствующая между цепями ПУ во время функционирования, способна вызвать повреждение электрической изоляции и проводников печатного узла. В статье рассмотрен подход к оценке надежности системы межсоединений, исполненных на печатной плате и ПУ (рис. 1). Анализ надежности электронных компонентов выходит за рамки этих публикаций.

Надежность характеризует способность изделия отвечать заданным требованиям в процессе эксплуатации. В известном смысле проблема надежности фактически представляет собой проблему качества.

Однако результаты, полученные в процессе приемодаточных испытаний, могут находиться в пределах, установленных требованиями технических условий, то есть соответствовать нормам качества в момент проведения контроля и испытаний. Тем не менее изделие может иметь скрытые дефекты, приводящие к преждевременным отказам аппаратуры. Поэтому эксплуатационные показатели надежности печатного монтажа могут отличаться от характеристик, получаемых при испытаниях на соответствие требованиям технических условий. Следовательно, проблема современных исследований состоит в создании методов и средств оценки качества изделий, позволяющих распознавать и выделять те из них, которые не соответствуют определенным критериям надежности.

Задачи теории и практики надежности могут решаться двумя методами. Первый основан на изучении статистических закономерностей поведения объекта как совокупности его составляющих, по отношению к которым поведение его отдельных элементов является случайным. При этом с точки зрения оценки надежности все разнообразие состояний объекта сводится к двум состояниям: исправному и неисправному. Оба они описываются функциями надежности, получаемыми статистическими методами.

Второй метод основан на физико-химическом подходе к исследованиям надежности технических объектов, заключающемся в выявлении слабых звеньев (неоднородностей структуры) и изучении процессов их деградации в функции «неоднородность — нагрузка». Эти свойства и процессы описываются зависимостями, отражающими физико-химические закономерности появления отказов.

К настоящему времени наиболее полно разработаны вероятностно-статистические методы оценки надежности. Основным показателем надежности согласно этим методам принята интенсивность отказов, так называемая λ -характеристика, которая определяется на основании статистических данных. Разработаны и стандартизованы методы расчета надежности, базирующиеся на представлении анализи-

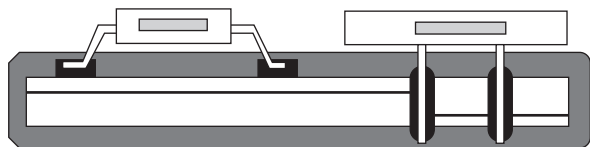


Рис. 1. Схематическое обозначение элементов межсоединений, надежность которых рассматривается в статье (затемненная часть на рисунке)

руемых устройств как совокупности большого числа независимых элементов с постоянными в процессе эксплуатации λ -характеристиками. В технические условия на элементы обязательно вводятся требования по статистическим показателям надежности и соответствующим им методам и объемам испытаний. Наряду с безотказностью к категориям надежности стали причислять долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

В практической оценке надежности по результатам испытаний пользуются распределением вероятности отказов, обусловленным распределением Вейбулла или логарифмически нормальным распределением. Распределения Вейбулла успешно используются для описания распределений усталости паяных соединений и сквозных металлизированных отверстий, в то время как логарифмически нормальные распределения связаны с механизмами электрохимических отказов. Если известны константы, определяющие распределение отказов, можно легко рассчитать время достижения конкретного количества отказов. Например, для типов отказов, описанных распределением Вейбулла, время t для достижения $x\%$ отказов рассчитывается посредством:

$$t(x\%) = t(50\%) [\ln(1 - 0,01x / \ln(0,5))]^{1/\beta},$$

где β — параметр формулы Вейбулла.

Однако по мере роста надежности элементов процессы определения показателей надежности посредством соответствующих испытаний становятся неэффективными. Так, элементная база на основе интегральных микросхем (ИС) характеризуется интенсивностью отказов $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$. Исходя из принципа равнопрочности элементов электронных устройств и полагая, что надежность электронных компонентов постоянно улучшается, интенсивность отказов конструкций элементов межсоединений прогнозируется следующим образом (таблица).

За приемлемый интервал времени подтвердить испытаниями показатели надежности чрезвычайно сложно и убыточно, это процесс, требующий вовлечения в эксперимент огромного количества образцов ПП и ПУ. Так, для подтверждения с 95%-ной доверительной вероятностью интенсивности отказов 10^{-7} ч^{-1} нужно протестировать 1000 образцов в течение 10 лет. Для уменьшения времени испытаний до 1000 ч (1,5 месяца) необходимо увеличить объем выборки до 9×10^4 шт. плат, что явно неразумно.

Таблица. Распределение интенсивности отказов элементов ПУ

Элементы	Имеется	Прогнозируется
Пайки	10^{-11}	10^{-13}
Контакты соединителей	10^{-10}	10^{-12}
Концевые печатные контакты	10^{-10}	10^{-11}
Двусторонние ПП	10^{-9}	10^{-10}
Многослойные ПП	$10^{-8} \times 10^{-10}$	—
В том числе:		
элементы изоляции	10^{-11}	10^{-13}
элементы соединений	4×10^{-11}	10^{-13}

Кроме того, прямые испытания ПП и ПУ на надежность неэффективны и по другим причинам. Во-первых, следует отметить, что результаты длительных испытаний быстро устаревают, так как с объектов наладки и эксплуатации поступает более оперативная информация об отказах ПУ. Во-вторых, информация об отказах имеет большую достоверность, поскольку характеризует поведение гораздо большего числа ПУ, чем в выборке для испытаний. В-третьих, эта информация характеризует надежность ПП в конкретных условиях эксплуатации, в то время как в процессе дорогостоящих и длительных испытаний на надежность стараются имитировать экстремальные условия всевозможных воздействий на ПУ. В-четвертых, надежность испытываемых образцов печатного монтажа оказывается выше надежности измерительной и испытательной аппаратуры, что зачастую приводит к потере достоверности результатов испытаний. В-пятых, большое число элементов соединений и изоляции в выборке печатного монтажа для испытаний на надежность делает невозможным дифференцированный подход к каждому тестируемому элементу. В свою очередь, при статистическом подходе учитывается только конечный результат наблюдений, но не динамика и характер изменений, приводящих к отказу элементов изоляции и соединений ПУ.

Недостатки определения количественных (статистических) показателей надежности на основе длительных испытаний обуславливают необходимость в формировании физико-химического подхода к оценке показателей надежности ПУ, позволяющего производить его более оперативно еще на стадии разработки конструктивно-технологических решений. Это направление связано с исследованиями причин и процессов, вызывающих отказы элементов печатного монтажа, — выясняются механизмы типичных отказов, на основе которых разрабатываются модели отказов, учитывающие влияние не только времени работы, но и конструктивно-технологических факторов, состояние производства, а также внешние воздействия. Результаты исследований предоставляют возможность создавать методы инженерных расчетов, помогающих еще на стадии проектирования оптимизировать конструкции ПУ по критериям надежности, обоснованно формулировать требования к материально-технической базе производства печатных узлов, прогнозировать показатели надежности на определенный срок, разрабатывать методы ускоренных испытаний на надежность.

Физико-химические процессы, приводящие к отказам ПП, очень сложны, их природа изучена недостаточно. Как правило, число параметров, которые необходимо учитывать при исследовании закономерностей постепенных и внезапных отказов, очень велико. Эффективность же способов обеспечения заданной надежности ПУ при проектировании, изготовлении и эксплуатации определяется уровнем знаний всего комплекса факторов, влияющих на надежность.

Отказы могут возникать на разных стадиях жизненного цикла аппаратуры: ранней, эксплуатационной и конечной. Принадлежность отказа к той или иной стадии жизненного цикла определяет природу отказа, задачи и методы его исследования.

Причиной отказов на начальном этапе являются производственные и технологические дефекты. Следовательно, задачи по их предупреждению состоят в отбраковке недоброкачественных ПУ. Сравнение данных по отказам с данными по допущенным отклонениям от требований нормативно-технической документации показывает поразительно близкое совпадение между ними. В связи с этим возникает необходимость в использовании оценки допустимости отдельных дефектов ПУ. Систематизация накопленного опыта позволяет охарактеризовать большую часть типичных дефектов или предложить методы испытаний, результаты которых позволяют принять конкретные решения.

Эксплуатационные отказы являются событиями, случайными по моменту и месту возникновения, но имеют вполне определенные причины, которые или заложены в самих платах вследствие разброса неконтролируемых параметров технологического процесса и материалов, или вызваны экстремальным сочетанием воздействий внешней среды и условий эксплуатации. Эксплуатационный отказ должен рассматриваться как аварийная ситуация. Вот почему задачи данного этапа сводятся к выяснению достоверной причины отказа и реализации организационно-технических мероприятий по их предотвращению или предупреждению. При этом особое значение приобретают повышение информативности и достоверности методов контроля качества исходных компонентов и полуфабрикатов на промежуточных этапах и в процессе производства, развитие методов научных исследований свойств материалов.

Любой отказ на конечной стадии, то есть отказ, ограничивающий срок службы, — событие закономерное, вызванное естественными процессами износа и старения материалов ПУ, связанными с условиями эксплуатации, использованными материалами и технологией изготовления ПУ и ПП. Следовательно, задача третьего этапа — выявить процесс развития отказа, что позволит найти способы увеличения ресурса, ускоренные методы оценки надежности, повысить объективность критериев качества ПУ, узлов и блоков электронной аппаратуры.

Уровень надежности ПУ может быть связан и с организационно-техническими стадиями разработки, производства и эксплуатации аппаратуры (рис. 2). Отказы периода разработки обусловлены значительным снижением надежности вследствие грубых ошибок при конструировании и в технологии. Эти ошибки постепенно выявляются и устраняются.

Опыт экспериментального выпуска ПУ для первых образцов электронной аппаратуры позволяет выработать надежные рекомендации для подготовки серийного производства. Однако, поскольку условия серийного изго-

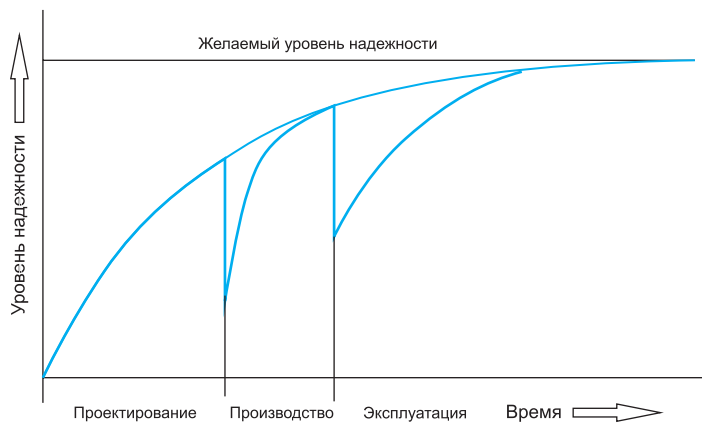


Рис. 2. Изменение уровня надежности печатных плат на стадиях разработки, производства и эксплуатации аппаратуры

товления существенно отличаются от экспериментального, начало производства неизбежно связано с потерей надежности. Причинами этого могут стать неточное соблюдение конструкторской и технологической документации, неполная приспособленность разработки к условиям серийного производства и, главное, недостаточное внимание к контролю качества. В этих условиях ни теоретическая обоснованность конструкторского замысла, ни высокий уровень конструкторских и технологических разработок не спасут положения, если организация серийного производства изделия не обеспечит его надежной работы. По мере накопления опыта, проведения корректировочных действий, повышения эффективности контроля технологических процессов надежность изделия приближается к уровню, потенциально присущему данной конструкции.

Строго говоря, в процессе производства нельзя полностью избежать снижения надежности по сравнению с желаемым уровнем, его можно лишь свести к минимуму. Однако потенциальную надежность изделия удастся повысить, используя информацию, полученную в процессе производства. Это позволяет повысить как теоретически достижимый предел надежности изделия, так и фактическую его надежность.

Разрыв между потенциальной и фактической надежностью в начале производства оказывается весьма значительным. Анализ ин-

формации об отказах в период эксплуатации первых серийных образцов электроники показывает, что значительная часть общего числа отказов обусловлена в основном процессом изготовления. Доля таких отказов печатного монтажа может достигать до 20%.

Снижение надежности изделий в первый период эксплуатации объясняется тем, что для операторов и специалистов техобслуживания они являются новыми, неосвоенными. Вместе с тем по первому опыту эксплуатации, как правило, выявляется необходимость в доработке изделия, цель которой — облегчить контроль и техобслуживание. Это перекомпоновка изделия для упрощения ремонта и замены узлов с относительно высокой интенсивностью отказов, облегчение доступа к узлам и блокам, улучшение условий ремонта и восстановления работоспособности узлов; конструктивные усовершенствования самодиагностики; выделение неремонтируемых модулей и блоков, изымаемых при отказе.

Таким образом, существенным фактором обеспечения надежности печатного монтажа является правильно организованный контроль его качественного состояния. Рациональное построение систем выявления причин и предвестников отказов, оптимальное применение полученной информации об отказах для управления качеством ПУ при производстве и их состоянием в процессе эксплуатации позволяют вскрывать и использовать имеющиеся резервы повышения надежности изделий электроники.

Испытания на надежность

Почти каждая программа испытаний на надежность должна относительно быстро решать сложную проблему прогнозирования долговременной отказоустойчивости изделий. И хотя изделия электроники могут эксплуатироваться 10–15 лет, невозможно тратить годы на определение количественных показателей надежности электронной системы. В зависимости от механизма отказа существует два метода, которые могут комбинироваться: во-первых, увеличение количества образцов или воздействий на систему, чтобы опреде-

лить способность объекта перенести предполагаемое количество воздействий; во-вторых, увеличение жесткости воздействия для того, чтобы сократить количество таких воздействий. Испытания падением, имитирующие ударную нагрузку, или множественное термоциклирование являются примером первого метода. Воздействие температуры и влажности на коррозию в течение срока эксплуатации изделия может оцениваться только посредством увеличения температуры, влажности или концентрации загрязняющих веществ, или комбинации этих факторов. Сложность состоит в обеспечении того, чтобы испытание воспроизводило и/или соответствовало механизму отказов в процессе эксплуатации. Кроме того, жесткие условия испытания могут не совпадать с реальными типами отказов, возникающих в условиях эксплуатации.

Для того чтобы использовать эти данные для достоверного определения надежности, то есть вероятности отказов в некоторый момент при конкретных условиях, испытание должно продолжаться до получения достаточного количества отказов и формирования более-менее достоверной оценки распределения Вейбулла, с чьей помощью можно прогнозировать срок службы изделия электроники. К сожалению, нет возможности сделать данный процесс продолжительным, поэтому его часто вынужденно подменяют испытаниями на соответствие требованиям технических условий. Такие испытания определяют максимальное число отказов, которые могут быть обнаружены в течение определенного периода времени в партии образцов установленного объема. Но испытания на соответствие техническим условиям не предоставляют почти никакой информации о распределении отказов. Гораздо объективнее использовать информацию об отказах по результатам многолетнего опыта применения данного типа изделий при известных условиях эксплуатации. Однако при введении новых технологий и конструкций эта информация не всегда бывает адекватной.

Заключение

1. Уровень надежности современных средств электроники настолько высок, что получить статистические характеристики интенсивности отказов за приемлемое время невозможно. Поэтому статистические методы исследований надежности подменяются физическими.
2. Физические методы исследования надежности используют модели деградации элементов соединений и изоляции.
3. По мере движения технических средств электроники от проекта к производству, а затем и к эксплуатации, их надежность растет за счет выявления и устранения слабых элементов конструкций, совершенствования технологий и ограничения влияния воздействующих факторов. И это единственный естественный процесс обеспечения необходимого уровня надежности, если подходить к нему серьезно и ответственно.