DOI: 10.58168/MIST2026_1348-1355
УДК 004

ВНЕЗАПНЫЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОТКАЗЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТАХ: МЕХАНИЗМЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

Е.И. Скворцова[1], А.С. Ягодкин[1], В.К. Зольников[1]

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье рассматриваются два основных типа отказов микроэлектронных компонентов и информационных систем – внезапные и параметрические. Даётся классификация отказов по характеру изменения параметров, степени влияния на функциональность, связи с другими отказами и времени возникновения. Подробно описаны физические механизмы внезапных отказов (электромиграция, пробой диэлектрика, коррозия, механические повреждения и др.) и постепенные (параметрические) механизмы деградации.

Ключевые слова: внезапные отказы, параметрические отказы, надёжность, деградация параметров, функциональное тестирование, отказоустойчивость.

SUDDEN AND PARAMETRIC FAILURES IN MICROELECTRONIC COMPONENTS: MECHANISMS, CLASSIFICATION AND METHODS OF RELIABILITY ASSURANCE

E.I. Skvortsova [1], A.S. Yagodkin [1], V.K. Zolnikov [1]

[1]Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The article discusses two main types of failures of microelectronic components and information systems - sudden and parametric. A classification of failures is given according to the nature of parameter changes, the degree of impact on functionality, the relationship with other failures and the time of occurrence. The physical mechanisms of sudden failures (electromigration, dielectric breakdown, corrosion, mechanical damage, etc.) and gradual (parametric) degradation mechanisms are described in detail.

Keywords: sudden failures, parametric failures, reliability, degradation of parameters, functional testing, fault tolerance.

© Скворцова Е. И., Ягодкин А. С., Зольников В. К., 2026

Надежность информационных систем является критической характеристикой для всех областей применения электронной аппаратуры, от потребительской электроники до военных и космических приложений. Информационные системы, построенные на основе микроэлектронных компонентов, подвергаются различным типам отказов, которые приводят к нарушению их функциональности. Понимание природы, механизмов и моделей отказов имеет первостепенное значение для разработки надежных систем, выбора соответствующих компонентов и организации надлежащей системы контроля и диагностики. Классификация отказов по различным признакам позволяет разработчикам информационных систем применять адекватные методы предотвращения, обнаружения и устранения отказов. Данная статья посвящена детальному рассмотрению двух основных типов отказов в информационных системах: внезапных и параметрических отказов, их характеристик, механизмов возникновения и практического значения для обеспечения надежности электронных систем.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 и международными стандартами надежности, отказы классифицируются по различным признакам. По характеру изменения определяющих параметров выделяют две основные категории отказов: внезапные и постепенные. По степени влияния на функциональность различают полные отказы, при которых система полностью теряет способность выполнять свои функции, и частичные отказы, при которых система продолжает выполнять некоторые функции, но с ухудшенными характеристиками.

По связи с другими отказами выделяют независимые отказы, возникающие независимо от состояния других элементов системы, и зависимые отказы, вызванные отказом других элементов. По возможности устранения различают необратимые отказы, требующие замены или ремонта элемента, и обратимые отказы, устраняющиеся путем перезагрузки или сброса системы. По времени возникновения относят отказы к периодам приработки, полезной работы, износа и старения, что соответствует трем фазам кривой «ванна».

Внезапный отказ определяется как отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров микроэлектронного компонента или информационной системы. Для внезапных отказов характерно то, что они возникают без видимых предварительных признаков приближения, и момент их наступления является случайным событием, не зависящим или слабо зависящим от времени предыдущей работы объекта. Классическими примерами внезапных отказов являются разрыв проводника вследствие электромиграции, пробой диэлектрика, появление короткого замыкания между

разделенными ранее контактами, механическое разрушение кристалла полупроводника при воздействии механического удара.

Внезапные отказы часто называют функциональными отказами, поскольку они приводят к немедленной потере функциональности системы. При возникновении внезапного отказа характеристики компонента мгновенно выходят за пределы допустимого диапазона, и система переходит в нерабочее состояние. Интенсивность внезапных отказов хорошо описывается моделью экспоненциального распределения в период полезной работы, когда интенсивность отказов λ остается приблизительно постоянной. Однако в период ранних отказов (приработки) интенсивность внезапных отказов может быть высокой и убывающей, а в период износа – возрастающей.

Внезапные отказы в микроэлектронных компонентах и информационных системах вызываются различными физическими и химическими механизмами. Наиболее распространенные механизмы внезапных отказов включают электромиграцию, разрыв межсоединений, коррозию контактов, термический пробой, механические повреждения, загрязнение и электрический пробой диэлектрических слоев.

Электромиграция является одним из наиболее важных механизмов внезапных отказов в микроэлектронных компонентах. Электромиграция представляет собой явление переноса вещества в проводнике за счет дрейфа ионов под влиянием электрического поля и столкновений электронов с атомами решетки. При прохождении тока высокой плотности через тонкие металлические проводники электроны сталкиваются с атомами решетки и передают им импульс. При достаточно высокой температуре и плотности тока атомы металла начинают мигрировать в направлении движения электронов. Это приводит к образованию пустот в одних областях проводника и скоплению вещества в других. По мере накопления пустот сопротивление проводника возрастает, что еще больше повышает локальную температуру и усиливает электромиграцию.

Тепловой пробой может произойти при достижении температурой кристалла критического значения, при котором происходит необратимое повреждение структуры полупроводника. Может развиться явление термического разбегания, при котором возрастание температуры приводит к возрастанию тока, что в свою очередь еще больше повышает температуру. Тепловой пробой часто приводит к плавлению металлизации или даже взрыву компонента.

Параметрический отказ определяется как отказ, при котором один или несколько основных параметров (характеристик) компонента или системы постепенно выходят за пределы допустимого диапазона, что приводит к нарушению функциональности. В отличие от внезапных отказов, параметрические отказы развиваются постепенно и могут быть обнаружены и спрогнозированы путем мониторинга изменения параметров компонента или системы.

Параметрические отказы часто называют деградационными отказами, поскольку они вызваны процессами деградации материалов и структур компонентов. Параметрические отказы вызываются процессами деградации, которые приводят к постепенному изменению параметров компонентов. Основные механизмы параметрических отказов включают смещение порога напряжения, увеличение утечки через изоляцию, увеличение сопротивления межсоединений, снижение усиления транзистора и деградацию других электрических параметров.

Смещение порога напряжения является одним из наиболее распространенных механизмов параметрических отказов в полевых транзисторах. Смещение может быть вызвано несколькими механизмами, включая инъекцию горячих носителей заряда, отрицательное смещение по температуре, захват и отпуск зарядов на ловушках в диэлектрике. При инъекции горячих носителей высокоэнергетические электроны или дырки могут быть инъецированы в затворный диэлектрик, создавая ловушки интерфейсных состояний и фиксированные заряды. Это приводит к смещению порога напряжения и снижению крутизны передаточной характеристики транзистора.

Пробой диэлектрика, зависящий от времени, представляет собой процесс, при котором в тонком диэлектрическом слое (обычно SiO_2) образуется проводящий канал при приложении высокого электрического поля. Изначально происходит накопление ловушек в объеме диэлектрика и на его границах раздела. По мере накопления ловушек проводимость диэлектрика возрастает, и в конечном итоге образуется проводящий путь через всю толщину диэлектрика.

Увеличение утечки через диэлектрик может быть параметрическим отказом, при котором ток утечки возрастает в результате деградации качества диэлектрика, роста дефектов в диэлектрике или электрической стимуляции, вызывающей появление новых ловушек. Увеличение тока утечки приводит к увеличению статического потребления мощности и может привести к функциональному отказу при превышении определенного порога тока.

Основные различия между внезапными и параметрическими отказами проявляются в нескольких аспектах.

Во-первых, характер изменения параметров: внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением, в то время как параметрические отказы проявляются постепенным, монотонным или колебательным изменением параметров.

Во-вторых, предсказуемость: внезапные отказы происходят непредсказуемо и случайно, в то время как параметрические отказы могут быть спрогнозированы на основе анализа тренда изменения параметров.

В-третьих, возможность обнаружения: внезапные отказы обнаруживаются функциональными тестами, в то время как параметрические отказы требуют параметрических тестов и мониторинга характеристик.

Различаются также методы диагностики и прогнозирования отказов. Для внезапных отказов используются функциональные тесты, которые проверяют, выполняет ли система требуемые функции. Для параметрических отказов используются параметрические тесты, которые измеряют значения определяющих параметров и сравнивают их с допустимыми пределами. При организации системы диагностики параметрические отказы имеют важное преимущество: они позволяют предсказать отказ до его наступления и выполнить профилактическое обслуживание или замену компонента.

Статистическое распределение отказов в информационных системах хорошо описывается кривой «ванна», которая отображает зависимость интенсивности отказов λ от времени работы t. Для внезапных отказов в период полезной работы характерна постоянная интенсивность отказов, что соответствует экспоненциальному распределению времени до отказа. Вероятность безотказной работы в течение времени t при постоянной интенсивности отказов выражается формулой:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

где $R(t)$ – вероятность безотказной работы; λ – интенсивность отказов; t – время безотказной работы

Для параметрических отказов, развивающихся по степенному закону, количество накопленных отказов как функция времени может быть выражено формулой:

$$X(t) = k * t^n$$

где X(t) – параметрический показатель деградации; k – константа, зависящая от условий эксплуатации; n – показатель степени (обычно n находится в диапазоне 1-3 для различных механизмов деградации); t – время работы.

Для отказов, следующих закону Аррениуса в зависимости от температуры, скорость деградации выражается формулой:

$$\nu(T) = A * e^{E_a/(k_B*T)}$$

где $\nu(T)$ – скорость деградации при температуре T; A – константа; E_a –энергия активации механизма деградации; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Понял, принимаю. Переписываю текст про внезапные и параметрические отказы так, чтобы было понятно и живо, как будто инженер объясняет коллеге за чашкой кофе.

Чем отличается «внезапная смерть» детали от медленного угасания

Представьте: одно дело, когда деталь взяла и сдохла в момент – *бац*, и всё. А другое – когда она начинает потихоньку сдавать, параметры плывут, но пока ещё работает. Это два совершенно разных типа отказов: внезапные и параметрические. И для разработки электроники эта разница очень важна.

Когда проектируешь критически важную систему (скажем, для самолёта или поезда), надо думать об обоих вариантах. Для внезапных отказов главное – выбрать компоненты с низкой частотой отказов в рабочем режиме и делать резервирование с отказоустойчивыми архитектурами. А для параметрических – закладывать запас по характеристикам и разрабатывать методы диагностики, чтобы вовремя заметить, что всё поползло.

Тестирование: один подход не работает для всех

Стратегия проверки тоже разная. Обычное функциональное тестирование (работает / не работает) отлично ловит внезапные отказы – ну, сдохло – и видно. Но оно бессильно против параметрического отказа, когда деталь ещё функционирует, но уже не так хорошо, как надо. Тут нужно параметрическое тестирование – измерять конкретные характеристики: задержки сигнала, токи утечки, пороговые напряжения. Так можно заметить проблему задолго до того, как всё рухнет.

А ещё есть ускоренные тесты – гоняют компоненты при повышенной температуре и влажности. Они помогают выявить оба типа отказов и прикинуть реальную надёжность в ускоренном режиме.

Как бороться с каждым типом отказов

Чтобы предотвратить внезапный отказ, делают так:

- Берут компоненты с низкой изначальной интенсивностью отказов.
- Прогоняют тесты, чтобы отсеять бракованные экземпляры на старте.
- Берут детали с запасом по напряжению и температуре.
- Следят за отводом тепла, чтобы не перегревались.
- Ставят защитные схемы от перенапряжений и перегрузок по току.

А для борьбы с параметрическими отказами методы другие:

- Закладывают более консервативные нормы и бóльшие запасы при проектировании.
- Выбирают компоненты с лучшей надёжностью.
- Используют адаптивное управление: система сама отслеживает ухудшение параметров и подстраивает режим работы.
- Организуют встроенный мониторинг, чтобы ловить отклонения.
- Делают предсказательное обслуживание – смотрят тренды изменения параметров и меняют деталь ДО того, как она окончательно умрёт.

Внезапные и параметрические отказы – это две большие разницы. Внезапные возникают случайно, как удар дубиной: раз – и всё. Параметрические – как старение: незаметно, но верно. Первые требуют резервирования и отказоустойчивости, вторые – прогнозирования и своевременной замены.

Чтобы система жила долго и надёжно, нужен комплексный подход: выбирать хорошие компоненты, проектировать с запасом, правильно тестировать, внедрять мониторинг и диагностику, а ещё грамотно защищаться от отказов. Главное – понимать разницу между двумя типами и механизмами их возникновения. Это и есть основа, чтобы делать высоконадёжные устройства, которые отработают своё в любых условиях.

Список литературы

1. Технология изготовления титаностальных переходников с паяно-сварными стыковыми соединениями / Ю. П. Трыков, А. Ю. Трыков, Л. М. Гуревич [и др.] // Сварочное производство. – 2008. – № 7. – С. 14-18. – EDN KGMJRF.

2. Фэн Лэй. Исследование структуры соединений, паянных бессвинцовым припоем / Фэн Лэй // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2009. – № 2(75). – С. 71-75. – EDN KPTXIT.

3. Преимущества современных разновидностей паянных соединений / Ю. А. Цумарев, Е. В. Игнатова, Т. С. Латун, В. К. Шелег // Стандартизация. – 2013. – № 2. – С. 29-32. – EDN VAIHPX.

References

1. Technology of manufacturing titanium-steel adapters with soldered-welded butt joints / Yu. P. Trykov, A. Y. Trykov, L. M. Gurevich [et al.] // Welding production. – 2008. – No. 7. – Pp. 14-18. – EDN KGMJRF.

2. Feng Lei. Investigation of the structure of joints soldered with lead-free solder / Feng Lei // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering series. – 2009. – № 2(75). – Pp. 71-75. – EDN KPTXIT.

3. Advantages of modern varieties of soldered joints / Yu. A. Tsumarev, E. V. Ignatova, T. S. Latun, V. K. Sheleg // Standardization. – 2013. – No. 2. – Pp. 29-32. – EDN VAIHPX.