

Достижение высокой надёжности электронных систем требует использования специальных компонентов, методов, технологий и программных средств проектирования, соответствующих конечным условиям эксплуатации оборудования.

Постоянно увеличивающаяся сложность компонентов электронного оборудования и потребность в портативных маломощных устройствах, способных работать в жёстких условиях эксплуатации, — вот основные причины, заставляющие разработчиков создавать новые высоконадёжные устройства. Ключом к достижению повышенной надёжности даже в чрезвычайно жёстких условиях эксплуатации является использование такого оборудования и программного обеспечения, в основе которых лежит специальная, защищённая от ошибок философия проектирования. Всесторонний обзор различных типов отказов и профилактических методов проектирования, позволяющих их избежать, поможет разработчикам значительно повысить надёжность оборудования.

Несмотря на то, что контролю качества изделий электроники в настоящее время уделяется большое внимание, отказы отдельных компонентов или целых систем продолжают. К сожалению, истинную причину отказа выяснить удаётся далеко не всегда. Выход из строя компонента подразумевает, что он не функционирует должным образом или его параметры больше не соответствуют изначальным техническим требованиям. Это может произойти по целому ряду причин, в том числе из-за перегрузок по току или напряжению, чрезмерного нагревания, воздействия агрессивных химических веществ или повышенной влажности, а также некоторых других условий, встречающихся в процессе производства и использования оборудования.

Известно, что некоторые отказы приводят к распознаваемым изменениям в компоненте. В этом случае отказ может быть очевиден, проявившись, например, в резком ухудшении параметров или прекращении правильного функционирования устройства. При этом можно применять адаптивные статистические методы параметрического контроля для отбраковки ненадежных элементов, а также, в частности, для определения допусков на контролируемые параметры исследуемого микроселектронного изделия или компонента. Данное применение обусловлено следующим: определяемую решающим правилом область допустимого изменения контролируемых параметров в пространстве их значений можно интерпретировать как допусковую. В результате этого при появлении новых микроселектронных изделий или компонентов можно использовать адаптивные методы при определении допусков на критичные параметры при проведении контроля. Рассмотрим порядок определения таких допусков на конкретном примере.

Надёжность изделий микроселектронной техники (МЭТ) в основном определяется надёжностью составляющих ее компонентов. Наиболее информативным электрическим параметром, по которому можно контролировать качество и надёжность микроселектронного изделия, является ток потребления [1]. Ток потребления всего микроселектронного изделия складывается из токов потребления составляющих его компонентов. При хранении или эксплуатации изделий МЭТ под воздействием деградиационных процессов, протекающих в полупроводниковых структурах компонентов, в некоторых из них происходят необратимые изменения, приводящие к недопустимому увеличению тока потребления как этих компонентов, так и всего микроселектронного изделия в целом. Заданный в технических условиях верхний порог тока потребления в ряде случаев настолько большой, что не позволяет при входном контроле выявить в поступающей партии потенциально ненадежные компоненты МЭТ. Поэтому необходимо знать пороговый ток потребления, чтобы отделить в партии потенциально ненадежные компоненты от надежных.

Для решения этой задачи в [2], например, предложен метод отбраковки потенциально ненадежных микроселектронных компонентов в однородной партии по току потребления I при условии, что его распределение в партии является одномодальным и островершинным. При этом потенциально ненадежными признаются те компоненты, для которых ток потребления больше порогового $a + \sigma$, где a - выборочное среднее, σ - оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая как $\sigma = \sqrt{D}$, где D - выборочная дисперсия. В [3] показано, что распределение значений тока потребления I является одномодальным и асимметричным с модой, смещенной в область малых значений, что проиллюстрирует приведенная в [3] гистограмма. Чем устойчивей технологический процесс, тем острее вершина этого распределения и быстрее с ростом I спадает его хвост. Однако если указанный технологический процесс не достаточно стабилен, то это приводит к повышенному, по сравнению с обычным, числу ненадежных компонентов в партии, для которых ток потребления I больше, чем у надежных, и к появлению в распределении I второй моды в области больших его значений. В этом случае применение для отбраковки потенциально ненадежных микроселектронных компонентов по току потребления, предложенного в [2] метода, становится необоснованным, потому что порог $a + \sigma$ при появлении второй моды Y распределения значений I , увеличиваясь, смещается вправо по оси I , в то время как в силу увеличения в партии процента потенциально ненадежных компонентов его следует уменьшить, т.е. сместить по оси I влево. Следует также отметить, что указанный в [2] метод отбраковки при мелкосерийном производстве МЭТ нельзя применять даже при одномодальном островершинном распределении значений тока потребления в партии, так как однородные партии микроселектронных компонентов в этом случае невелики, что не позволяет построить гистограмму этого распределения с достаточной точностью и приводит, в силу большой погрешности при вычислении порога $a + \sigma$, к резкому увеличению вероятностей ошибок отбраковки.

В этом случае для решений задачи выявления потенциально ненадежных микроселектронных компонентов целесообразно использовать адаптивные статистические процедуры параметрического контроля их качества. Рассмотрим их применение для решения задачи контроля надёжности компонентов МЭТ на примере выявления потенциально ненадежных полупроводниковых диодов.

Одной из основных составляющих тока потребления диодов является обратный ток, который по техническим условиям для исследуемого типоминнала не должен превышать, к примеру, 10 мкА.

Учитывая, что у потенциально ненадежных диодов обратный ток в среднем выше чем у надежных, необходимо определить пороговое значение обратного тока, позволяющее отделить потенциально ненадежные диоды от надежных. Распределение значений обратного тока полупроводниковых диодов является двумодальным. Его можно аппроксимировать двумя нормальными распределениями $N_1(a_1, \sigma_1^2)$ и $N_0(a_0, \sigma_0^2)$, которые характеризуют соответственно классы надежных и потенциально ненадежных диодов

и построены по результатам испытаний установочной партии. При этом $a_1 < a_0$ и $\sigma_1 < \sigma_0$, так как значения обратного тока I и их разброс у потенциально ненадежных диодов выше, чем у надежных. Таким образом, задача выявления потенциально ненадежных диодов сводится к распознаванию нормальных совокупностей N_0 и N_1 , которая заключается в проверке неравенства [4]

$$\frac{1}{\sigma_0^2}(I - a_0)^2 - \frac{1}{\sigma_1^2}(I - a_1)^2 + \ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} < 0, \quad (1)$$

где I - обратный ток контролируемого диода. При выполнении неравенства (1) контролируемый диод относят к надежным, а при невыполнении - к потенциально ненадежным.

Решением неравенства (1) будет отрезок между корнями квадратного трехчлена из левой части, меньший из которых оказывается отрицательным. Поэтому надежными следует считать те диоды, для которых выполняется неравенство

$$I < I_0, \quad (2)$$

Где

$$I_0 = \left[a_0 - ra_0 + \sqrt{r(a_0 - a_1)^2 - a_0^2(1-r) \ln r} \right] / (1-r) \quad (3)$$

- больший корень квадратного трехчлена из (1); $r = \sigma_1^2 - \sigma_0^2$.

Величины a_j и σ_j^2 - априори неизвестны, поэтому в (3) следует подставить оценки их максимального правдоподобия, вычисляемые по классифицированным обучающим выборкам. Последние состоят из измеренных значений обратного тока диодов, входящих в установочные партии надежных и потенциально ненадежных диодов. Указанные установочные партии и соответствующие им классифицированные обучающие выборки формируются при обучении следующим образом. У диодов установочной партии измеряют обратный ток в нормальных условиях. Затем эти диоды подвергают ускоренным испытаниям при температуре 150°C и напряжении 15 В. Затем у каждого диода измеряют величину обратного тока через сутки, а затем еще через двое суток. Такие ускоренные испытания не приводят к выходу диодов из строя, но позволяют выделить в установочной партии потенциально ненадежные диоды, у которых обратный ток после ускоренных испытаний оказался больше, чем до них, т.к. воздействие температуры и напряжения сразу вызвали резкое увеличение обратного тока, а также потому, что нарастал обратный ток в течение ускоренных испытаний.

Эти тенденции указывают на наличие скрытых дефектов в полупроводниковых структурах диодов, которые ускоряют деградационные процессы и определяют потенциальную ненадежность таких диодов.

Указанные ускоренные испытания позволяют получить установочные партии для обоих классов диодов. Соответствующие им результаты измерений тока I_0 составляют классифицированные обучающие выборки для надежных и потенциально ненадежных диодов. Поэтому в (3) вместо a_0 следует подставить их оценки максимального правдоподобия, вычисленные по классифицированным обучающим выборкам объемами m_0 и m_1 значений I , для диодов соответствующих классов. Вероятность ошибки первого рода α при использовании правила (2), т.е. вероятность пропуска потенциально ненадежного диода, можно вычислить по формуле

$$\alpha = \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \Theta(u)}{u\rho(u)} du \right\} p_1(\omega_1) p_2(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \quad (4)$$

$$\Theta(u) = -\frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^2 \arctg(\lambda_j u) + \frac{b_j \lambda_j u}{1 + \lambda_j^2 u^2} \right];$$

$$\rho(u) = \prod_{j=1}^2 \left[(1 + \lambda_j^2 u^2)^{1/4} \exp \left(\frac{\lambda_j^2 b_j u^2}{1 + \lambda_j^2 u^2} \right) \right];$$

где $p_j(\omega_j)$ - плотность распределения $\chi^2_{cm_j-1}$

$$\lambda_j = k_j S_j; k_j = (-1)^2 (\alpha_1 - \lambda_0 \gamma_{3-j}) / (\gamma_2 - \gamma_1); \alpha_1 = (m_0 - 1) / \omega_1;$$

$$\lambda_0 = \alpha_1 + \alpha_2; \gamma_j = 0.5 \left[Z + \lambda_0 + (-1)^{j+1} \sqrt{(Z + \lambda_0)^2 + 4Z\alpha_1} \right] / Z;$$

$$Z = (\alpha_1 / m_0 + \alpha_2 / m_1); \alpha_2 = (1 - m_1) / r \omega_2;$$

$$S_j = 1 + \beta_j^2 r / m_1 + \gamma_j^2 / m_0; \beta_j = 1 - \gamma_j;$$

$$b_j = c_j / S_j; c_j = \beta_j^2 d;$$

$$d = (a_0 - a_1)^2 / \sigma_0^2; j = 1, 2.$$

степенями свободы. Формулы для вычисления вероятности ошибки второго рода β , т. е. отбраковки надежного диода, получаются из (4) переменными местами m_0 и m_1 , σ_0 и σ_1 .

Для проведения предварительного обучения была выбрана установочная партия, состоящая из 80 диодов, среди которых оказалось 52 надежных и 28 потенциально ненадежных. Указанные диоды составили предварительные установочные партии, а значения их обратных токов - обучающие выборки для классов потенциально ненадежных и надежных диодов объемами, соответственно, $m_0=28$ и $m_1=52$.

Анализ результатов предварительного обучения (предварительных оценок средних значений и дисперсий распределений значений тока I для различных классов диодов) позволяет ввести ограничения снизу: $d \geq 0.5$ и $r^{-1} \geq 2$.

Поскольку на практике частота появления потенциально ненадежных диодов невысока, вероятность ошибок контроля надежности полупроводниковых диодов первого и второго рода α и β достаточно

ограничить значением $0,2$. Тогда указанные ограничения d и r^{-1} , α и β обеспечат обучающие выборки объемами $m_0 = m_1 = 25$. Таким образом, оказывается, что полученных предварительно обучающих выборок достаточно, чтобы обеспечить выбранное ограничение на вероятности ошибок контроля. Оценки неизвестных средних значений и дисперсий распределений обратного тока I для потенциально ненадежных и надежных полупроводниковых диодов при этом составили $a_0 = 3,33$ и $a_1 = 0,85$, $\sigma_0^2 = 4,5$ и $\sigma_1^2 = 0,92$. Априори неизвестные значения реально составили $d = 1,37$ и $r^{-1} = 4,89$, вычисленное по (2) с использованием полученных в результате обучения оценок a_j , и σ_j^2 пороговое значение обратного тока $I \approx 3$ мкА.

Рассматриваемый вариант системы для контроля надежности полупроводниковых диодов по обратному току имеет один контролируемый параметр I и единственную контрольную выборку и поэтому не допускает оптимизации. Реальные вероятности ошибок контроля надежности полупроводниковых диодов первого и второго рода α и β , полученные экспериментально по результатам опытной разработки партии диодов, составили соответственно $0,1$ и $0,15$, а процент потенциально ненадежных диодов в партии снизился в семь раз.

Для получения классифицированных обучающих выборок при использовании адаптивных статистических методов параметрического контроля микроэлектронных изделий и компонентов можно использовать не только натурный эксперимент, но и численное моделирование на ЭВМ. Последнее позволяет на этапе проектирования определять допуски для отбора компонентов с целью достижения заданных качества и характеристик микроэлектронных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верхаген К. / Распознавание образов: Состояние и перспективы. - М. : Радио и связь, 1985.
2. Малков Я.В. и др. / Анализ параметров и диагностический контроль ИС серии 564. Электроника и счетно-решающая техника в лесной и деревообрабатывающей промышленности. / Науч. тр. МЛТИ. - 1981. - вып. 136, - с. 55-59.
3. Петров С.П. / Электроника и счетно-решающая техника в лесной и деревообрабатывающей промышленности. / Науч. тр. МЛТИ. - 1981. - вып. 158 - с. 37-42.
4. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. - М.: Радио и связь, 1986.
5. Карсон Р. Высококачественные усилители: Пер. с англ. / Под ред. В.Р. Магнусевского. - М.: Радио и связь, 1981.
6. Фомин А. В., Вобченко Ю.И., Сорокопуд В.А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. - М.: Радио и связь, 1981.