

Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Экспериментально исследовано воздействие разрядов статического электричества на 8-ми битные микроконтроллеры типа AT89C51RC с 32-мя Кб flash-памяти. Установлено, что накопленный заряд статического электричества, равный 6,4 кВ, приведет к повреждению 94 % информации, инсталлированной во flash-память, а 6,5 кВ приведет к катастрофическому повреждению микроконтроллеров. Предложена методика проведения испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам.

Ключевые слова: микроконтроллер, разряд статического электричества, метод контактного разряда, метод испытания.

Введение. Цель работы – разработать методику оценки устойчивости микроконтроллеров (МК) к воздействию электростатических разрядов (ЭСР) при ступенчатом повышении напряжения.

Постепенное увеличение сложности радиоэлектронного оборудования, обусловленное возрастающими требованиями потребителей, заставляет разработчиков создавать устройства на базе все более надёжных микроэлектронных компонентах, способных работать в жёстких эксплуатационных условиях. Стремление к достижению повышенной надёжности, в таких условиях эксплуатации, достигается использованием оборудования и программного обеспечения, в основе которых лежит специальный, защищённый от ошибок, алгоритм проектирования [1]. Всесторонний обзор различных типов дестабилизирующих факторов, приводящих к отказу компонентов, показывает, что одним из самых разрушительных является ЭСР.

Электростатический разряд – импульсный перенос накопленного электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами [2].

Теоретические исследования. Природа ЭСР весьма различна, поэтому невозможно обеспечить защиту компонентов во всех возможных ситуациях. Одним из основных факторов, влияющих на зарождение ЭСР, является *статическая электризация* объекта, которая охватывает все процессы, ведущие к образованию и разделению положительных и отрицательных электрических зарядов в результате механической деформации, имеющей место при столкновении или контакте поверхностей двух твердых тел, поверхностей твердого тела и жидкости, а также при разрыве или отделении поверхностей твердых тел или жидкости газами

или каким-либо другим агентом, в частности, ионизированными газами [4].

Одним из самых распространенных объектов электризации является человек, который накапливает заряд статического электричества до пятнадцати киловольт (рисунок 2) [5]. По исследованиям, проведенным в [6] известно, что данный заряд приводит к 70 % повреждений полупроводниковых приборов.

Данный заряд генерируется на теле человека, на основании следующих физических механизмов [7 – 9]:

а) *трибоэлектрический*. При соприкосновении и разделении двух объектов один всегда заряжается положительно, другой – отрицательно.

б) *индукционный*. При перемещении заряженных объектов вблизи незаряженного, в последнем генерируется статический заряд с противоположным знаком и, как следствие, возникает индукционный ток.

в) *емкостной*. Заряд есть произведение напряжения на емкость, поэтому при постоянной величине заряда уменьшение емкости влечет рост потенциалов разъединяемых поверхностей.

Особое внимание, уделяемое в микроэлектронной промышленности электризации человека, привело к тому, что была разработана экспериментальная модель воздействия ЭСР – *модель человеческого тела (МЧТ)*.

Тестовая схема воздействия ЭСР на МК по МЧТ представлена в [10]. В ней конденсатор ($C_n = 150$ пФ) заряжается через высокоомный резистор ($R_z = 50 \div 100$ МОм) напряжением ± 2 кВ, затем разряжается через резистор ($R_p = 330$ Ом) в контактный вывод МК. Конденсатор C_n и резистор R_p моделируют ёмкость и сопротивление человеческого тела соответственно. Одним из самых важных параметров в тесте является время нарастания тока во время разряда. Оно долж-

но быть порядка десятых долей наносекунд и форма импульса разрядного тока на выходе должна соответствовать типовой форме (рисунок 4) [2].

Важность проблемы и необходимость разработки мер, помогающих предотвратить нежелательные эффекты из-за воздействия ЭСР, потребовали систематизации и разработки методики испытания МК на чувствительность к ЭСР, главной целью которой является получение надежных и повторяющихся результатов испытания для наиболее точной классификации МК по чувствительности к ЭСР.

Методика проведения испытания. Авторами были проведены испытания МК на чувствительность к ЭСР по МЧТ [10], которые учитывали результаты, высказанные в [1, 2, 9], а также, строго соответствовали требованиям [2, 5, 9] в области климатических условий (испытания проводились при нормальных климатических условиях) и электромагнитной обстановки (электромагнитная обстановка не влияла на результаты испытаний).

Проведение испытаний состояло из следующих *этапов*:

1) формирование партий МК по три штуки в каждой.

Для проведения испытания был выбран МК типа AT89C51RC, представляющий собой восьми битный МК с 32-мя Кб *flash*-памяти и выполненный в сорокавыводном пластмассовом корпусе типа MCS-51 [11].

Данный выбор обусловлен тем, что набор аппаратных средств и совокупность реализуемых функций делают данный МК эффективным средством сбора, обработки информации и управления объектами [12] и широко используется разработчиками современной аппаратуры.

Выбор количества МК обусловлен финансовой стороной.

2) измерение электрических параметров МК до воздействия ЭСР.

Для измерения электрических параметров МК был использован цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS3052C, который позволяет измерять и наблюдать сигналы на портах МК до и после воздействия ЭСР. Выбор был обусловлен тем, что данный осциллограф регистрирует и отображает сложные сигналы, случайные события и едва различимые особенности в поведении сигналов, в реальном масштабе времени и предоставляет информацию о сигнале в трех измерениях: амплитуда, время и зависимость амплитуды от времени.

3) анализ программного обеспечения (ПО) МК до воздействия ЭСР.

Для анализа ПО, установленного во *flash*-память МК, использовался персональный компьютер с подключенным к нему универсальным программатором-тестером *ChipStar-Turbo*, который предназначен для программирования современных МК широкого спектра.

Для исключения каких-либо накладок в ПО, производилось стирание *flash*-памяти МК. Данная операция реализуется в среднем на протяжении 3 – 4 с.

После осуществления стирания *flash*-памяти МК, устанавливалось эталонное ПО, предоставленное разработчиком. Если МК исправен, то данная операция выполняется на протяжении 1 мин. 50 с.

Для подтверждения правильности проделанных ранее операций (стирания и установки ПО во *flash*-память МК) производилась сверка установленного ПО с эталонным.

4) осуществление контактных разрядов на порты МК с расположением разрядного накопника генератора ЭСР перпендикулярно к поверхности контактного вывода. Данное расположение позволит улучшить повторяемость результатов испытаний.

Для генерации ЭСР был использован генератор ЭСР – ESD 3000, так как данное оборудование обладает возможностью генерации импульсов с техническими характеристиками и параметрами, указанными в [2].

На каждый порт МК (таблица 1) производилось попеременно по 10 одиночных разрядов разной полярности с интервалом, между последовательными одиночными разрядами, в 1 с.

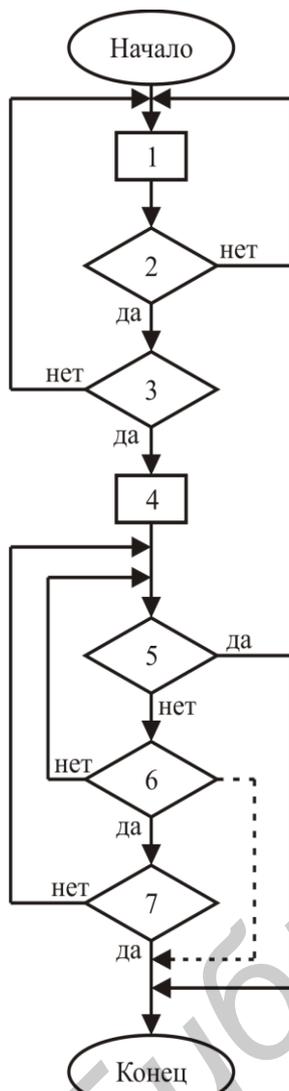
Первоначальное значение напряжения ЭСР (250 В) выбрано в соответствии с методом 502-1.1а «испытание микросхем по определению допустимых значений статического электричества по модели человеческого тела» [10]. Последующие значения напряжений воздействующих ЭСР составляли: 500 В, 1 кВ, 2 кВ и 4 кВ. При данных значениях никаких изменений не было выявлено.

Следующее значение напряжения воздействующего ЭСР, было взято 6,0 кВ, что обусловлено данными по значению напряжения, приведенному в [11]. Ступенчатое увеличение, на 0,1 кВ, вызвано необходимостью получения более точных данных по отказам.

5) анализ ПО, установленного во *flash*-память МК, после воздействия ЭСР.

6) измерение электрических параметров МК после воздействия ЭСР.

Данные этапы можно представить следующим алгоритмом (рисунок 1).



Обозначение	Описание операции
Начало	Начало проведения исследования.
1	Выбор типа МК, количества партий и штук в партии.
2	Стирание <i>flash</i> -памяти МК. <i>Нет.</i> В партии обнаружен МК во <i>flash</i> -память которого невозможно установить ПО. Необходимо исключить МК из партии и перевыполнить п.1. <i>Да.</i> В партии все МК с исправной <i>flash</i> -памятью. Выполнение дальнейших операций.
3	Измерение электрических параметров МК. <i>Нет.</i> В партии обнаружен МК не соответствующий техническим характеристикам исследуемых МК. Необходимо исключить МК из партии и перевыполнить п.1. <i>Да.</i> В партии все МК соответствуют техническим характеристикам исследуемых МК. Выполнение дальнейших операций.
4	Осуществление первого контактного разряда на контактные выводы МК определенного напряжения.
5	Ступенчатое повышение напряжения ЭСР. <i>В случае анализа ПО МК:</i> <i>Нет.</i> Значение напряжения ЭСР не является критическим и не выявлено нарушений. Выполнение дальнейших операций. <i>Да.</i> Значение напряжения ЭСР является критическим для ПО МК и выявлены нарушения. Прекращение эксперимента с обозначением значения напряжения. <i>В случае анализа электрических параметров МК:</i> <i>Нет.</i> Значение напряжения ЭСР не является критическим. Электрические параметры МК остались без изменений. Выполнение дальнейших операций. <i>Да.</i> Значение напряжения ЭСР является критическим для МК. Выявлены ухудшения или отказ МК. Прекращение эксперимента с обозначением значения воздействующего напряжения.
6	Сверка ПО, установленного в <i>flash</i> -память МК, с эталонным после контактного воздействия ЭСР. <i>Нет.</i> В ПО МК не выявлены нарушения. Осуществить дальнейшее ступенчатое увеличение напряжения ЭСР по п.5. <i>Да.</i> В ПО МК выявлены нарушения. В случае необходимости, стоит прекратить дальнейшее исследование с обозначением полученного напряжения как опасного для ПО МК.
7	Измерение электрических параметров МК после контактного воздействия ЭСР. <i>Нет.</i> В партии не обнаружен ни один МК не соответствующий техническим характеристикам исследуемых МК. Необходимо осуществить дальнейшее ступенчатое повышение напряжения ЭСР по п.5. <i>Да.</i> В партии обнаружен хотя бы один МК не соответствующий техническим характеристикам исследуемых МК. Необходимо прекратить дальнейшее исследование с обозначением полученного напряжения, как критического для исследуемого типа МК.
Конец	Конец проведения исследования.

Рисунок 1 – Алгоритм испытания МК на чувствительность к ЭСР

Проведение экспериментов по разработанному алгоритму. Сгенерированные первые ЭСР, напряжениями с 6,0 кВ по 6,2 кВ, никаким образом не повлияли на работоспособность МК и ПО, установленное в *flash*-память.

При ЭСР, напряжением 6,3 кВ, в ПО, установленном в *flash*-память МК, нарушений выявлено не было, однако, при попытке осуществить перезапись ПО была выявлена ошибка, подтверждающая возникновение скрытого дефекта (рисунок 2).

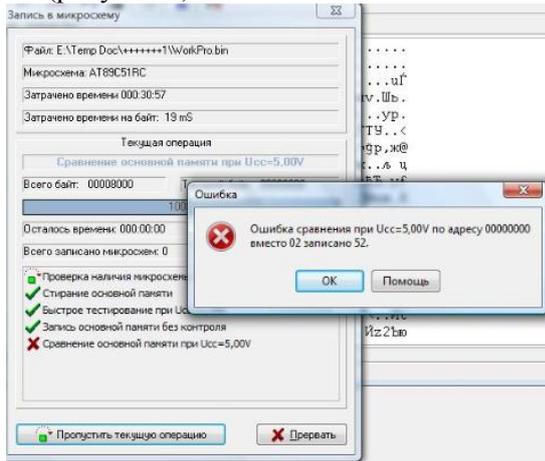


Рисунок 2 – Ошибка, выявленная при установке ПО в *flash*-память МК, после воздействия ЭСР напряжением 6,3 кВ

На рисунке 2 можно увидеть, что время установки ПО в *flash*-память МК увеличилась с 1 мин. 50 с. до 30 мин. 57 с.

Последующее повышение напряжения ЭСР до 6,4 кВ привело к тому, что ПО, установленное в *flash*-память МК, претерпело ряд существенных изменений, а именно: привело к повреждению 94 % информации хранящейся в *flash*-памяти МК. Это было выявлено при осуществлении сверки установленного ПО с эталонным (рисунок 3).

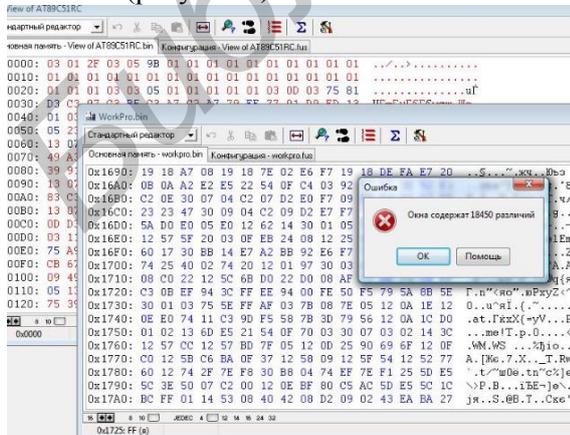


Рисунок 3 – Ошибка, выявленная при сравнении эталонного ПО с ПО, установленным в *flash*-память МК, после воздействия ЭСР напряжением 6,4 кВ

После осуществления ЭСР, напряжением 6,4 кВ, на всех портах МК были сняты электрические параметры. Осциллограммы, снятые с 1-го МК 5-ой выборки и всех МК 6-ой выборки, имели форму, свидетельствующую о возникновении повреждения в МК.

После подачи напряжения питания на 1-ый МК 5-ой выборки и все МК 6-ой выборки, с помощью цифрового пирометра Mastech MS6530 было выявлено постепенное повышение температуры, которая, в течение 7 ÷ 9 мин., поднялась с 30 до 78 °С. По прошествии 10 мин. с МК нельзя было снять осциллограммы, что говорит о полной утрате работоспособности [17].

При выявлении причин каждого отказа, при испытании МК на чувствительность к ЭСР, учитывалась возможность разрушения разрядным импульсом отдельных элементов их конструкции. Можно предположить, что отказ 1-го МК 5-ой выборки обусловлен наличием технологических дефектов в структуре или конструкции МК. Отказы всех МК 6-ой выборки обусловлены воздействием критического значения напряжения для данного типа МК.

Математическая модель расчета результатов.

Предложим следующие различные математические выражения:

$$V^k T = A, \tag{1}$$

$$(V - V_0)^k T = A, \tag{2}$$

$$V = V_0 - N \log \frac{T}{T_0}. \tag{3}$$

где V и T соответственно – подаваемое напряжение и продолжительность его воздействия;

V_0 и T_0 – пара частных величин;

A , k и N – постоянные, свойственные испытываемым МК.

Представим математическое выражение (1) в логарифмической форме (4):

$$k \log V + \log T = \log A. \tag{4}$$

Графически его можно представить в логарифмических координатах в виде прямой линии.

Этот метод применим тогда, когда k (крутизна кривой электрической устойчивости на логарифмическом графике) приблизительно установлена по результатам предшествующих испытаний или испытаний на электрическую устойчивость, полученных до достижения медианного времени до пробоя. Конечные точки для более прочных образцов или другой не испытанной группы аналогичных образцов можно определить по этому методу ступенчатым повышением напряжения.

С учетом допущений, изложенных выше, напряжение $V' = aV$, поданное за время T' , отнимает от срока службы МК часть, эквивалентную подаче напряжения V за время T (5):

$$T'' = \frac{1}{a^k} T. \quad (5)$$

При выборе $a = \sqrt[k]{2}$ подача напряжения V_i за время T_i эквивалентно подаче напряжения aV_i за время $T_i/2$. При использовании n образцов напряжение подают ступенями в геометрической прогрессии $V_0, aV_0, \dots, a^p V_0$ для времени T_0, T_1, \dots, T_p на все образцы.

Если испытуемый образец пробит при напряжении $a^p V_0$, общее время T_a эквивалентное этому напряжению, составит (6):

$$T_a = \frac{T_0}{2^p} + \frac{T_1}{2^{p-1}} + \dots + \frac{T_{p-1}}{2} + T_p. \quad (6)$$

Тогда, срок службы рассматриваемого МК при напряжении $a^p V$ будет T_a и в соответствии с уравнением (1) можно принять, что при любом напряжении V срок службы будет T , если (7):

$$V^k T = a^p V_0^k T_a. \quad (7)$$

При использовании n образцов, каждому соответствует пара значений (8):

$$(a^p V_0); T_{ai} \text{ при } i = 1 \text{ до } n. \quad (8)$$

Предположим, что это время T_m . Для каждого образца с помощью уравнения (4) будет вычислено напряжение, соответствующее этому сроку службы, что даст n напряжений V_{mi} , соответствующих сроку службы T_m . Из этих n значений напряжения вычисляют среднее напряжение для группы образцов (9):

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{mi}. \quad (9)$$

Вычислим также элементы, относящиеся к разбросу, например, соответствующее стандартное отклонение (10):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{mi} - V_m)^2}{n-1}}. \quad (10)$$

Если допущения, данные в 1, точны, то четыре точки размещаются на одной линии, или более точно, можно провести прямую линию в доверительных пределах при 95% средних значений напряжения, а крутизна этой прямой с логарифмическими координатами соответствует коэффициенту k формулы (1).

Таблица 1 – Комбинация контактных выводов МК и выявление отказов после воздействия ЭСР

№ выборки	№ МК	Комбинация контактных выводов МК	Испытательное напряжение ЭСР со знаком «±», кВ					
			6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
1 – 3	1	(Port 0; Port 1; Port 2; Port 3) – GND		–				
	2	(RST; XTAL1; XTAL2) – GND		–				
	3	(ALE / PROG; PSEN; EA/VPP) – GND		–				
4	1	(Port 0; Port 1; Port 2; Port 3) – GND				+		
	2	(RST; XTAL1; XTAL2) – GND				–		
	3	(ALE / PROG; PSEN; EA/VPP) – GND				–		
5	1	(Port 0; Port 1; Port 2; Port 3) – GND					~	
	2	(RST; XTAL1; XTAL2) – GND					+	
	3	(ALE / PROG; PSEN; EA/VPP) – GND					+	
6	1	(Port 0; Port 1; Port 2; Port 3) – GND						~
	2	(RST; XTAL1; XTAL2) – GND						~
	3	(ALE / PROG; PSEN; EA/VPP) – GND						~

Примечание:

«-» - нет нарушений в программном обеспечении;
«+» - есть нарушения в программном обеспечении;
«~» - полная утрата работоспособности МК.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований:

а) экспериментально проверено воздействие ЭСР на flash-память МК типа AT89C51RC в соответствии с разработанной методикой;

б) установлено, что накопленный заряд статического электричества, равный 6,4 кВ, приведет к повреждению 94 % информации хранящейся во flash-памяти МК;

в) выявлено, что заряд статического электричества, равный 6,5 кВ, приведет к повреждению 100 % МК.

Полученные результаты полностью подтверждают значения, приведенные в [11], что говорит о том, что данная методика верна. Рекомендация к использованию данной методики основана на том, что при минимизации материальных затрат можно получить результаты не уступающие тем, что и на более дорогостоящих установках [18, 19].

Предложенная методика проведения испытаний *flash*-память МК на чувствительность к ЭСР позволяет упростить процедуру существующих испытаний и сократить материальные затраты на проведение эксперимента.

Библиографический список

1. Горлов М.И., Строгонов А.В. Воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые изделия. Часть 1 // ChipNews. 2001. № 1.
2. СТБ МЭК 61000-4-2-2006 Электромагнитная совместимость Часть 4-2. Методы испытаний и измерения. Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам.
3. Гизатуллин З.М. Воздействие электростатического разряда на функционирование цифровых элементов печатных плат электронных средств : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.05 / Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева Казань, 2004 16 с. : 9 04-9/2809-6 9 04-9/2810-X
4. Лёб Л. Статическая электризация, перевод с английского, М. – Л., Госэнергоиздат, 1963, 408 с. с черт.
5. IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-2: Testing and measurement techniques. Electrostatic discharge immunity test.
6. Горлов М.И. Электростатические заряды в электронике / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович. – Мн.: Бел. наука, 2006. – 295 с.
7. Каверзнев В.А. и др. Статическое электричество в полупроводниковой промышленности. М., «Энергия», 1975.
8. Джозетт Ч.Е. Статическое электричество в электронике: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 136 с., ил.
9. ОСТ 11 073.013 – 2008 Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Методы электрических испытаний. Часть 7
10. Datasheet AT89C51RC [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://www.datasheet.ru>
11. Бродин В.Б., Калинин А.В. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики – М.: Издательство ЭКОМ, 2002.—400 с: илл.
12. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
13. THERMO SCIENTIFIC SYSTEM 700 Паспорт установки тестирования на воздействие электростатического разряда
14. Стенд для испытаний интегральных схем на чувствительность к разряду статического электричества (УИСЭ-10) [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.ruselectronics.ru>