

**МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ ПРИ ОТКАЗАХ,
СВЯЗАННЫХ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Системи високої готовності повинні забезпечувати мінімальний час простою. Вплив розрядів статичної електрики на мікропроцесорну систему високої готовності може викликати відмову. За результатами авторського контролю мікропроцесорних систем, в умовах тривалої безперервної їх експлуатації на більш ніж п'ятистах об'єктах країни, спостерігалась відмова, яка мала ознаки усувної відмови. Експериментально встановлено, що перезавантаження мікроконтролера мікропроцесорної системи по входу скидання гарантовано не виводить його зі стану зависання. Високий ступінь мікромініатюризації компонентів кристала мікроконтролера тягне за собою підвищення чутливості до впливу електростатичних розрядів. Наведено дані щодо відносної чутливості до впливу електростатичних розрядів на напівпровідникові елементи різних структур під впливом статичної електрики на базові елементи структури мікроконтролера. У лабораторних умовах проведено моделювання аналогічних відмов мікропроцесорних плат друкованого монтажу систем при впливі електростатичних розрядів, що створюються штучно. Для моделювання впливу розрядів на електронні компоненти передбачалося використання моделі тіла людини, машинної моделі та моделі з зарядженим приладом при повітряному і контактному розрядах. У лабораторних умовах ефект зависання мікроконтролера проявився як при контактному, так і при повітряному розряді в рамках перших двох моделей. За результатами моделювання був запропонований метод відновлення працездатності систем шляхом перезавантаження щодо живлення в автоматичному режимі. Ефективність цього методу підтверджена результатами експлуатації близько п'ятисот систем, в яких відновлення працездатності після зависання внаслідок впливу електростатичних розрядів, що не перевищують поріг руйнування, виконувалося автоматично.

Ключові слова: мікроконтролер, електростатичний розряд, пошкодження, працездатний стан, усувна відмова.

Аннотация. Системы высокой готовности должны обеспечивать минимальное время простоя. Воздействие разрядов статического электричества на микропроцессорную систему высокой готовности может вызвать отказ. По результатам авторского контроля микропроцессорных систем, в условиях длительной непрерывной их эксплуатации на более чем пятистах объектах страны, наблюдался отказ, который имел признаки устранимого отказа. Экспериментально установлено, что перезагрузка микроконтроллера микропроцессорной системы по входу сброса гарантированно не выводит его из состояния зависания. Высокая степень микроминиатюризации компонентов кристалла микроконтроллера влечет за собой повышение чувствительности к воздействию электростатических разрядов. Приведены данные по относительной чувствительности к воздействию электростатических разрядов на полупроводниковые элементы различных структур под влиянием статического электричества на базовые элементы структуры микроконтроллера. В лабораторных условиях проведено моделирование аналогичных отказов микропроцессорных плат печатного монтажа систем при воздействии электростатических разрядов, создаваемых искусственно. Для моделирования воздействия разрядов на электронные компоненты предполагалось использование модели тела человека, машинной модели и модели с заряженным прибором при воздушном и контактном разрядах. В лабораторных условиях эффект зависания микроконтроллера проявился как при контактном, так и при воздушном разряде в рамках первых двух моделей. По результатам моделирования был предложен метод восстановления работоспособности систем путем перезагрузки по питанию в автоматическом режиме. Эффективность этого метода подтверждена результатами эксплуатации около пятиста систем, в которых восстановление работоспособности после зависания вследствие воздействия электростатических разрядов, не превышающих порог разрушения, выполнялось автоматически.

Ключевые слова: микроконтроллер, электростатический разряд, повреждение, работоспособное состояние, устранимый отказ.

Abstract. *Systems of high availability should provide minimal downtime. The impact of electrostatic discharges on a microprocessor system of high availability can cause a failure. According to the results of the author's control of microprocessor systems, in the conditions of their long-term continuous operation at more than five hundred objects of the country, there was a failure, which had signs of an avoidable failure. It was established experimentally that restarting the microcontroller of the microprocessor system on the reset input is guaranteed not to take it out of the hang state. The high degree of microminiaturization of the components of the microcontroller crystal entails an increase in sensitivity to the effects of electrostatic discharges. The data on the relative sensitivity to the effects of electrostatic discharges on the semiconductor elements of various structures, on the effect of static electricity on the basic elements of the structure of the microcontroller were given. In the laboratory, it was simulated equal failures of microprocessor-based printed circuits board systems under the impact of electrostatic discharges created artificially. To simulate the effects of discharges on electronic components, it was supposed to use a human body model, a machine model, and a model with a charged device for air and contact discharges. Under laboratory conditions, the microcontroller hang-up effect manifested itself in both contact and air discharges, in the framework of the first two models. According to the simulation results, a method was proposed for restoring systems to work by restarting the power in automatic mode. The effectiveness of this method is confirmed by the results of operation of about five hundred systems in which the restoration of working capacity after exposure to a hang-up due to electrostatic discharges not exceeding the damage threshold was performed automatically.*

Keywords: *microcontroller, electrostatic discharge, damage, operational condition, avoidable failure.*

1. Вступление

Системы высокой готовности широко применяются в различных сферах инфраструктуры страны: в военной сфере, промышленности, сельском хозяйстве, в сфере услуг и обслуживания и др.

В составе этих систем используются устройства, реализованные на базе специализированных микропроцессоров – микроконтроллеров: сетевые коммутаторы, системы охранно-пожарной сигнализации, устройства лифтовой электроники, устройства сбора и передачи экологической информации, а также другие устройства коммуникационной инфраструктуры.

В ряду требований к электронной базе этих систем одним из важнейших является требование сохранения работоспособности микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов в процессе эксплуатации этих систем. Воздействие электростатики приводит к накоплению повреждений в микроконтроллерах и их обранию, которые могут служить причиной возникновения отказов объекта.

По результатам авторского контроля за микропроцессорными системами, которые в установленном порядке прошли государственную сертификацию, согласование и утверждение технических условий Украины [1], в условиях длительной непрерывной их эксплуатации на более чем пятистах объектах промышленности, предприятий и учреждений страны, наблюдался отказ, который имеет признаки устранимого однократного отказа (сбоя), а также перемежающегося отказа [2].

Этот отказ возникает при воздействии электростатических разрядов (ЭСР) на микропроцессорные узлы систем. Разработан метод, позволяющий восстановить работоспособность систем при этом отказе. Известные исследования, рассмотренные ниже, послужили базой обоснования состоятельности предложенного метода, его научной новизны.

2. Состояние вопроса

Широкая область применения микропроцессорной техники, созданной на основе микроконтроллеров (МК), которые имеют повышенную чувствительность к воздействию ЭСР, ставит задачу анализа механизма возникновения отказов, дефектов и повреждений в микропроцессорных системах на одно из первых мест [3].

Подавляющее большинство современных МК изготавливаются по КМОП-технологии. Ранее, например, подсемейства 51 и 52 семейства MCS-51 по МОП-технологии. Отрицательное влияние ЭСР в первую очередь сказывается на КМОП-ИС и МОП-ИС. Биполярные приборы также чувствительны к воздействию ЭСР.

В табл. 1 приведена относительная чувствительность различных типов интегральных схем (ИС) к воздействию ЭСР [4].

Таблица 1 – Относительная чувствительность различных типов ИС к воздействию ЭСР

Тип ИС	Относительная чувствительность к воздействию ЭСР
Стандартная транзисторно-транзисторная логика – ТТЛ ИС	1,0
Линейные ИС	1,3
Цифровые ИС	1,8
ТТЛ ИС с диодом Шоттки	3,0
МОП ИС. Содержит n- (или p-) каналные полевые транзисторы структуры МОП (металл-оксид-полупроводник) на кристалле	3,0
КМОП ИС. Комплементарная МОП-структура (КМОП) содержит как n-, так и p- каналные полевые транзисторы в одной локации кристалла	4,6

Вопросы классификации основных механизмов повреждения современных типов МК вследствие воздействия ЭСР, систематизация ЭСР по типу воздействия и механизму влияния на оборудование, классификация градаций разрядов по степени повреждения, выявление областей разрушения впервые приведены в [5]. В работе отмечается, что общепринято существование шести наиболее распространенных и связанных с ЭСР механизмов повреждения ИС: тепловой вторичной пробой, расплавление металлизации, объемный пробой, пробой диэлектрика, поверхностный пробой и газовый дуговой разряд.

Принципиальными являются следующие положения работы:

– электрические заряды, накапливаясь в определенной электрической емкости, создают электрический потенциал. Наличие и накопление электростатического заряда в изделии не ведет, как правило, к его повреждению до тех пор, пока не произойдет ЭСР;

– актуальным является предупреждение возникновения самого ЭСР. Если предотвратить разряд не удалось, то имеет место наличие ряда повреждений структуры микросхемы, которые могут приводить к отказу.

Базовый принцип защиты интегральных микросхем (ИМС) плат печатного монтажа (ППМ), которые являются основным типовым элементом микропроцессорной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от воздействия ЭСР, состоит в следующем: на выводах ИМС устанавливается двухполярный ключ, который срабатывает при воздействии ЭСР. При этом ток разряда отводится на шину питания или «земли». В ИМС в качестве таких шунтов применяются различные элементы: диоды, КМОП-транзисторы и более сложные схемы комплексной защиты кристалла от ЭСР с двумя парами питания: аналоговой и цифровой. Таким образом, обеспечивается защита от ЭСР кристалла в целом [6].

Новый метод защиты установленных на ППМ ИМС от ЭСР приведен в диссертационной работе [7]. В этой работе обосновано применение в ППМ слабо проводящих диэлек-

трических композитных радиоматериалов, что обеспечивает перераспределение накопленного заряда, выравнивание электростатических потенциалов и предотвращение возникновения ЭСР на ППМ.

Характерной особенностью структуры интегральной схемы микроконтроллера (МК) является объединение в пределах одного полупроводникового кристалла таких функциональных блоков микропроцессорной управляющей системы, как центральный процессор, раздельная память программ и память данных, периферийных устройств ввода/вывода информации. Высокая степень микроминиатюризации компонентов кристалла МК влечет за собой повышение чувствительности к воздействию ЭСР, в связи с чем особое значение приобретает проблема обеспечения устойчивости функциональных характеристик МК к воздействию ЭСР.

Перспективными исследованиями, направленными на решение данной проблемы, являются изыскания в области определения критических (пороговых) значений напряжений воздействующих ЭСР [8].

Количественно доминирующими элементами МК, использующими КМОП и МОП структуры, являются флэш-память, память данных – DRAM (SRAM), EEPROM, регистровая память. Это усложняет обеспечение устойчивости МК к воздействию ЭСР, так как отказы могут происходить не только в связи с повреждениями полупроводникового кристалла, но и в части программного обеспечения (ПО) МК. В работах [3, 8] исследованы повреждения постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) в части ПО, установленного во флэш-память МК. Объектом исследования являлся микроконтроллер AT89C51. На примере этого МОП-ИС МК подсемейства 51, для которого критическое значение [9] ЭСР составляет 6,5 кВ, установлено:

– при напряжении воздействующего ЭСР, эквивалентном 6,3 кВ (меньше критического на 3%), в установленном во встроенную флэш-память ПО ошибки возникают у примерно 8% МК;

– при напряжении воздействующего ЭСР, эквивалентном 6,4 кВ (меньше критического на 1,6%), в установленном во встроенную флэш-память ПО ошибки возникают у примерно 95% МК, что составляет, по мнению авторов, научную новизну полученных результатов.

3. Постановка задачи

В приведенных выше исследованиях по воздействию ЭСР на ИС, в том числе и ИС микроконтроллеров, не рассматривается вопрос воздействия ЭСР на микроконтроллер в процессе непрерывной длительной работы.

Так, например, МК AT89S8253 структуры КМОП-ИС содержит 12 кбайт флэш-памяти, 2 Кбайта EEPROM, 256 байт ОЗУ, 32 регистра общего назначения, 22 регистра специальных функций [10]. Отказы, вызванные различными причинами, в такой компьютерной системе неизбежны. В этой связи в состав МК введен сторожевой таймер, который служит для предотвращения зависаний МК при выполнении программы.

Работа микроконтроллера AT89S8253 при наличии зависаний, вызванных воздействием ЭСР, а также с точки зрения эффективности сторожевого таймера, наблюдалась в рамках авторского контроля примерно на 300 лифтовых микропроцессорных системах, в 200 охранно-пожарных стационарных и мобильных микропроцессорных GSM-системах.

В течение первых трех лет эксплуатации систем специалистами, которые осуществляли техническое обслуживание лифтов, отмечались многочисленные случаи зависания систем. Однозначно были обнаружены следы воздействия ЭСР на платы, которые предъявлялись разработчику. Из находившихся в эксплуатации трехсот систем с индивидуальными заводскими номерами ежемесячно сообщалось о зависании около 10 систем. Часть систем перезапускалась на «месте» путем выключения – включения питания системы,

часть снималась и направлялась разработчику с требованием устранения сложившейся ситуации. В целом примерно на 100 системах в год отмечалась эта ситуация.

Как правило, микроконтроллеры AT89S8253 ППМ сохраняли работоспособность. Сбоев кодов программы встроенной флэш-памяти в МК обнаружено не было. Следовательно, следуя выводам работ [3, 8], эквивалентное напряжение ЭСР, действовавшее на МК, было меньше критического. Из табл. 1 (относительная чувствительность различных типов ИС к воздействию ЭСР) можно принять чувствительность КМОП ИС в 1,5 раза выше чувствительности МОП ИС. Для КМОП ИС критическое значение ЭСР, аппроксимируя результаты работ [3, 8], можно принять равным 4,3 кВ. Также можно сделать вывод, что отсутствие искажения машинных кодов говорит о величине действовавшего напряжения ЭСР не более 4 кВ.

Задачей данного исследования является моделирование в лабораторных условиях аналогичных отказов ППМ с микроконтроллерами при воздействии ЭСР, создаваемых искусственно, а также поиск метода устранения данных отказов без вмешательства человека-оператора.

Для изучения ситуации с зависаниями МК были проведены испытания воздействия ЭСР на МК систем в лабораторных условиях.

4. Обоснование методики воздействия ЭСР на ППМ с МК в лабораторных условиях

Для моделирования воздействия разрядов на электронные компоненты и определения реальных порогов устойчивости полупроводниковых устройств в электронной промышленности, в зависимости от назначения конечного оборудования, используют модель тела человека (Human Body Model), машинную модель (Machine Model) и модель с заряженным прибором (Charged Device Model) [11–13]. Эти модели характеризуются величиной потенциала статического электричества (СЭ), запасенной энергией СЭ, током и временем его воздействия на полупроводник. При моделировании воздействия ЭСР на изделие применяется как контактный разряд, так и воздушный, либо испытываемый прибор заряжается непосредственно трибоэлектричеством или через внешнее электрическое поле.

Модель тела человека описана в справочнике «MIL-STD-883D. Метод 3015.7 Классификация чувствительности к ЭСР»: $C1=100$ пФ (емкость тела человека) и $R2=1500$ Ом (сопротивление кожи человека), экспоненциально затухающий участок импульса тока равен при этом $\tau=R2 \times C1=150$ нс. Типовые параметры схемы модели тела человека: $V_{ЭСР}=2000$ В, $C1=100$ пФ, $R2=1500$ Ом, Паразитные элементы схемы представлены индуктивностью LS , емкостью CS и емкостью тестовой платы Ct ; их типовые параметры: $LS=7,5$ мкГн, $CS=1$ пФ и $Ct=10$ пФ. Величина запасенной энергии СЭ в этой модели $W_{ЭСР} \approx (C1 \times V_{ЭСР}^2)/2=4 \times 10^{-4}$ Дж.

Машинная модель учитывает накопление электростатического заряда на металлических поверхностях. При ее построении используют электрическую схему тела человека без сопротивления ($R2=0$) или с достаточно малым сопротивлением (5 Ом), но с большей емкостью ($C1=200$ пФ), то есть прямой разряд на выводы ИС. Потенциально опасный уровень напряжения при этом составляет 1/5 или 1/20 от напряжения, при котором не происходит нарушений для испытаний по модели тела человека. Электростатический разряд при этом лимитируется паразитной индуктивностью 0,5–2,5 мкГн. Величина запасенной энергии СЭ в этой модели $W_{ЭСР} \approx 10^{-3}$ Дж, $V_{ЭСР}$ 2–4.

Модель с заряженным прибором предполагает, что испытываемый прибор заряжается непосредственно трибоэлектричеством либо через внешнее электрическое поле. Далее каждый вывод прибора разряжается до нулевого потенциала. Это приводит к тому, что заряд, накопленный на подложке и других проводящих материалах прибора, будет очень быстро перемещен. Разряд будет мгновенным из-за почти нулевого сопротивления прибора (1 Ом) и малой индуктивности (1 нГн).

Приведенные выше известные модели и их модификации учитывают четыре вида воздействия ЭСР на полупроводниковые изделия (контактный, воздушный разряд, трибоэлектрический заряд, заряд в электрическом поле); при значениях $W_{ЭСР} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ Дж, $V_{ЭСР} \approx (2-4)$ кВ. Время импульсов ЭСР в этих моделях изменяется от единиц наносекунд до десятков миллисекунд.

Микропроцессорные системы, являющиеся предметом исследования настоящей статьи, находились в условиях длительной и непрерывной эксплуатации на более чем пятистах объектах промышленности, предприятий и учреждений страны:

- в лифтах жилых и административных домов различных климатических зон Украины (Крым, Донбасс, города центральных областей). Заземление электроаппаратуры зданий осуществлялось в грунтах различной электропроводности или отсутствовало. ППМ этих лифтовых устройств подвергались воздействию десятков тысяч человек с самым разнообразным характером электростатического заряда и характером попыток саботажа работы устройств. Следует также отметить ежегодные весенние обострения электростатических воздействий;

- в автотранспорте. Корпуса машин накапливают электрический заряд, не стекающий на землю;

- в устройствах охранно-пожарной сигнализации, расположенных как внутри зданий, так и на открытых пространствах. Шлейфы датчиков устройств охранно-пожарной сигнализации особенно подвержены воздействию атмосферного электричества.

Отмеченные условия эксплуатации этих систем дают основания полагать наличие воздействия на них ЭСР всех видов.

В лабораторных условиях предварительные результаты, которые могут служить основой для принятия решения по методу устранения зависаний микропроцессорного устройства, с незначительными затратами по испытательному оборудованию, было решено получить в рамках машинной модели и модели тела человека.

В случае необходимости предполагалось подвергнуть микропроцессорные устройства воздействию как трибоэлектричества, так и внешнего электрического поля.

5. Результаты воздействия контактного и воздушного ЭСР на ППМ с МК в лабораторных условиях

При воздействии ЭСР на микроконтроллер AT89S8253 ППМ изделия в лабораторных условиях эффект зависания микроконтроллера проявился как при контактном, так и при воздушном разряде. В качестве источников высокого напряжения, которые стабильно давали эффект «зависания» микропроцессоров, использовались пьезоэлементы и конденсаторы, заряжавшиеся до напряжения от 300 вольт (емкость 10 мкФ) до нескольких киловольт (емкость 100–200 пФ). Конденсаторы использовались для контактного разряда. Воздушный разряд формировался с использованием пьезоэлемента. Величина пробойного напряжения оценочно составляла несколько киловольт с учетом пробивного напряжения воздуха при влажности 30–70 %. Точные значения пробивного напряжения воздушного разряда и напряжения контактного пробоя не представляли интереса, поскольку зависание формировалось в большинстве случаев воздействия, а микропроцессоры сохраняли работоспособность.

Известным способом вывода работоспособного микропроцессора из состояния зависания является его внешний перезапуск по входу «Reset». На рынке представлено множество микросхем внешних сторожевых таймеров: Maxim MAX6751, Texas Instruments TPS3126, Analog Devices ADM699, ADM6316 и др. В целом их работа программным обеспечением не контролируется, поэтому сбой микропроцессора повлиять на работу внешнего сторожевого таймера никак не может.

Попытки перезапуска зависшего микропроцессора AT89S8253 при вышеописанных лабораторных испытаниях производились «вручную» подачей соответствующего логического потенциала на вход RST. В большинстве случаев эта операция не приводила к перезапуску микропроцессора. Отметим также, что вышеописанным лабораторным испытаниям подвергались микросхемы, отстоявшие на объектах в составе ППМ изделия многие месяцы. Их можно идентифицировать как работоспособные, но «побитые» микросхемы. Отметим также, что целью данного исследования являлось не исследование развития повреждений в микросхемах под воздействием ЭСР, а восстановление работоспособности поврежденных микросхем путем вывода их из состояния «зависания». В ходе этих испытаний было установлено, что перезапуск микросхем гарантированно осуществлялся путем однократного или многократного снятия напряжения питания микросхем ППМ изделия. Было предположение, что доработка программного и схемного решений изделия, обеспечивающих однократное или многократное снятие/подачу питания, без вмешательства человека-оператора, обеспечит восстановление работоспособности микропроцессоров изделия как наиболее уязвимых элементов ППМ.

Таким образом, была сформулирована цель научно-технического исследования, результаты которого изложены в настоящей статье и заключалась в повышении отказоустойчивости, помехоустойчивости изделия за счет восстановления работоспособности при его зависании без участия человека и снижения уровня воздействия ЭСР на МК ППМ.

Для достижения поставленной цели была решена техническая задача, состоящая в разработке метода перезапуска изделия путем сброса по питанию, аппаратная часть которого нечувствительна к воздействию электростатики, при минимальном объеме программно-аппаратных затрат, без вмешательства человека.

6. Реализация метода повышения помехоустойчивости

Основные программные и аппаратные компоненты метода рассмотрим на примере системы [1].

Фрагмент программы на языке ассемблера ASM51, относящийся к сущности метода, представлен ниже. В процессе циклического выполнения программы (от метки RESTART до END) выполняются сбор и обработка информации с датчиков, формирование управляющих сигналов. Цикличность процедуры по времени составляет 5,12 мс, на метку L02 управление при нормальном функционировании микроконтроллера AT89S8253 передается через интервал времени не менее 5,12 мс после предыдущего входа. При этом порт P2.3 формирует меандр с таким же периодом. При «зависании» микроконтроллера сигнал на выходе порта P2.3 находится в состоянии логического «0» или «1».

Фрагмент программы, ассемблер ASM51:

LJMP START ;	Передача управления на программу после начального сброса микроконтроллера, метка START
.....	
TBTIMER:DB 000H ; 00	... Используемая таблица TBTIMER ...
DB 000H ; 01	
.....	
DB 000H ; 9F	
DB 0FFH ; A0	Значения кодов регистра TH1= {00,01,,,9F,A0...FF} hex
DB 0FFH ; A1	000H, 0FFH – признаки кода регистра
.....	Значения кода A0, A1 (hex код) соответствуют времени счета таймера более 5120 mks.
DB 0FFH ; FF	
START: MOV R0,#0FFH ;	Очистка 256 байт
L01: MOV @R0,#000H ;	ОЗУ микроконтроллера

```

        DJNZ R0,L01      ;           AT89S8253
        MOV  TMOD,#000H ; Начальные установки таймера : 13-разр.таймер. f BQ/12=1 МГц.
RESTART: MOV  A, TH1    ; Загрузка в аккумулятор кода регистра TH1
        MOV  DPTR,#TBTIMER ; Анализ значения кода по таблице TBTIMER
        MOVC A,@A+DPTR  ; Если признак кода = 000H, то возврат на метку RESTART
        JZ   RESTART    ; Если признак кода = 0FFH, то переход на метку L02
        CPL  P0.0       ; Инверсия контрольного LED состояния порта P0.0.
        MOV  TH1,#000H  ; Очистка регистра TH1 таймера
        MOV  TL1,#000H  ; Очистка регистра TL1 таймера
        .....
        CPL  P2.3      ; Инверсия бита порта P2.3. Формируется меандр с
                        ; «плавающим» периодом от 5,12 мс и более
        XXX  XXXXX     ; Выполнение команд
        .....        ; программы сбора, обработки и
        XXX  XXXXX     ; передачи информации
        LJMP RESTART   ; завершение цикла программы, переход на метку RESTART
        END

```

Взаимосвязь основных аппаратурных компонент метода представлена на рис.1. Временные диаграммы устройства **Watch Dog Supervisor** представлены на рис. 2 – рис. 5.

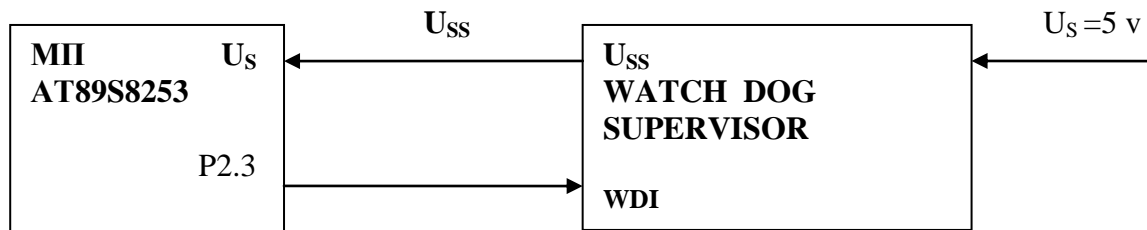


Рисунок 1 – Основные аппаратурные компоненты метода

WATCH DOG SUPERVISOR – внешний по отношению к МП сторожевой таймер напряжения питания МП; WDI – вход супервизора; U_{SS} – напряжение питания МП AT89S8253; P2.3 – выход порта, формирующего меандр с «плавающим» периодом от 5,12 мс и более. Подключение супервизора к микропроцессору показано на рис. 2.

Принципиальным является то обстоятельство, что электрорадиоэлементы супервизора типа резистора, емкости, полевого транзистора типа IRLR024 и кремниевых транзисторов устойчивы к воздействию ЭСР. Влияние на них ЭСР не наблюдалось при ЭСР, не превышающих их порог разрушения, в течение всего срока службы.

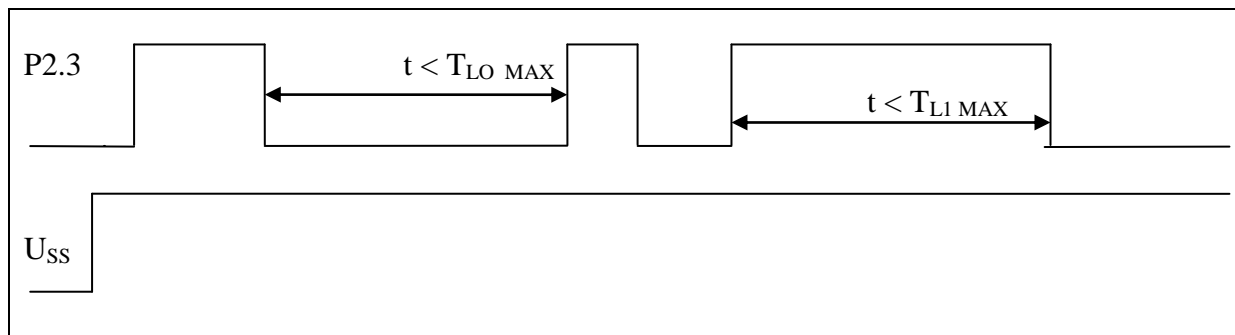


Рисунок 2 – Временная диаграмма № 1. $T_{LO\ MAX}$ – максимальное время «0» меандра P2.3; $T_{LI\ MAX}$ – максимальное время «1» меандра P2.3

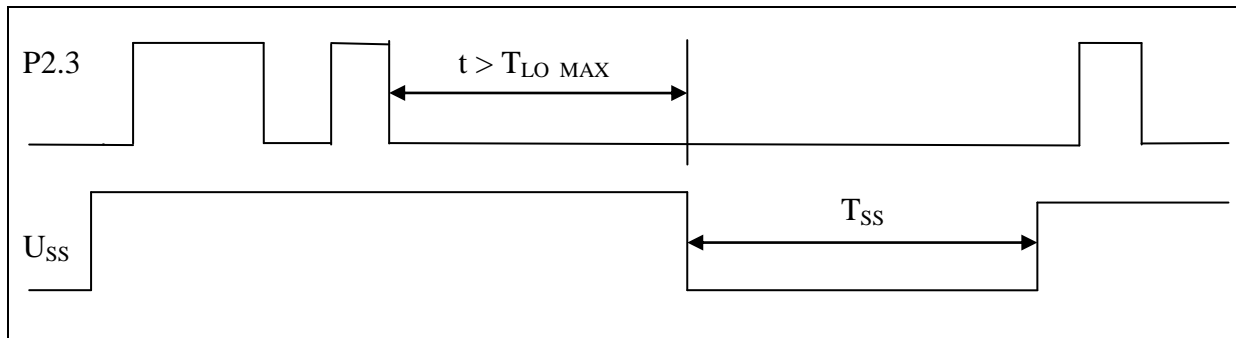


Рисунок 3 – Временная диаграмма № 2. Порт P2.3 меандра завис в «0».
 T_{SS} – время отключения супервизором питания МП при перезапуске

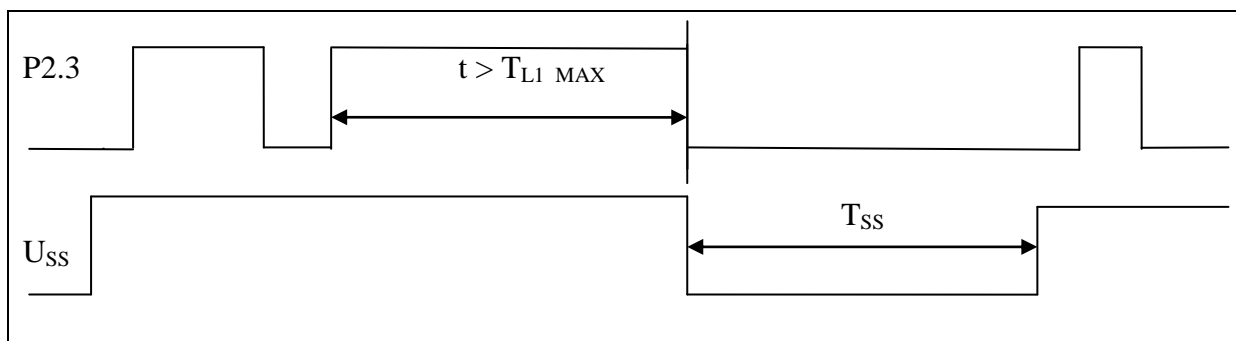


Рисунок 4 – Временная диаграмма № 3. Порт P2.3 меандра завис в «1».
 T_{SS} – время отключения супервизором питания МП при перезапуске

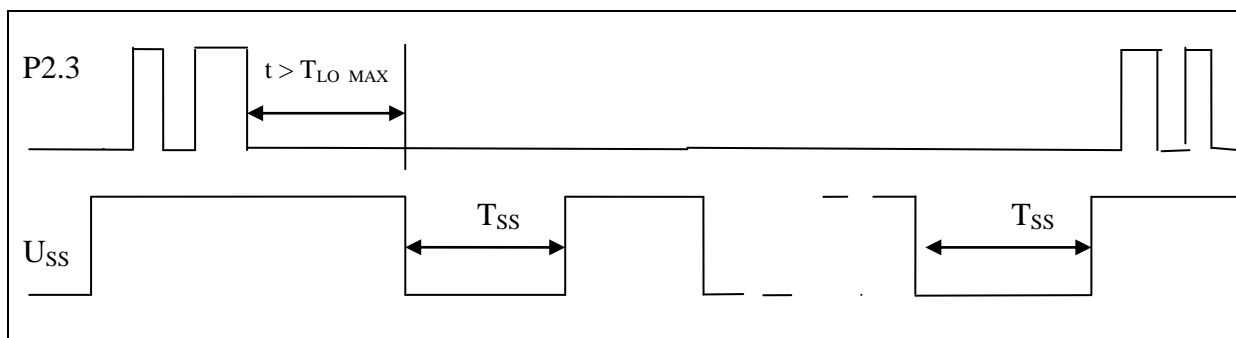


Рисунок 5 – Временная диаграмма № 4. Порт P2.3 меандра завис в «0».
 T_{SS} – время при многократном отключении супервизором питания МП до успешного перезапуска

Рассмотренный выше программно-аппаратный метод в подавляющем большинстве случаев отказа, связанного с воздействием ЭСР, обеспечивает восстановление работоспособности микропроцессорной платы. Так, если из находившихся в эксплуатации трехсот систем до внедрения автоматического перезапуска по рассмотренному методу перезапуска ежемесячно сообщалось о зависании около 10 систем, то после его внедрения подобные отказы полностью исчезли.

Обратимся к блок-схеме микроконтроллера, представленной на рис. 6.

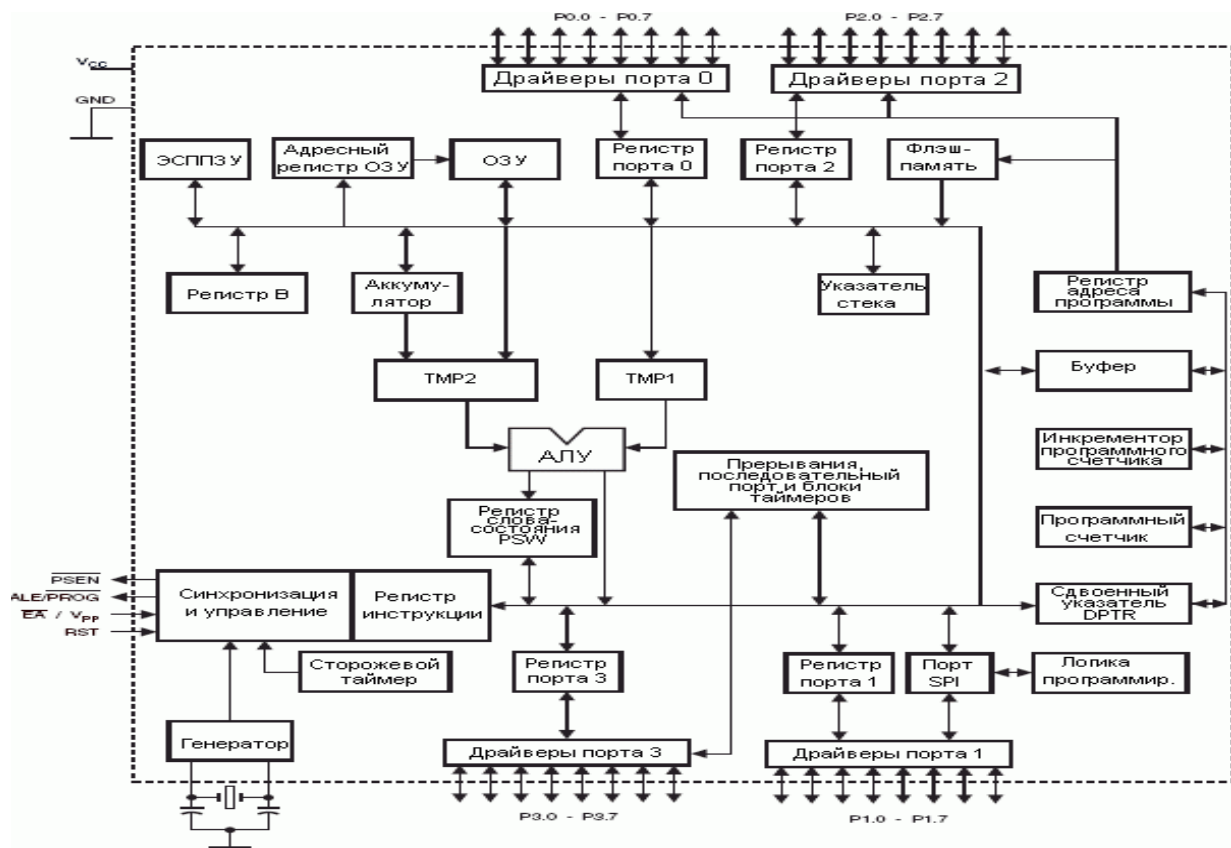


Рисунок 6 – Блок-схема микроконтроллера AT89S8253

Относительно возможных причин зависаний при воздействии ЭСР на микропроцессорную плату.

При замене рабочей программы МК на программу, представленную ниже:

```

LJMP RESTART ; Передача управления на программу после начального сброса

RESTART: CPL P0.0 ; Инверсия контрольного LED состояния порта P0.0.
NOP ; Число NOP команд формирует задержку около 50 мкс
NOP ;
.....
NOP ;
LJMP RESTART ; завершение цикла программы, переход на метку RESTART

END,

```

зависания этой программы, выражающиеся в прекращении инверсии свечения контрольного LED порта P0.0, также наблюдались. Визуально факт зависания фиксировался по прекращению инверсии свечения контрольного LED порта P0.0. Несанкционированного изменения флеш-памяти программ микроконтроллера у микросхем, давших эффект зависания, при контроле флеш-памяти программ на программаторе, зафиксировано не было.

На взгляд автора, в этом случае повреждение вследствие воздействия ЭСР возникает или (и) в блоках синхронизации и управления, регистра инструкции, сдвоенного указателя DPTR, программного счетчика, инкрементатора программного счетчика. Это обстоятельство позволяет сделать заключение, что программные методы дублирования информации в регистрах общего назначения или методы предотвращения закликиваний при использовании регистров общего назначения и регистров специальных функций могут не дать желаемого результата.

Отметим также, что информация о воздействии ЭСР на микроконтроллеры ППМ радиоэлектронной аппаратуры в таком объеме и столь длительное время, как показывает анализ научно-технической литературы, изученной автором, отсутствует. Резюмируя воздействие ЭСР на МК, можно отметить, что повреждения МК в своей массе возникают постепенно, усиливаясь в процессе эксплуатации. Могли быть МК, которые после перезапуска однократно выполняли свои функции по сбору и передаче информации, после чего сразу следовал перезапуск. С другой стороны, в ряде систем был внедрен программный прием, который давал «перезапуск» каждый раз при касании человеком (возможно, заряженным электростатикой), «таблеткой» j-button типа DS1971F5 приемного устройства изделия. По отзывам десятков пользователей (что по сути является методом экспертной оценки), эффективность использования таких систем повысилась, по-видимому, в результате предотвращения накопления электростатики вообще.

7. Выводы

В результате внедрения изложенного метода восстановления работоспособности микропроцессорных систем высокой готовности (охранно-пожарных систем, систем стационарных объектов как помещений, так и размещенных на открытых пространствах; охранных автомобильных систем; систем санкционированного проезда в лифтах) повышается отказоустойчивость функционирования систем.

Этот метод позволяет освоить выпуск автоматизированных приборов сбора, обработки и передачи, не нуждающихся в стационарном монтаже и последующем обслуживании их специализированными сервисными организациями.

Гарантийные обязательства производителя таких приборов будут аналогичны гарантиям приборов типа телевизионных драйверов цифрового телевидения T2, различных медицинских приборов индивидуального пользования и т.д.

Более широкое распространение могут получить малогабаритные индивидуальные приборы охраны жилищ, контроля микроклимата, экологических параметров атмосферы жилищ и систем жизнеобеспечения в них с передачей информации на мобильные устройства пользователя.

На основе представленного материала данного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Достигнута научно-техническая цель настоящего исследования, заключающаяся в повышении как отказоустойчивости, так и помехоустойчивости процедур записи, хранения, считывания и передачи данных при использовании микропроцессорного прибора с автоматическим «жестким» перезапуском (сброс по питанию, hard reset или жесткий перезапуск). Теоретическое обоснование данного метода не представляется возможным в деталях, однако результаты экспериментальных наблюдений на более чем 500 устройствах подтверждают его эффективность.

Поставленная цель достигнута за счет применения в приборе узла автоматического «жесткого» перезапуска, при использовании в нем устойчивых к воздействию электростатического электричества электрорадиоэлементов.

2. Внедрение предложенного метода повышает срок службы микропроцессорных систем, обеспечивает возможность их длительного функционирования в автономном режиме. Это обстоятельство создает предпосылки для выпуска индивидуальных мониторинговых приборов и систем охраны жилищ, контроля микроклимата жилищ, управления системами жизнеобеспечения и экологии.

3. Эксплуатация системы с «жестким» перезапуском путем отключения/включения питания показала также следующие частные положительные результаты:

- подтверждена устойчивость электрорадиоэлементов (ЭРЭ) системы перезапуска к воздействию электростатического электричества;

– система «жесткого» перезапуска путем отключения/включения питания поддерживает работоспособность и частично поврежденного микроконтроллера. Так, микросхема AT89S8253 с превышением тока потребления по питанию, которая уже не перепрограммируется, тем не менее после перезапуска обеспечивала передачу информации с охранных и температурных датчиков;

– на основании длительных, в течение нескольких лет наблюдений, сделан вывод о том, что перезапуски системы после вероятного воздействия электростатики предотвращают усиление (суммирование) воздействия этого эффекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прибор приемно-контрольный охранно-пожарный «Комкон-10». Технические условия Украины ТУ У 16473752.001-97. Киев, 1997. 28 с.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. Межгосударственный стандарт. МКС 21.020. Дата введения 2017-03-01. Москва: Стандартинформ, 2015. 24 с.
3. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов. *Доклады БГУИР*. Минск, 2012. № 6 (68). С. 12–18.
4. Горлов М.И., Строгонов А.В. Воздействие электростатических разрядов на интегральные микросхемы. *Компоненты и технологии*. Санкт-Петербург, 2008. № 3. С. 188–192.
5. Брылева О.А., Пискун Г.А., Алексеев В.Ф. Основные механизмы повреждения микроконтроллеров вследствие влияния электростатических разрядов. *Вестник Белорусско-Российского университета*. Могилев, 2013. № 2 (39). С. 130–137.
6. Карпович М.С., Лысь В.Д. Разработка электростатической защиты элементов ввода – вывода интегральных микросхем, выполненных по субмикронной высоковольтной КМОП-технологии. *Вестник СибГУТИ*. Новосибирск, 2015. № 3. С. 55–65.
7. Абрамешин А.Е. Методология проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с учетом воздействия поражающих факторов электризации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. Москва, 2017. 262 с.
8. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф. Влияние разрядов статического электричества на программное обеспечение, инсталлированное во встроенную flash-память микроконтроллеров. *Радиоэлектроника и информатика*. 2012. № 3 (58). С. 8–12.
9. ГОСТ 11 073.062-2001. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Требования и методы защиты от статического электричества при разработке, производстве и применении. Дата введения 2001. Москва, 2001. 16 с.
10. AT89S8253. DATASHEET. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet.../AT89S8253.html> (дата обращения 15.10.2018).
11. Reliability handbook. URL: www.analog.com. (дата обращения 15.10.2018).
12. Beebe S.G. Characterization, modeling and design of ESD protection circuits. *Technical Report prepared under Semiconductor Research Corporation Contract*. 94 – SJ116. 1998. March. 206 с.
13. MAXIM. Application note 651. ESD Protection for I/O Ports. 2000. March 13. URL: <http://www.maxim-ic.com/an651> (дата обращения 15.10.2018).

Стаття надійшла до редакції 07.12.2018