

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. Alexeev, V.A. Bryleva

METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS MICROCONTROLLERS WITH ELECTROSTATIC DISCHARGE

Аннотация

Проведен анализ методов контроля работоспособности микроконтроллеров в условиях воздействия разрядов статического электричества. Рассмотрены три базовых 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 methods of control performance microcontrollers in conditions of static electricity. We have considered three basic methods of parametric test, based on the characteristics of the shape and duration of electrostatic charges. Mandatory parameters are electronic components that make up the plants to simulate discharges. Contains the most commonly used method of functional testing of microcontrollers based on the reading and analysis of installed array of data from memory chips.

Keywords:

microcontroller, static discharge, diagnosis, 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 чем, возникает необходимость в разра-

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

Стоит 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.

Указанные виды испытаний можно представить следующим образом.

1. Методы параметрического тестирования микроконтроллеров.

Данные методы основываются на трех базовых моделях воздействия электростатическими разрядами: *модель тела 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 моделям указанным выше.

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 операциях

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 самым разрядом. Также не учтена индуктивность тела человека величиной 50 – 100 мкГн, которая в ка-

кой-то степени ограничивает крутизну фронтов импульсов 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 – человек, касается контактных выводов мик-

росхемы, например, при выполнении операции ручной сборки (рис. 1,а), и часть энергии, содержащейся на по-

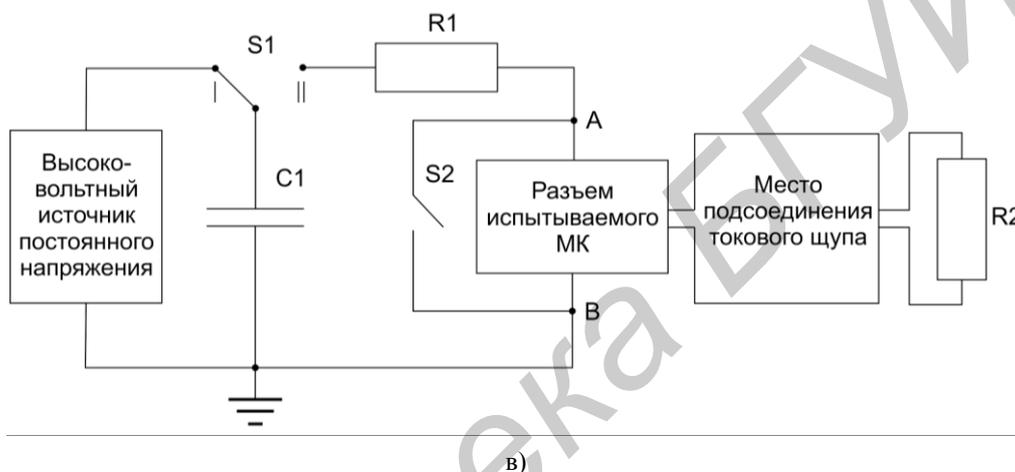
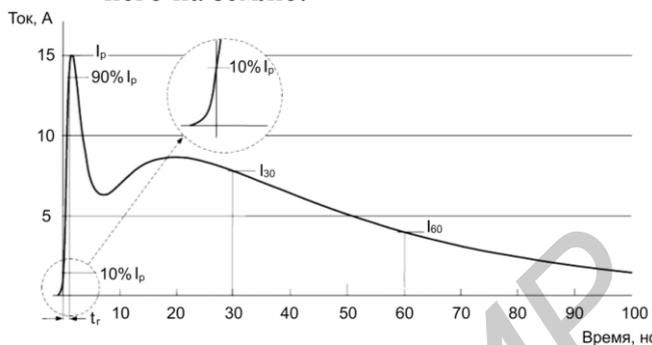
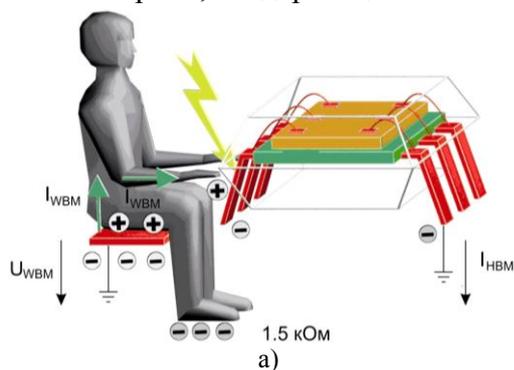


Рис. 1. Основные параметры «модели тела человека»:

а) принцип воздействия; б) форма импульса разряда;

в) схема испытательного имитационного генератора электростатических разрядов со следующими параметрами электронных компонентов:

$R1 = (1500 \pm 1) \text{ Ом}$; $R2$ – безындуктивный 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_{HBM}) и сопротивления (R_{HBM}). В действующем стандарте Республики Беларусь СТБ МЭК 61000-4-2-2006 [11] емкость и сопротивление тела человека соответственно равны $C_{HBM} = 100 \div 2500 \text{ пФ}$ и $R_{HBM} = 80 \div 2000 \text{ Ом}$, что соответствует отдельно

верхности его тела, передается, т.е. разряжается на микроконтроллер и через него на землю.

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 составляет 17 мДж. При проведении испытаний используются специализированные испытательные 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 **наихудшего** случая, так как реальные ЭСР с определенным потенциалом почти всегда слабее, чем в испытательных схемах.

1.2. Машинная модель.

Отличительной особенностью ММ по сравнению с МТЧ является то, что электростатическим зарядом обладает не человек, а другое заряженное устройство или машина. Заряд, накопленный на металлических частях подложки и корпуса, протекает через подложку и вызывает отказы *p-n*-

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].

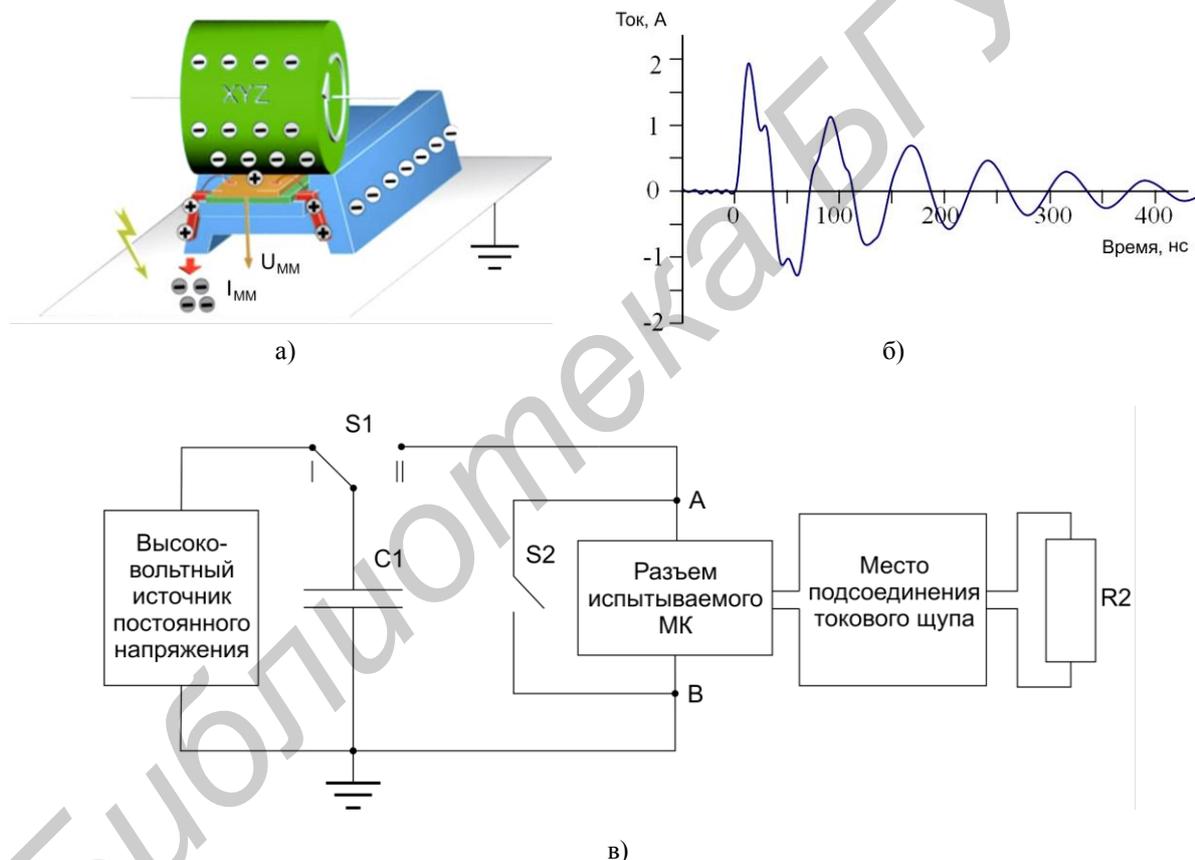


Рис. 2. Основные параметры «машинной модели»:

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 пара-

зитных элементов схемы. Следовательно, повторяемость результатов испыта-

ний по ММ оказывается значительно ниже, чем при использовании МТЧ.

При имитации ЭСР по ММ в эквивалентной схеме основными отличиями, 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 происходит 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].

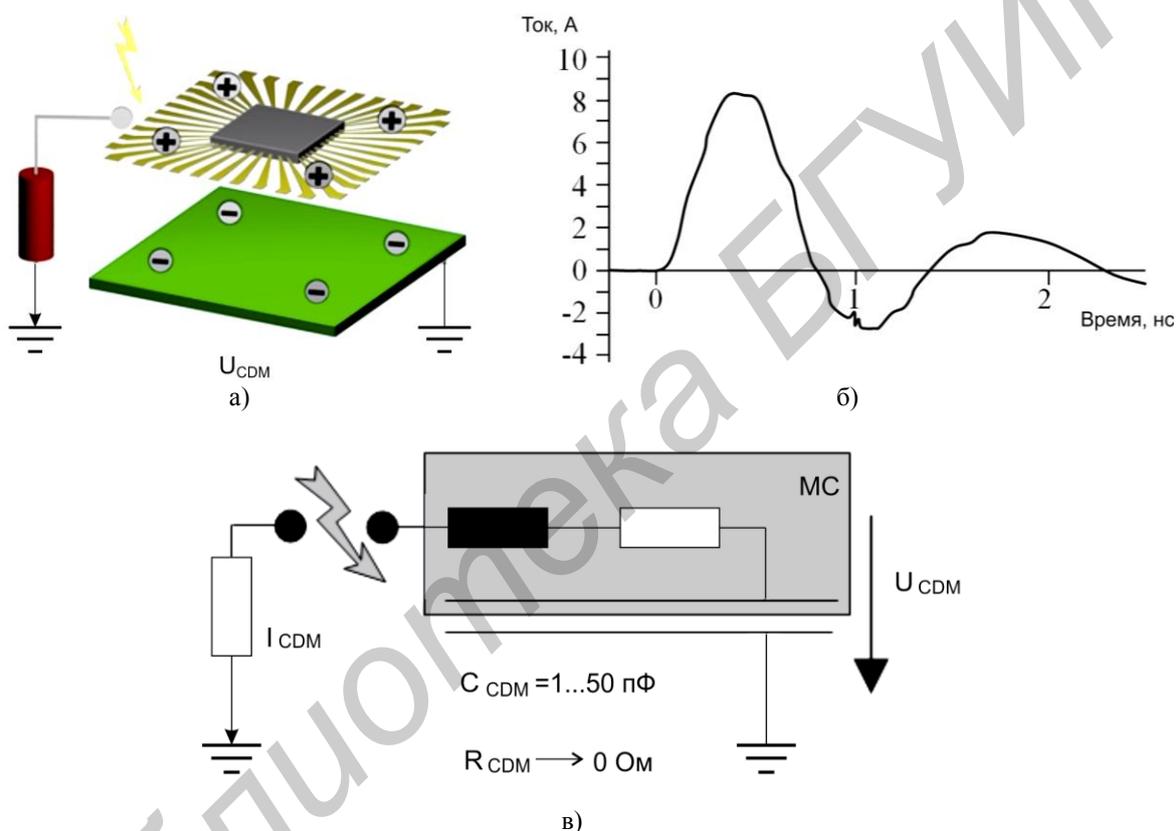


Рис. 3. Основные параметры «модель заряженного прибора»:

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 оксидного слоя [1, 2].

Типичная форма разрядного импульса при проведении испытаний МК на устойчивость к ЭСР по МЗП приве-

дена на рисунке 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, рассеива-

емой 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 рисунка 3, в, кристалл МК и металлическая пластина, на которой лежит МК, образуют своеобразный конденсатор. Ёмкость этого конденсатора зависит от геометрии корпуса МК. Значение данной ёмкости определяет величину 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 функциональное тестирование микроконтроллеров.

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

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



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

В качестве информационных параметров диагностики чаще всего выбирают: неоднородности массива ПО; заряд в ходе переходного процесса в момент смены информации при записи или считывании; времени завершения переходного процесса в момент подачи входного воздействия и окончательной токовой реакции на это воздействие [1].

Контроль неоднородности любого вида заключается в поиске максимального отклонения контролируемого статического временного и зарядового параметра 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. просматривается 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.

В результате проведенного анализа условий влияния ЭСР на МК показано, что параметры воздействующего

разряда статического электричества варьируются в широком диапазоне напряжений, однако закономерности для вышерассмотренных 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 применяемого на сегодняшний день метода функционального тестирования МК на устойчивость к воздействию ЭСР были выявлены существенные недостатки. В случае функционального тестирования МК используется достаточно сложная система поиска и выявления дефектов, а также, применяются принципы диагностики не свойственные анализу повреждений *flash*-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. – Мн.: Бел. наука, 2006. – 295 с.
2. **Кечиев, Л.Н.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества. / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев // М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 352 с.
3. **Хабигер, Э.** Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер ; пер. И.П. Кужекина. Под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
4. **Уильямс, Т** ЭМС для систем и установок // Т. Уильямс, К. Армстронг. – М.: Издательский дом «Технология», 2004. – 508 с.
5. **Gieser, H.A.** ESD testing: HBM to very fast TLP / H. A. Gieser // Tutorial presented at the ISREF. – 2004.

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. **Алексеев, В.Ф.** Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев, Н.И. Силков, Г.А. Пискун, А.Н. Пикулик // 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. **Beh, M.** Analysis of HBM and MM ESD failures in nMOS devices / M. Beh, C. Kang, M. Natarajan, M. K. Radhakrishnan // 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. Часть 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 : Беларус. 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. – № 1-2012. – С.37–39.
13. **Джоввет, Ч.Э.** Статическое электричество в электронике / Ч.Э. Джоввет; пер. В.А. Воротинского, В.А. Каверзнева. – М.: Энергия, 1980. – 135 с.
14. **Шваб, А.** Электромагнитная совместимость / А. Шваб ; пер. В.Д. Мазина и С.А. Спектора, 2-е изд., перераб. и доп.; под ред. И.П. Куженина. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.

Статья сдана в редакцию _____

Пискун Геннадий Адамович, ассистент Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Тел. 8-017-293-22-07

Алексеев Виктор Федорович, канд. техн. наук, доцент Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Тел. 8-017-293-22-07

Piskun Gennady Adamovich, assistant Institution "Belarusian State University of Informatic and Radioelectric" Tel. 8-017-293-22-07

Alekseev Viktor Fedorovich, PhD, Institutions "Belarusian State University of Informatic and Radioelectric" Tel. 8-017-293-22-07