
УДК 621.3.049.77–048.24:537.2

Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, О. А. Брылева

МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

G. A. Piskun, V. F. Alekseyev, O. A. Bryleva

METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF MICROCONTROLLERS WITH ELECTROSTATIC DISCHARGES

Аннотация

Проведен анализ методов контроля работоспособности микроконтроллеров в условиях воздействия разрядов статического электричества. Рассмотрены три метода параметрического тестирования, базирующихся на особенностях формы и длительности действия электростатических разрядов. Приведены обязательные параметры электронных компонентов, входящих в состав установок по имитации разрядов. Представлен наиболее часто используемый способ функционального тестирования микроконтроллеров, основанный на считывании и анализе инсталлированного массива данных из памяти микросхемы.

Ключевые слова:

микроконтроллер, электростатический разряд, диагностика, параметрическое тестирование, функциональное тестирование, массив данных.

Abstract

The analysis of methods of controlling microcontrollers performance under the action of static electricity discharges has been performed. Three basic methods of parametric testing based on the characteristics of shape and duration of electrostatic charges have been considered. Mandatory parameters of electronic components of installations which simulate discharges are given. The most commonly used method of functional testing of microcontrollers is presented which is based on reading and analyzing the installed data set from the microcircuit memory.

Key words:

microcontroller, static discharge, diagnostics, parametric testing, functional testing, data set.

Большинство функционально сложных элементов микроэлектроники, таких как микроконтроллеры (МК) различного назначения, могут быть достаточно надежными, как правило, только при условии закладывания данного показателя при их проектировании, обеспечении при производстве и сохранении в процессе эксплуатации [1, 2]. Поэтому актуальной задачей для современной электроники является поддержание высокой надежности микроконтроллеров, в том числе путем систематического

контроля их технического состояния и периодической диагностики. В связи с этим, возникает необходимость в разработке и модернизации методов и моделей для исследования и оценки устойчивости МК как на этапе производства, так и при эксплуатации в составе электронного средства.

Широкое применение МК в составе электронных средств, используемых в условиях различных деструктивных воздействий, предполагает обязательную эффективную техническую диагно-

стику микросхем. Из всех видов дестабилизирующих влияний особый интерес вызывают исследования в рамках оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию электростатических разрядов (ЭСР) [3–6].

Следует отметить, что на сегодняшний день в процессе контроля работоспособности МК после воздействия разрядов статического электричества проводятся два вида испытаний:

– *параметрическое тестирование*, в процессе которого проверяется нахождение электрических и временных характеристик МК в пределах, заданных техническими условиями;

– *функциональное тестирование*, с помощью которого контролируется выполнение МК функций, определенных техническими условиями.

Вышеприведенные виды испытаний можно представить следующим образом.

1 Методы параметрического тестирования микроконтроллеров.

Данные методы основываются на трех базовых моделях воздействия электростатическими разрядами: *модель те-*

ла человека – МТЧ (англ. *Human Body Model*); *машинная модель* – ММ (англ. *Machine Model*) и *модель заряженного прибора* – МЗП (англ. *Charged Device Model*) [8–10].

Наиболее изученной и широко распространенной моделью для оценки устойчивости МК к воздействию ЭСР является МТЧ. Это обусловлено в первую очередь тем, что МТЧ так же, как и ММ, предназначена для симуляции процесса ЭСР заряженного объекта (человек или машина) при его соприкосновении с объектом. В МЗП же рассматривается процесс быстрого разряда электростатически заряженного электронного компонента.

Рассмотрим принципы проведения испытаний МК на устойчивость к воздействию электростатических разрядов по вышеуказанным моделям.

1.1 Модель тела человека.

Даже при сравнительно простых движениях на поверхности тела человека может создаваться значительный электростатический заряд (табл. 1) [11].

Табл. 1. Значения напряжения ЭСР, возникающие при выполнении различных операций

Операция	Значение напряжения электростатического разряда при относительной влажности, кВ		
	10 %	40 %	55 %
Ходьба по ковру	35	15	7,5
Ходьба по виниловому покрытию пола	12	5	3
Движение по скамье или верстаку	6	0,8	0,4
Изъятие МК из пластмассового пенала	2	0,7	0,4
Снятие МК с винилового подноса или пластины	11,5	4	2
Изъятие МК из пластиковой упаковки	14,5	5	3,5

Необходимо отметить, что при описании процесса воздействия разрядов статического электричества по МТЧ приняты некоторые допущения. Прежде всего, данная модель довольно упрощенно представляет распределенную систему

(тело человека) и в ней не учитываются коронные явления, появляющиеся перед самим разрядом. Также не учтена индуктивность тела человека величиной 50...100 мкГн, которая в какой-то степени ограничивает крутизну фронтов им-

пульсов ЭСР. К тому же реально наблюдаемый разряд рассматриваемого типа протекает не однократно, а в виде серии последовательных импульсов при более низких напряжениях [4].

Наиболее часто воздействие ЭСР по данной модели встречается в такой ситуации, когда носитель заряда – чело-

век – касается контактных выводов микросхемы, например, при выполнении операции ручной сборки (рис. 1, а), и часть энергии, содержащейся на поверхности его тела, передается, т. е. разряжается, на микроконтроллер и через него на землю.

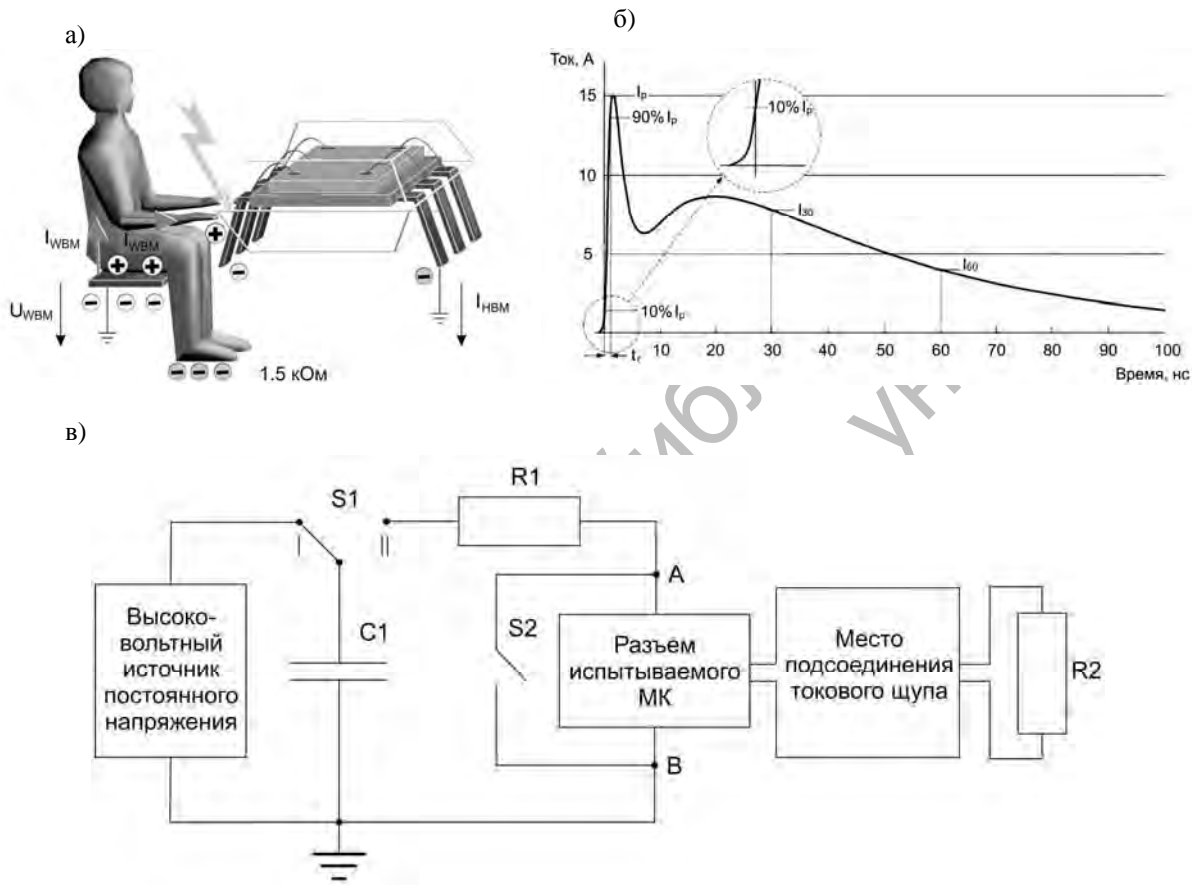


Рис. 1. Основные параметры модели тела человека: а – принцип воздействия; б – форма импульса разряда; в – схема испытательного имитационного генератора электростатических разрядов со следующими параметрами электронных компонентов: $R1 = (1500 \pm 1) \text{ Ом}$; $R2$ – безиндуктивный резистор номиналом $(500 \pm 1) \text{ Ом}$, рассчитанный на напряжение 4 кВ; $C1$ – конденсатор емкостью $(100 \pm 10) \text{ пФ}$

Полную модель ЭСР сложно воспроизвести на практике, поэтому отечественные и большинство зарубежных стандартов предусматривают только поверхностные RC-компоненты и максимально допустимое время нарастания 20 нс (рис. 1, б) [11].

Эквивалентная схема МТЧ в общем случае состоит из последовательно соединенной емкости $C_{НВМ}$ и сопротивления $R_{НВМ}$. В действующем стандарте Респуб-

лики Беларусь СТБ МЭК 61000-4-2-2006 [11] емкость и сопротивление тела человека равны $C_{НВМ} = 100...2500 \text{ пФ}$ и $R_{НВМ} = 80...2000 \text{ Ом}$, что соответствует отдельно стоящему человеку, несущему заряд на всей поверхности кожи. Обычный уровень заряда, накопленный на теле человека, равен 12 кВ, причем энергия заряда при этом составляет 15 мДж; при максимальном же значении напряжения 15 кВ энергия – 17 мДж.

При проведении испытаний используются специализированные генераторы, схема которых приведена на рис. 1, в.

Несмотря на это, результаты какой-нибудь одной испытательной ситуации можно использовать для сравнения МК по их пороговым уровням напряжения разрушения. Установленные таким образом пороговые уровни обладают значениями, характерными для случая разрушения, т. к. реальные ЭСР с определенным потенциалом почти всегда слабее, чем в испытательных схемах.

1.2 Машинная модель.

Отличительная особенность ММ, по сравнению с МТЧ, в том, что электростатическим зарядом обладает не человек, а другое заряженное устрой-

во или машина. Заряд, накопленный на металлических частях подложки и корпуса, протекает через подложку и вызывает отказы р-п-переходов, диэлектрических слоев и элементов, являющихся частью разряженного участка.

Пример случая, описываемого машинной моделью, может наблюдаться при автоматической подаче микроконтроллеров путем скольжения в подводящих каналах (рис. 2, а). Система контактных выводов МК и его корпуса в результате трения могут заряжаться статическим электричеством таким же образом, как заряжается тело человека при осуществлении операций, сопряженных с процессом трения [12, 13].

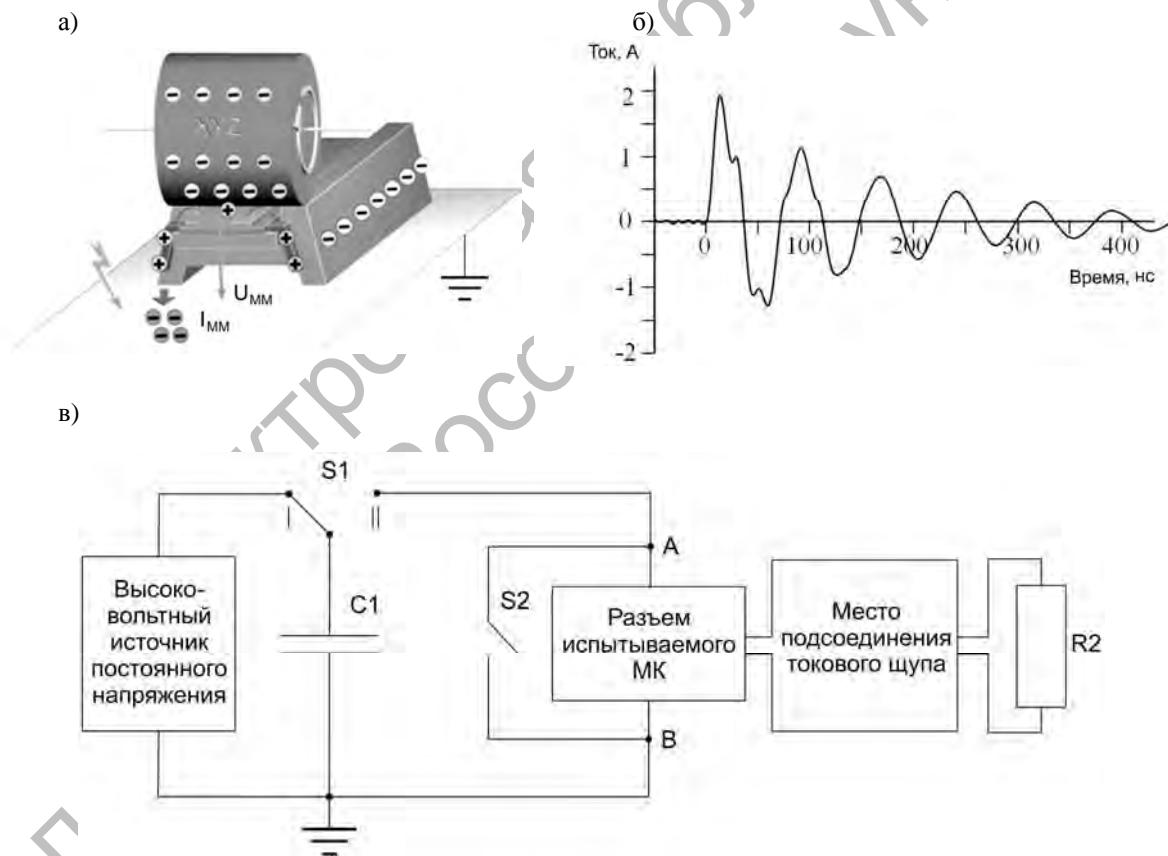


Рис. 2. Основные параметры машинной модели: а – принцип воздействия; б – форма импульса разряда; в – схема испытательного имитационного генератора электростатических разрядов со следующими параметрами электронных компонентов: R2 – безындуктивный резистор номиналом (500 ± 1) Ом, рассчитанный на напряжение 4 кВ; C1 – конденсатор емкостью (100 ± 10) пФ

Из-за малости разрядного сопротивления форма импульса (рис. 2, б) определяется лишь величинами паразитных элементов схемы. Следовательно, повторяемость результатов испытаний по ММ оказывается значительно ниже, чем при использовании МТЧ.

При имитации ЭСР по ММ в эквивалентной схеме основным отличием, по сравнению с уже рассмотренной выше МТЧ, являются лишь величины собственной ёмкости объекта и разрядного сопротивления (рис. 2, в).

Повреждение МК при воздействии

разрядов статического электричества по ММ может произойти вследствие того, что разрядный импульс проходит настолько быстро, что выделяемая плотность потока мощности превышает порог разрушения.

1.3 Модель заряженного прибора.

В МЗП рассматривается случай, когда МК ещё в процессе производства приобретает ЭСЗ, а затем разряжается на объект, обладающий высокой проводимостью (например, на землю) (рис. 3, а) [14].

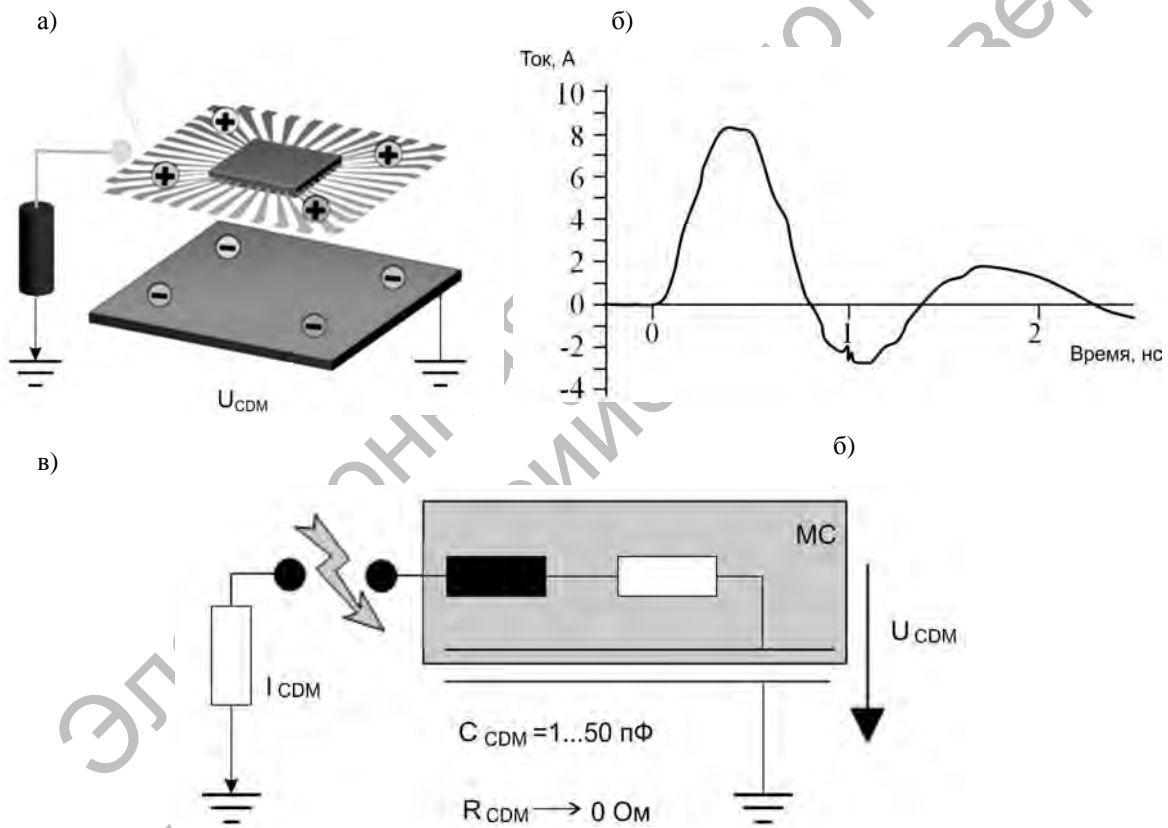


Рис. 3. Основные параметры модели заряженного прибора: а – принцип воздействия; б – форма импульса разряда; в – схема испытательного имитационного генератора электростатических разрядов

Этот чрезвычайно быстрый разряд не приводит к перегреву схемы защиты МК от ЭСР (как это происходит при использовании моделей МТЧ или ММ), зато он чаще всего приводит к возникновению такого нарушения в структуре МК, как пробой изолирующего оксид-

ного слоя [1, 2].

Типичная форма разрядного импульса при проведении испытаний МК на устойчивость к ЭСР по МЗП приведена на рис. 3, б. Его нарастающий фронт гораздо короче (время нарастания приблизительно 300 пс), а общая

длительность импульса существенно ниже (приблизительно 0,5 нс), чем соответствующие параметры импульсов в моделях МТЧ и ММ. Это означает, что амплитуда тока в импульсе достигает нескольких ампер даже при низких напряжениях разряда. При использовании МЗП уровень мощности, рассеиваемой в устройстве, оказывается ниже, чем при применении МТЧ и ММ.

В процессе испытаний МК на устойчивость к воздействию ЭСР по МЗП он вынут из панели и лежит на металлической пластине контактными выводами вверх. Сначала МК заряжается посредством подачи заряда на земляной вывод через высокоомный резистор либо от заряженной подложки за счёт электростатической индукции. Затем контактные выводы МК поочередно разряжаются (при касании их заземлённой иглой). Как видно из рис. 3, в, кристалл МК и металлическая пластина, на которой лежит МК, образуют своеобразный конденсатор, ёмкость которого зависит от геометрии корпуса МК. Значение данной ёмкости определяет вели-

чину электрического заряда, который может быть накоплен кристаллом МК, и, следовательно, амплитуду разрядного тока. Поскольку процесс разряда начинается с того, что между тестируемым контактным выводом МК и заземлённой иглой возникает искра (ещё до того, как они соприкасаются друг с другом), повторяемость теста МЗП также невысока. Однако данное испытание очень хорошо моделирует реальные ситуации, возникающие при различных манипуляциях с МК [1, 4, 7].

2 Методы функционального тестирования микроконтроллеров.

При проверке работоспособности в процессе функционирования большинства современных микросхем можно использовать метод, заключающийся в сравнении выходных параметров исследуемой модели с её эталонной версией, включенной параллельно с МК [7].

Структурная схема стенда, на котором реализуется информационно-энергетический метод контроля, приведена на рис. 4 [12].



Рис. 4. Структурная схема устройства, реализующего функциональное тестирование микроконтроллера

В качестве информационных параметров диагностики чаще всего выбирают: неоднородность массива ПО; заряд при осуществлении переходного процесса в момент смены информации при записи или считывании; время за-

вершения переходного процесса в момент подачи входного воздействия и окончательной токовой реакции на это воздействие [1].

Контроль неоднородности любого вида заключается в поиске максималь-

ного отклонения контролируемого статического временного и зарядового параметров от значения на выбранном калибровочном массиве, измерении величины этого отклонения и фиксации адреса ячейки, на которой данное максимальное отклонение имело место. При контроле неоднородности используются алгоритмы бегущего «0» и бегущей «1».

Устройство работает следующим образом. С блока 1 (блок задания воздействий) сигналы воздействия (бегущий «0» или бегущая «1») подаются на входы эталонного и испытуемого МК, выходные сигналы которых вычитаются блоком 4 (блок вычитания), и дальнейшей обработке подвергается разность сигналов эталонного и испытуемого МК. Полученная разность сигналов преобразуется в напряжение блоком 5 (преобразователь ток-напряжение) и далее производится операция интегрирования блоком 6 (интегратор), результат интегрирования с которого перезаписывается в аналоговое запоминающее устройство 7 (аналоговое ЗУ) и контролируется блоком 8 (компаратор) с заданными границами компарирования, величины которых программируются. Результаты компарирования обрабатываются блоком контроля 9 (блок результатов и контроля) по принципу «годен – брак». При этом контроль производится в каждом цикле (записи или считывания) при обращении к каждой ячейке, т. е. просматриваются все ячейки памяти.

Недостатком этого метода следует считать отсутствие информации о степени отклонения показателя качества переходного процесса (изменений в инсталлированном программном коде),

который приведет к ложному срабатыванию МК.

Проведенный анализ условий влияния ЭСР на МК показал, что параметры воздействующего разряда статического электричества варьируются в широком диапазоне напряжений, однако закономерности для вышепредставленных моделей являются идентичными. Для оценки их характеристик желательно рассматривать разряд статического электричества как одиночный электромагнитный импульс, обладающий индивидуальными характеристиками (фронт, длительность и т. д.). Предложено при анализе воздействующего ЭСР учитывать такие наиболее важные показатели, как напряжение и длительность импульса разряда, которые оказывают основное влияние на возможность возникновения повреждений.

При исследовании метода функционального тестирования МК на устойчивость к воздействию ЭСР были выявлены существенные недостатки: используется сложная система поиска и обнаружения дефектов, а также применяются принципы диагностики, не свойственные анализу повреждений флеш-памяти, а именно: не анализируется внутренняя структура и архитектура, не показан принцип доступа к памяти, не учитывается внутренняя взаимосвязь функциональных блоков и т. д. Таким образом, в связи с усложнением функций, выполняемых аппаратурой на МК, одной из основных задач для производителей является разработка наиболее эффективных алгоритмов технической диагностики МК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горлов, М. И.** Электростатические заряды в электронике / М. И. Горлов, А. В. Емельянов, В. И. Плебанович. – Минск: Беларус. наука, 2006. – 295 с.
2. **Кечиев, Л. Н.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. Д. Пожидаев. – М. : Технология, 2005. – 352 с.
3. **Хабигер, Э.** Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер ; под ред. Б. К. Максимова. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.

4. Уильямс, Т. ЭМС для систем и установок / Т. Уильямс, К. Армстронг. – М. : Технология, 2004. – 508 с.
5. Gieser, H. A. ESD testing: HBM to very fast TLP / H. A. Gieser // Tutorial presented at the ISREF. – 2004. – С. 3–10.
6. Johnson, C. C. Two unusual HBM ESD failure mechanisms on a mature CMOS process / C. C. Johnson, T. J. Maloney, S. Qawami // EOS/ESD Symposium. – 1993. – P. 225–231.
7. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В. Ф. Алексеев [и др.] // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С. 5–12.
8. Алексеев, В. Ф. Методика оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию разрядов статического электричества при ступенчатом повышении напряжения / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 2 (40). – С. 34–40.
9. Analysis of HBM and MM ESD failures in nMOS devices / M. Beh [et al.] // Int. Symp. on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). – 1995. – P. 111–115.
10. Пискун, Г. А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 12–18.
11. Электромагнитная совместимость. Ч. 4–2. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам : СТБ МЭК 61000-4-2-2006. – Введ. 08.12.06. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 27 с.
12. Пискун, Г. А. Устойчивость радиоэлектронного оборудования на базе микроконтроллеров к электростатическим разрядам / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. Н. Пикулик // Стандартизация. – 2012. – № 1. – С. 37–39.
13. Джоввет, Ч. Э. Статическое электричество в электронике / Ч. Э. Джоввет. – М. : Энергия, 1980. – 135 с.
14. Шваб, А. Электромагнитная совместимость / А. Шваб ; под ред. И. П. Куженина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.

Статья соана в редакцию 21марта 2013 года

Геннадий Адамович Пискун, ассистент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: 8-017-293-22-07.

Виктор Федорович Алексеев, канд. техн. наук, доц. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: 8-017-293-22-07.

Gennady Adamovich Piskun, assistant lecturer, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Tel.: 8-0172-293-22-07

Viktor Fedorovich Alekseyev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Tel.: 8-017-293-22-07.