

УДК 621.3.049.77

Г. А. ПИСКУН, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

В. Ф. АЛЕКСЕЕВ, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

А. Н. ПИКУЛИК, инженер испытательного центра Белорусского государственного института стандартизации и сертификации, аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Э. М. ВРАБИЙ, магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИСПЫТАНИЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В статье предложен новый подход к проведению испытаний микропроцессорной техники на устойчивость к воздействию электростатических разрядов. Обоснована целесообразность введения в алгоритм проведения испытаний дополнительной операции, направленной на контроль выполняемых функций посредством анализа записанного во встроенную flash-память микроконтроллера программного кода.

Ключевые слова: микроконтроллер, микропроцессорная техника, программный код, электростатический разряд.

Промышленностью Республики Беларусь выпускается различная микропроцессорная техника (МТ), в состав которой входят современные изделия микроэлектроники – микроконтроллеры (МК), выполняющие функцию управления электронными устройствами. Их обширная номенклатура, обусловленная разнообразными функциональными возможностями, создает разработчикам изделий достаточно хорошие условия для проектирования конкурентоспособной аппаратуры различного

назначения. Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту МТ от внешних воздействий, особенно от такого разрушительного влияния, как электростатический разряд (ЭСР).

В результате анализа ряда проведенных исследований [1] – [6] было установлено, что использование известных методик технической диагностики МТ, построенной на базе МК, после случайного или умышленного воздействия электростатических разрядов нецелесообразно. Это обусловлено спецификой формирования архитектуры полупроводникового кристалла МК и наличием такого встроенного функционального блока, как flash-память, в которой может храниться программный

код любой сложности. Данная особенность значительно усложняет проведение испытаний МТ на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества, поскольку отказы могут происходить не только вследствие повреждения устройства, но и из-за изменения записанного массива данных в памяти МК, анализ повреждения которого в используемых алгоритмах отсутствует.

Учитывая специфику работы МК, основанную на выполнении запрограммированных функций, особое внимание целесообразно уделять безопасности информационного ресурса, а также защите сведений от их случайного или умышленного повреждения. При этом проблема защиты информации является многоплановой комплексной задачей, предполагающей рассмотрение вопросов обеспечения целостности используемого программного кода (защита от сбоев, ведущих к потере информации, а также защита от уничтожения данных).

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ

В Республике Беларусь основополагающим стандартом по проведению испытаний МТ на устойчивость к ЭСР является СТБ IEC 61000-4-2-2011 [7]. В нем установлены требования к устойчивости и методы испытаний электрического, электронного и радиоэлектронного оборудования, подвергаемого ЭСР как при прямом, так и непрямом воздействии от оператора на расположенные вблизи предметы и оборудование. В данном стандарте обозначены испытательные уровни, которые относятся к различным условиям эксплуатации оборудования.

Проведение испытаний МТ на устойчивость к разряду статического электричества необходимо осуществлять в лабораторных условиях. Организованное место, созданное в соответствии с требованиями [7], состоит из испытательного генератора (ИГ), испытательного и вспомогательного



Рисунок 1 – Внешний вид установки для проведения испытаний МТ на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества

оборудования, необходимого для осуществления воздействия прямыми и непрямыми разрядами на испытуемое оборудование (ИО) (рисунок 1).

Организованное место для испытаний состоит из деревянного стола высотой 0,8 м, установленного на эталонную пластину заземления, которая находится на полу и представляет собой медный или алюминиевый металлический лист толщиной не менее 0,25 мм в соответствии с ГОСТ 28195-99 [8].

Упрощенная схема ИГ, имитирующего разряд статического электричества с тела человека (оператора), приведена на рисунке 2 [7], [8].

Основной накопительный конденсатор C_s заряжается от источника высоковольтного напряжения постоянного тока через зарядный резистор R_c и разряжается на ИО через разрядный резистор R_d и разрядный ключ. Разрядный ключ в типичном случае представляет собой вакуумное реле, управляемое оператором.

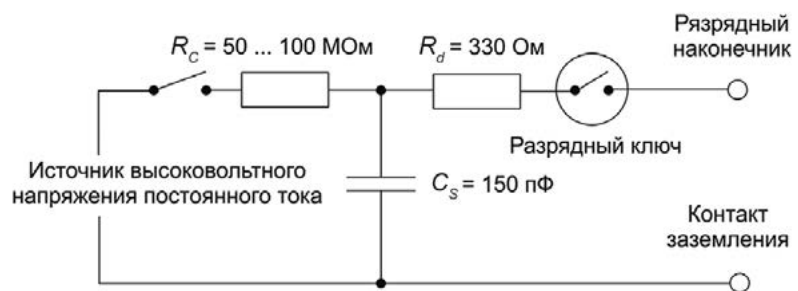


Рисунок 2 – Схема испытательного генератора, имитирующего разряд статического электричества с тела человека (оператора)

Технические характеристики элементов, используемых в схеме установок имитации контактного воздействия разряда по модели тела человека (модель, максимально точно описывающая воздействие ЭСР от оператора), должны строго соответствовать значениям, приведенным в таблице 1 [7].

Таблица 1 – Технические характеристики испытательных генераторов

Технические характеристики	Значение
Накопительная емкость (C_{Σ})	150 пФ ± 10 %
Разрядное сопротивление ($R_{\text{д}}$)	330 Ом ± 10 %
Зарядное сопротивление ($R_{\text{з}}$)	от 50 до 100 МОм
Выходное напряжение	до 15 кВ
Погрешность индикации выходного напряжения	± 5 %
Полярность выходного напряжения	Положительная и отрицательная
Время удержания заряда	Не менее 5 с
Вид разряда	Одиночный разряд (время между последовательными разрядами не менее 1 с)

Полную модель разряда с тела человека (оператора) достаточно сложно воспроизвести на практике, поэтому отечественный [7] и большинство зарубежных стандартов предусматривают только поверхностные RC-компоненты и максимально допустимое время нарастания импульса 20 нс (рисунок 3).

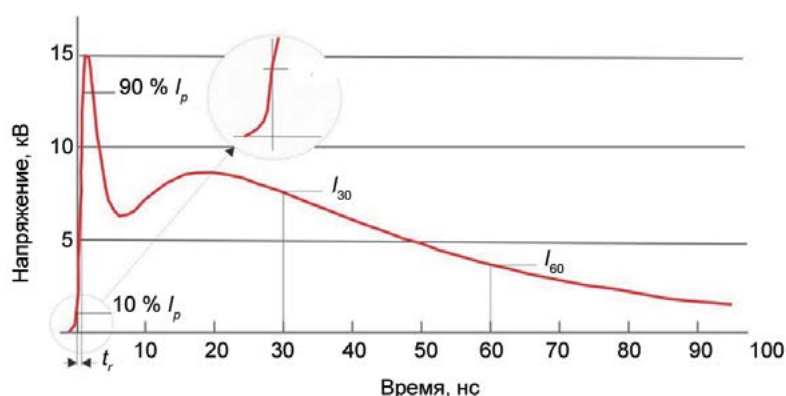


Рисунок 3 – График зависимости разрядного тока от времени, полученного с испытательного генератора, имитирующего разряд статического электричества с тела человека

При проведении испытаний МТ на устойчивость к воздействию разрядом статического электричества наиболее оптимальным является использование испытательных генераторов, которые предназначены для создания нормированных импульсов.

Для осуществления контактного ЭСР испытательный генератор снабжен специальным наконечником разрядного электрода, форма которого представлена на рисунке 4 [7]. Особенность осуществления воздействия заключается в том, что при контактном разряде следует сначала прикоснуться наконечником электрода к точке воздействия, расположенной на МТ, а затем включить (замкнуть) разрядный ключ ИГ.

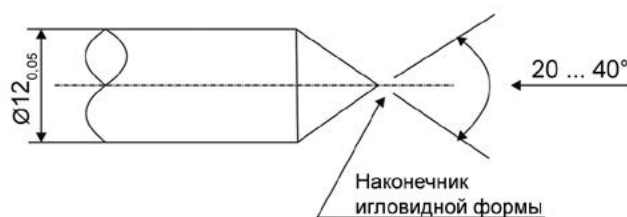


Рисунок 4 – Форма разрядного наконечника испытательного генератора для имитации контактного электростатического разряда

Выполнение обязательных требований при проведении испытаний современной МТ на устойчивость к воздействию разряда статического электричества необходимо соблюдать для адекватной оценки результатов эксперимента.

Разрядный наконечник испытательного генератора для осуществления контактного разряда статического электричества должен располагаться перпендикулярно поверхности МТ, т. к. это позволит улучшить повторяемость результатов испытаний.

В случае проведения испытаний МТ на устойчивость к воздействию ЭСР используются регламентированные значения параметров ИГ или устанавливаются требования к форме тока импульса. Следовательно,

соблюдение требований, заключающихся в необходимости соответствия параметрам действующего разряда, является обязательным при проведении испытаний. В случае несоответствия полученные результаты будут обладать высокой погрешностью, что не позволит добиться необходимой точности проводимых испытаний.

ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЮ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОГРАММНОГО КОДА

Для обеспечения работоспособности МТ, построенной на базе микроконтроллеров со встроенной flash-памятью, необходимо осуществлять контроль целостности записанного программного кода. При этом контроль функциональных свойств МК заключается в анализе качества выполняемых функций, которое напрямую зависит от качества записанного во встроенную flash-память массива данных.

Рассмотрим основные требования к осуществлению контроля изменения программного кода, записанного во встроенную flash-память МК, более подробно.

В соответствии с [8] качество программного кода определяется путем сравнения полученных расчетных значений показателей с соответствующими базовыми значениями показателей существующего аналога или расчетного кода, принимаемого за эталонный образец.

Под эталонным образцом программного кода понимается все или часть программ, процедур, правил и соответствующей документации системы обработки информации, относящихся к функционированию МК.

Учитывая повышенную чувствительность МК с записанным во встроенную flash-память программным кодом к воздействию ЭСР, а также высокую вероятность повреждения кода, особое внимание при диагностике необходимо уделять целостности информации.

В результате анализа ряда работ [9] – [11] под целостностью информации понимается свойство

информации сохранять свою структуру и/или содержание в процессе передачи и хранения. Целостность информации обеспечивается в том случае, если записанные данные не отличаются от данных в исходных документах, т. е. если не произошло их случайного или преднамеренного искажения или разрушения.

Структуру большинства современных МК можно показать как систему взаимосвязанных функциональных блоков (ФБ), т. е. участков кристалла МК, которые организуют его структуру. Задачей того или иного ФБ является строгое выполнение перечня запрограммированных операций, корректность выполнения которых можно контролировать с помощью разработанных специальных тестовых программ (ТП).

Однако постановка и формализация задач по оценке влияния ЭСР на изменение программного кода, записанного во встроенную flash-память МК, значительно осложняется тем обстоятельством, что обычно микроконтроллеры работают под управлением программ, хранящихся в их внутренней энергонезависимой памяти, а для хранения обрабатываемых данных и промежуточных результатов используют внутреннюю оперативную память. Ограниченные возможности доступа к этим ресурсам значительно затрудняют контроль выполнения тестовых программ (ТП), необходимых для функционального тестирования и выявления отказавших блоков современных МК.

Также необходимо учитывать и ряд таких условий допущения для построения модели функциональной диагностики микроконтроллеров со встроенной flash-памятью, как:

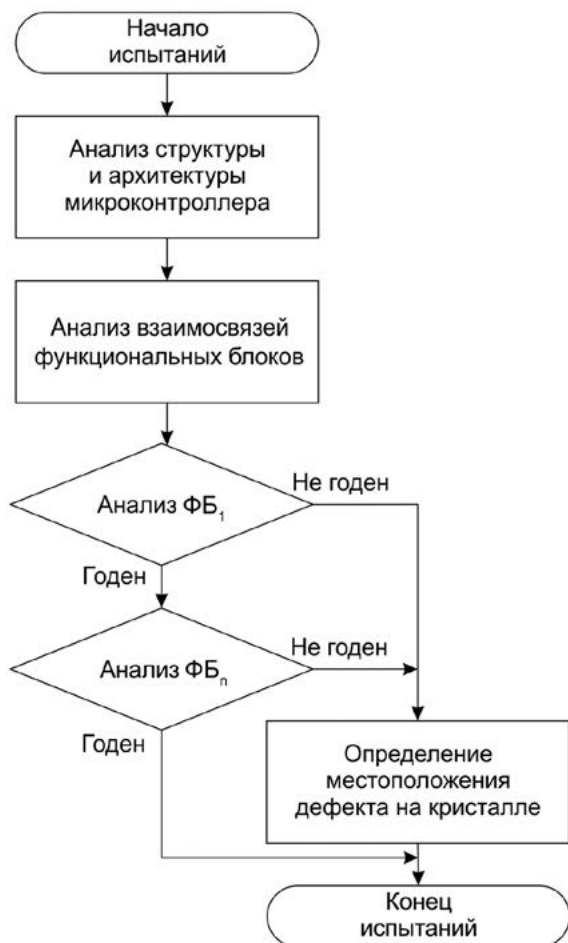
- если хотя бы один ФБ микроконтроллера неработоспособен, то МК считается неработоспособным;
- для всех диагностируемых входов и выходов функциональных блоков микроконтроллера существуют допустимые пределы параметров, при выходе за которые исследуемый МК переходит в состояние неработоспособности и отбраковывается;

– имеется программная возможность осуществления функционального контроля каждого испытуемого ФБ микроконтроллера.

Предложенный алгоритм проведения испытания МК на устойчивость к ЭСР с обязательным анализом целостности программного кода примет следующий вид (рисунок 5).

При решении задачи поиска дефектов строится таблица состояний (ТС) с применением следующих основных положений (таблица 2):

– в качестве наиболее значимых диагностических показателей МК выбираются информационные данные, снятые со всех его контактных выходов;



ФБ₁ – первый функциональный блок микроконтроллера, ФБ_n – n-ый функциональный блок микроконтроллера

Рисунок 5 – Алгоритм тестирования функциональных блоков микроконтроллера после воздействия разрядов статического электричества

– обретенные в результате диагностики информационные данные представляют собой единую систему исследуемого МК.

При составлении ТС целесообразно использовать число столбцов, соответствующих числу прямых диагностических признаков и числу проверок. В каждой строке стоит располагать результаты проверок, соответствующих определенному состоянию МК при недопустимой реакции одного из ФБ.

При этом некорректное выполнение запрограммированных функций, выявленное в процессе работы МК и обусловленное влиянием электростатических разрядов, целесообразно диагностировать с помощью специализированных ТП. Такие программные средства ориентированы под детальную структуру устройства и позволяют выявить дефекты на уровне функционального блока. Результаты выполнения тестирования представляются таблицей состояния функциональных блоков, в которую вносятся значения корректного «1» или некорректного «0» выполнения тестовых программ.

Таблица 2 – Пример таблицы состояния функциональных блоков микроконтроллера

Тестовая программа	Функциональный блок								
	ФБ ₁	ФБ ₂	ФБ ₃	ФБ ₄	ФБ ₅	ФБ ₆	ФБ ₇	...	ФБ _n
ТП ₁	1	0	0	1	1	1	0	...	0
ТП ₂	1	0	1	0	1	0	1	...	0
...
ТП _n
Результат теста	1	0	0	0	1	0	0	...	0

Анализ результатов, полученных за время эксперимента, позволяет сделать заключение о целесообразности проведения процедуры поиска неработоспособного ФБ. Если нарушение работоспособности установлено, то можно построить алгоритм поиска дефектов до конкретного элемента, входящего в состав полупроводникового кристалла МК. Таким образом, алгоритм должен различать каждую пару дефектов, т. е. результаты входящих в алгоритм элементарных проверок

должны быть разными в каждом неработоспособном состоянии.

Анализ состоит в определении минимально возможного количества столбцов, при наложении которых логическая сумма по каждой строке равна единице. Это даст возможность определить минимальную совокупность различающихся проверок, которой достаточно для обнаружения отказавшего или поврежденного ФБ, а также попарно сравнить результаты проверок при всех состояниях испытуемых микроконтроллеров. Результаты сравнения заносят в дополнительную таблицу – таблицу подтверждения (таблица 3), в которой в каждой строке стоит «+», если проверка дала одинаковые результаты, или «-», если проверка дала различные результаты.

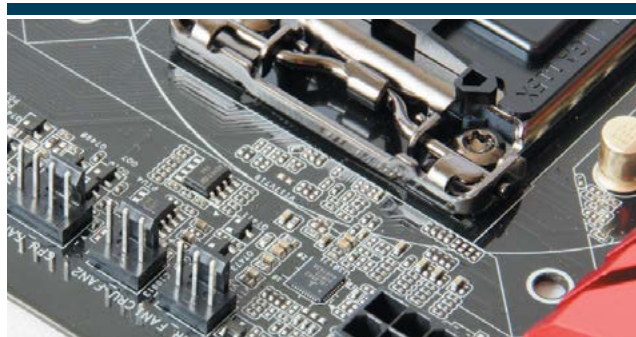
Таблица 3 – Пример таблицы подтверждения

Тестовая программа	Функциональный блок								
	ФБ ₁	ФБ ₂	ФБ ₃	ФБ ₄	ФБ ₅	ФБ ₆	ФБ ₇	...	ФБ _n
ТП ₁	+	-	-	+	+	+	-	...	-
ТП ₂	+	-	+	-	+	-	+	...	-
...
ТП _n
Результат теста	+	-	-	-	+	-	-	...	-

Однако есть проверки, которые кроме очередной последовательной совокупности разрешения имеют различия, дублирующие некоторые результаты предыдущих проверок. В таком случае одна из дублирующих проверок может быть исключена, но только та, которая кроме основной последовательности функций выполняет достаточно полное тестирование других.

Таким образом, алгоритм функционального тестирования с целью поиска дефектов в структуре МК с выявлением определенного поврежденного ФБ имеет следующую последовательность:

- на основании анализа выполняемых функций МК осуществляется построение его уникальной функциональной структуры с конкретным выделением ФБ;



- строится таблица состояния ФБ;
 - проводится анализ таблицы состояния функциональных блоков микроконтроллера и определяется минимальная различающая совокупность результатов состояния ФБ;
 - упорядочивается последовательность выполнения функционального тестирования для каждого функционального блока МК в отдельности;
 - определяются параметры диагностирования и допустимые пределы их изменений;
 - строится алгоритм поиска дефектов на основе результатов проведенного анализа.
- При поиске множественных дефектов процесс дефектации применяется многократно с обязательным промежуточным восстановлением, т. е. после нахождения одного дефекта процесс поиска останавливается и фиксируется или алгоритм тестирования прекращается.

МЕТОДИКА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

На основании вышесказанного, а также учитывая специфику выполняемых МТ специализированных функций, проведение технической диагностики целесообразнее осуществлять по следующему алгоритму (рисунок 6).

Предложенный авторами алгоритм технической диагностики микропроцессорной техники, построенной на базе микроконтроллеров со встроенной flash-памятью, позволяет оптимизировать существующие методики посредством введения обязательного анализа целостности массива данных. Это позволит отследить не только повреждение системы, но и выявить ее отказы.

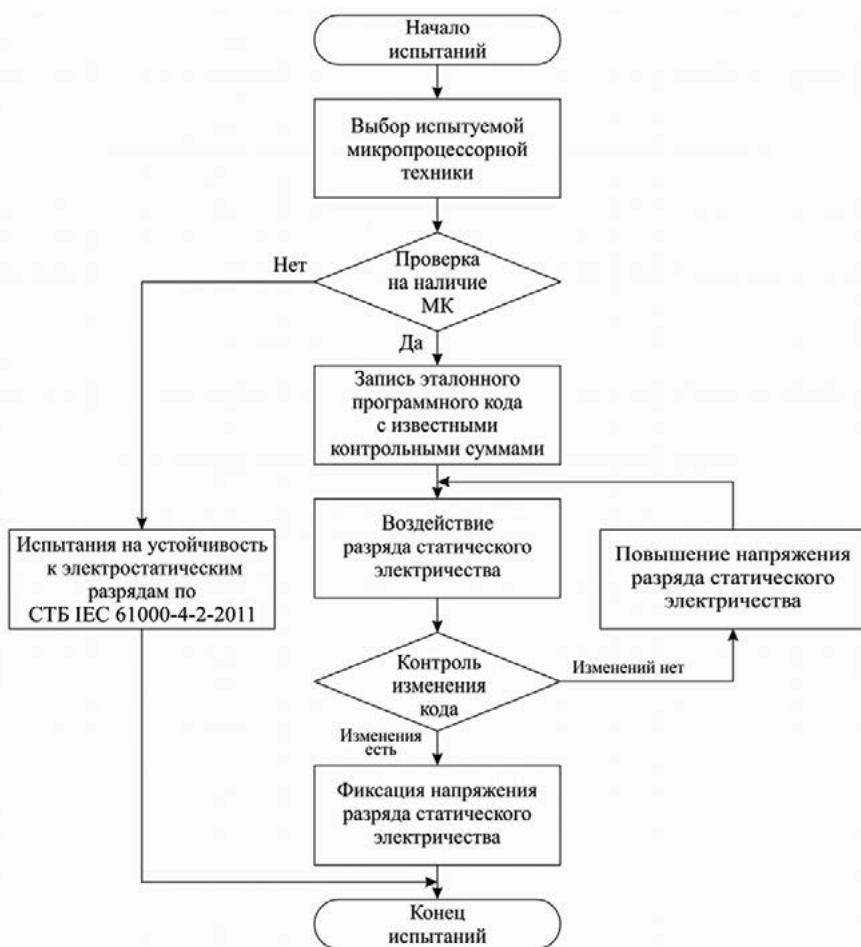


Рисунок 6 – Алгоритм тестирования функциональных блоков микроконтроллера после воздействия разрядов статического электричества

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] 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.
 [2] 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.
 [3] Пискун, Г. А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 12 – 18.
 [4] Алексеев, В. Ф. Влияние разрядов статического электричества на программное обеспечение, установленное во встроенную flash-память микроконтроллеров / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // Радиоэлектроника и информатика. – 2012. – № 3 (58). – С. 8 – 12.
 [5] Пискун, Г. А. Планирование эксперимента по выявлению изменений в программном обеспечении микроконтроллеров с flash-памятью при воздействии электростатического разряда / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев // Известия Гомельского

государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки. – 2013. – № 6 (81). – С. 139–146.
 [6] 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.
 [7] СТБ ИЕС 61000-4-2-2011 Электромагнитная совместимость. Часть 4 – 2. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам.
 [8] ГОСТ 28195-99 «Оценка качества программных средств. Общие положения».
 [9] ГОСТ Р 54593-2011 Информационные технологии. Свободное программное обеспечение. Общие положения.
 [10] ГОСТ Р МЭК 61508-3-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 3. Требования к программному обеспечению.
 [11] ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.
 [12] Портнягин, Н. Н. Теория и методы диагностики судовых электрических средств автоматизации / Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. – 117 с.

SUMMARY

G. A. Piskun, V. F. Alekseev, A. N. Pikulik, E. M. Vrabii

The article proposes a new approach to the testing of microprocessor technology of resistance to electrostatic discharges. There was proved the expediency of the introduction of the test algorithm of further operation aimed at control of the functions performed by analyzing the code, recorded in the built-in flash-memory of the microcontroller.

Поступила в редакцию 12.02.2016