

УДК 621.385.2.029

ОБРАТИМЫЕ ОТКАЗЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ПОЛЯХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Ключник¹, Ю.А. Пирогов², А.В. Солодов¹

¹ Московский радиотехнический институт Российской академии наук,

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет

Получена 29 января 2013 г.

Аннотация. Проанализированы результаты экспериментальных исследований воздействия радиоизлучения на современные интегральные микросхемы и электронную аппаратуру. Проведено сопоставление уровней обратимых отказов в работе микросхем с уровнями функциональных сбоев аппаратуры, которое позволяет констатировать их хорошее совпадение.

Ключевые слова: обратимые отказы, интегральные микросхемы, электронная аппаратура, функциональные сбои.

Abstract. Results of experimental and theoretical investigations of radio action on modern integral microchips and electronic devices are analyzed. Comparison of reversible failure levels in microchips operation with functional failure levels of equipment allows establishing their good coincidence.

Keywords: reversible failures, integral microchips, electronic equipment, functional failures.

Введение

Все больший интерес приобретают вопросы защиты электронной аппаратуры (ЭА) от влияния электромагнитных помех в связи с повышением степени интеграции современной микроэлектроники, миниатюризацией элементной базы, создание многофункциональных интегральных микросхем (ИМС) - микропроцессоры, микроконтроллеры, микросбороки (АЦП и ЦАП).

В этой связи исследования физических механизмов, нарушающих работу элементной базы микроэлектроники в полях радиоизлучения, являются актуальными.

В данной работы проведен анализ результатов экспериментальных исследований по воздействию импульсного радиоизлучения на работоспособность ИМС. Сопоставлены общие характеристики электромагнитных полей импульсного радиоизлучения вызывающие обратимые отказы ИМС (т.е. нет физического повреждения ее элементов) и функциональные сбои в работе ЭА.

Схемы проведения экспериментальных исследований

Исследованиям воздействия импульсных электромагнитных полей на микросхемы посвящено большое количество работ. Их можно разделить на группы.

Многие специалисты, занимающиеся вопросами воздействия электромагнитных полей на элементную базу ЭА, подобного рода воздействие свели к подаче на выводы полупроводниковых приборов видео- или радиоимпульса [1-3]. Сейчас его называют имитационным подходом. В России имитационный подход к воздействию электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и микросхемы на GaAs отражен, например, в работе [4].

Однако такой имитационный подход не дает связи параметров радиоимпульса с результатом воздействия, в частности:

- 1) невозможно учесть влияние поляризации излучения на величину наводимого напряжения, которое воздействует на элементы микросхем;
- 2) в имитационном подходе при воздействии на микросхемы цепь разряда фиксируется, а в случае облучения мощными радиоимпульсов ИМС, наводки формируются на всех ее выводах и разрядных цепей может быть несколько.

Тем не менее, имитационный подход, например, при воздействии видеоимпульсом, позволяет проследить динамику теплового разрушения определенных микроструктурных элементов приборов при реализации напряженных токовых и тепловых режимов, что в какой-то мере имеет место при воздействии на эти приборы радиоимпульса.

С использованием волноводного метода проводились исследования в ТНУ (г. Симферополь) [5]. На рис. 1 представлено поперечное сечение измерительной секции волновода, которое использовалось при исследовании воздействия радиоизлучения на ИМС.

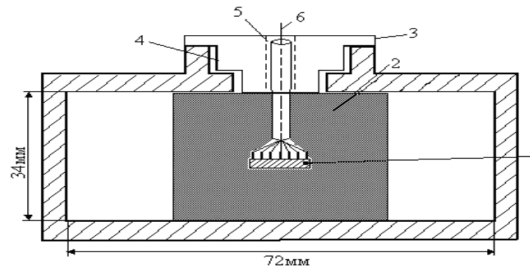


Рис. 1. Поперечное сечение измерительной секции волновода для исследований воздействия на ИМС [6]

1 – ИМС; 2 – пенопластовая вставка; 3 – заглушка; 4 – устройство микроволнового согласования (короткозамыкатель $\lambda/4$); 5 – отверстие; 6 – жгут проводов

Ограничивает возможности волноводного метода является требование – геометрические размеры микросхемы должны быть много меньше размеров волновода. Для большинства микросхем в 10 - сантиметровом диапазоне волн (СМ ДВ) данное требование выполняется. Недостатком волноводных исследований является трудности в создании условий вблизи ИМС таких, которые приближаются к реальным условиям их облучения на печатных платах в составе других элементов ЭА.

Исследования по непосредственному воздействию импульсных электромагнитных полей в свободном пространстве в России, например, впервые были проведены в ННЦ ХФТИ (г. Харьков) под руководством профессора Магды И.И. [7]. Аналогичные работы проводились в ОАО «МРТИ РАН» [8].

Микросхемы исследовались в соответствии со схемой рис. 2 как при наличии питания и управляющих сигналов, так и без них.

Стремительное развитие полупроводниковой технологии привело к созданию в 90-х годах малогабаритных твердотельных генераторов, излучающие периодические и однократные сверхкороткие электромагнитные импульсы (СК ЭМИ). Они обладают новыми качествами, отсутствующими у традиционных источников преднамеренных помех: сверхширокополосностью

и большой амплитудой (пиковой мощностью в десятки тераватт), спектральная плотность их распределена в интервале от сотен МГц до единиц ГГц.

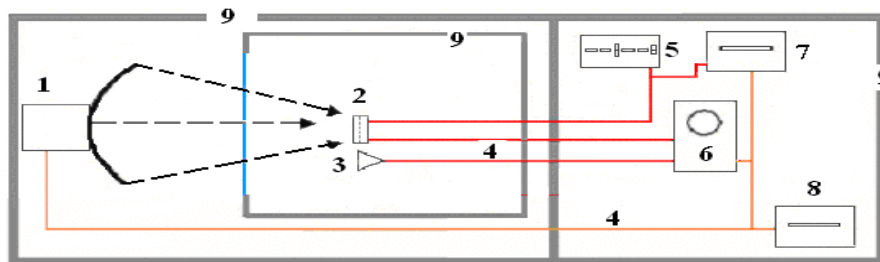


Рис. 2. [8]

1 - СВЧ генератора, 2 – ИМС, 3 – детектор, 4 – экранированные кабели, 5 - источник питания, 6 – осциллограф, 7- генератор импульсов (ГИ), 8 –ГИ синхроимпульсов, 9 – - экранированное помещение

Особенностью данного типа излучения является соизмеримость длительности воздействующих импульсов с длительностью рабочих импульсов, при обработке цифровой информации. Поэтому при воздействии СК ЭМИ на компьютеры и цифровые устройства в их цепях наводятся сигналы, аналогичные рабочим, что приводит к нарушению работы цифровых систем.

С уменьшением длительности фронта воздействующего СК ЭМИ снижается эффективность применяемых защитных устройств, усиливается проникновение электромагнитных полей через неоднородности в корпусах, увеличиваются амплитуды наведенных токов и напряжений на выходах антенно-фидерных устройств, кабелей и проводов, расположенных вне экранов, что может приводить к ложным срабатываниям или катастрофическим отказам аппаратуры.

Поэтому довольно много исследований проведено, например, по схеме, приведенной на рис. 3.

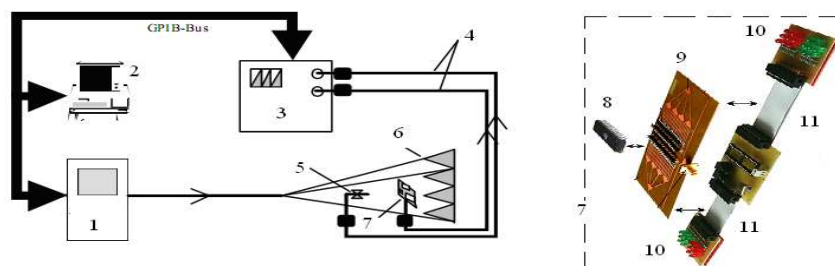


Рис. 3. [9]

1 – генератор, 2 – компьютер, 3 – измерительные приборы, 4 - оптические кабели, 5 – пробник, 6 – поглощающее покрытие, 7 - испытуемое устройство, 8 – микроконтроллер, 9 - плата, 10 – нагрузка, 11 - - кабели.

Обратимые отказы ИМС в полях радиоизлучения

Падающее радиоизлучение создает СВЧ наводки (токи и напряжения высокой частоты) на металлических выводах интегральной микросхемы и прилегающих к ней проводниках. Амплитуды наводок существенно зависят от размеров, формы, ориентации её выводов и проводников, параметров излучения и т.д. [10, 11]. Эти высокочастотные колебания, сформированные на выводах, попадают на элементы ИМС – резисторы, диоды, транзисторы. Часть мощности при этом поглощается ими, приводя к нагреву, часть переотражается, а часть детектируется на нелинейных элементах ИМС.

Важнейшим эффектом, определяющим обратимое воздействие СВЧ излучения на ИМС, является детектирование СВЧ наводки на ее нелинейных элементах.

Детектирование (созданных на выводах ИМС СВЧ наводок) происходит в основном на нелинейных элементах, которые непосредственно подсоединяются к ее выводам (т.е. на диодах и транзисторах (биполярных -БТ и полевых - ПТ) во входных, выходных и цепи питания).

Результаты исследований показывают, что основную роль при детектировании радиоимпульса на БТ играет переход эмиттер-база [12], на ПТ – нелинейность сток-затворной вольтамперной характеристики [13]. ПТ в целом менее чувствителен к воздействию радиоимпульсов по сравнению с БТ.

Помимо детектирования, по мере увеличения мощности радиоизлучения на входе ПТ появляется долговременная стадия (до единиц секунд) восстановления тока до режимного значения (см. рис.4).

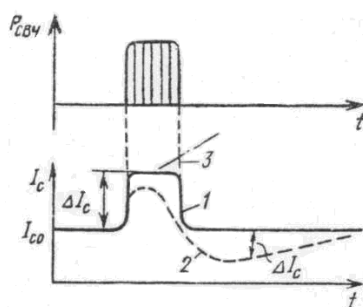


Рис. 4. [14]

Физическая сущность долговременных процессов восстановления работоспособности ПТ на GaAs связана с захватом носителей заряда на

глубокие уровни на границе раздела «канал – полуизолирующая подложка» транзистора в момент действия радиоимпульса с дальнейшей их релаксацией [13, 14].

Эффекты, наблюдаемые в ПТ под воздействием СК ЭМИ большой амплитуды, имеют большое время восстановления (десятки минут и более) по сравнению с эффектами под действием слабых импульсных перегрузок (амплитуды импульса меньше напряжение пробоя). Кроме изменения толщины слоя объемного заряда на границе «канал-подложка ПТ проявляются и другие механизмы, связанные с накоплением заряда в других областях полупроводниковой структуры, например, в диэлектрике, покрывающем поверхность GaAs в промежутках «затвор-сток» и «затвор-исток». Суть предполагаемого эффекта заключается в том, что в области лавинного размножения носителей в поверхностном слое GaAs возникают разогретые электроны, имеющие энергию, достаточную для туннелирования на ловушки диэлектрика или для инжекции в диэлектрик с последующим захватом на ловушки [15].

При изучении эффектов воздействия СВЧ излучения на ИМС важным этапом является выбор элементарных объектов исследования, которые, с одной стороны, должны быть наиболее используемыми структурными единицами рассматриваемых систем, а с другой - быть восприимчивыми к данному воздействию.

Основа построения современных цифровых микросхем - элементарная логическая ячейка “НЕ”, транзисторы которой соединены в кристалле микросхемы напрямую, что позволяет при элементарных знаниях оценить реакцию микросхемы на СВЧ воздействие, связанное с детектированием и изменением режима работы транзисторов.

Анализ результатов действия СВЧ излучения на логический элемент И-НЕ в статическом режиме [16] показал, что под влиянием радиоизлучения происходит деформация передаточной характеристики, изменение статических

параметров микросхемы: выходного напряжения логической единицы $U_{\text{ВЫХ}}^1$ и логического нуля $U_{\text{ВЫХ}}^0$.

Исследования, проведенные в [17] показали, что под действием радиоизлучения значительным изменениям подвергаются динамические параметры цифровых ИМС: задержка распространения сигнал при переходе выходного напряжения от «0» к «1» $t_{\text{здр}}^{0,1}$ и от «1» к «0» $t_{\text{здр}}^{1,0}$. С ростом мощности радиоизлучения происходит увеличение $t_{\text{здр}}^{0,1}$. В конечном итоге (при увеличении мощности радиоимпульса) выходное состояние на логическом элементе изменяется от «1» к «0» и происходит сбой.

Установлено, что с ростом несущей частоты радиоимпульса восприимчивость ИМС к ее воздействию снижается.

При воздействии радиоизлучения на ИМС в свободном пространстве необходимо учитывать влияние взаимной ориентации выводов ИМС и вектора электрического СВЧ излучения (см. рис. 5) на протектированный сигнал на выходе микросхем. Исследования [18] показали, что максимальная амплитуда протектированной наводки достигалась при ориентации выводов ИМС вдоль вектора электрического поля, а минимальная - при ортогональной ориентации.

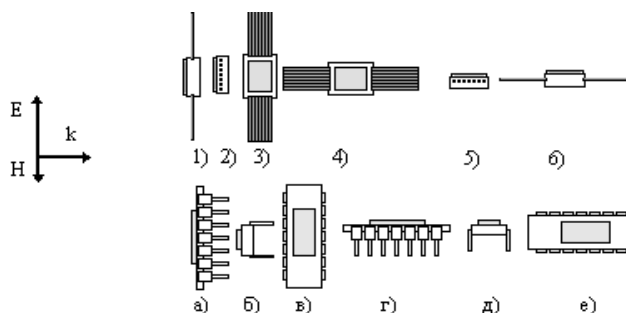


Рис. 5. Схема расположение ИМС относительно поляризации СВЧ излучения

При исследовании ИМС (с пластиковым корпусом Dip типа) с использованием волноводного метода - максимальная амплитуда наводки достигалась, когда вектор электрического поля лежал в плоскости корпуса ИМС [5,6]. По всей видимости, это связано с тем, что у ИМС с пластиковым корпусом выводы ортогональны корпусу (см. рис. 5), а проводники, соединяющие выводы и чип ИМС (см. рис. 6) мало отличаются друг от друга по длине (по сравнению с длиной волны СМ ДВ).

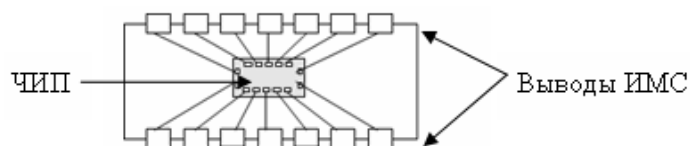


Рис. 6. Схема электрического соединения контактных площадок кристалла с выводами ИМС

Как известно, срабатывание цифровых микросхем ТТЛ и КМОП технологий, например, переключение из состояния «0» в состояние «1» происходит при амплитуде входного сигнала $\sim 0.8...1$ В при длительности импульса $\tau > 10...50$ нс.

Исследования с цифровыми интегральными микросхемами в 4-х сантиметровом диапазоне длин волн показали, что протектированные сигналы уровня 1 В возникают на входе ИМС при плотности потока энергии СВЧ излучения $ППЭ = 0.1...1$ Вт/см² ($E = 0.6...1.9$ кВ/м). По определению $ППЭ = E^2/2W_0$, E – амплитуда электрического поля электромагнитной волны, $W_0 = 120\pi$ Ом.

Характерные осциллограммы при воздействии пачки радиоимпульсов на ИМС показаны на рис. 7.

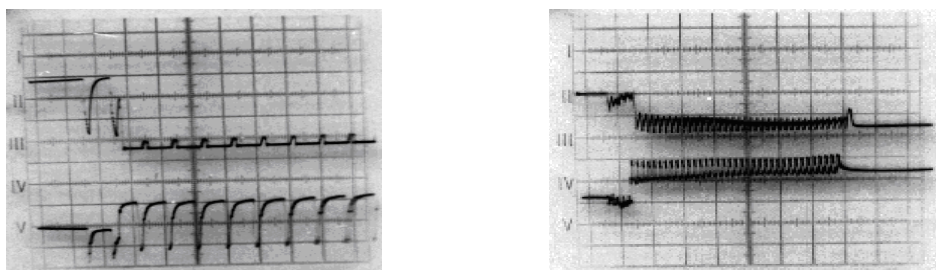


Рис. 7.

Было получено, что воздействие СВЧ сигнала максимально, когда он попадает на фронт импульса, которым управлялась работа микросхемы.

При уменьшении длительности радиоимпульса τ до 10...20 нс амплитуда наводки резко уменьшалась и эффект функциональных сбоев вплоть до $ППЭ \approx 4$ Вт/см² не наблюдался, что связано с ограниченным быстродействием микросхем (> 10 нс).

При логическом уровне «0» на выходе, отмечалось резкое снижение амплитуды протектированного сигнала с практически отсутствующей

зависимостью ее от мощности радиоимпульса. Этот факт можно объяснить высокой степенью насыщения открытых транзисторов в выходных цепях ИМС. Общее же увеличение амплитуды продетектированного сигнала в выходных цепях ЦИС в состоянии логической “1” объясняется усилением продетектированного сигнала самой ЦИС.

В изделиях электронной техники полупроводниковые элементы расположены на платах и соединены токоведущими линиями с другими элементами. Размеры токоведущих линий могут иметь разную величину. В этой связи представляет интерес проведенные исследования зависимости определенного уровня сигнала наводки, например, ~ 1 В, на входе микросхемы от длины ее выводов и интенсивности падающего радиоизлучения. Как известно, сигнал такого уровня на входе, например, микросхемы 133 серии, приводит к переключению сигнала на ее выходе из состояния высокого уровня в состояние низкого уровня.

Эксперименты проводились, например, с микросхемами 133ЛН1. Микросхемы 133 серии имеют металлический корпус с планарными выводами. Схема эксперимента представлена на рис. 8.

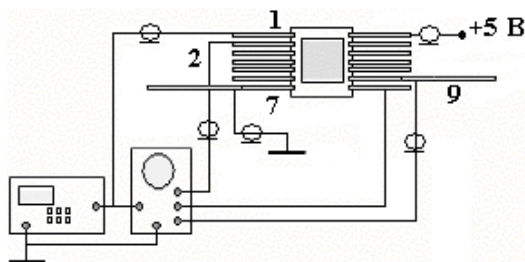


Рис. 8. Схема включения ИМС с разной длиной выводов

К выводам микросхемы 9 (вход) и 7 (земля) припаивались усы-проводники (одинаковой длины). При определенной суммарной длине (вывод+ус) l , микросхема облучалась, и определялись интенсивности радиоизлучения, приводящие к формированию продетектированных сигналов (~ 1 В) на входах 1, 9 микросхемы. С помощью осциллографа контролировались амплитуды сигналов на входах 1 и 9 и амплитуды сигналов на выходах 2 и 8. При этом наблюдался процесс переключения сигналов на выходах микросхемы 2 и 8 из

состояния высокого уровня в состояние низкого уровня. Затем длина проводников уменьшалась, и опыты повторялись снова.

Результаты измерений интенсивности излучения I , приводящей к формированию протектированного сигнала ~ 1 В на входе 9 (и переключение сигнала на выходе 8) от длины выводов 7, 9 микросхемы, представлены на рис. 9.

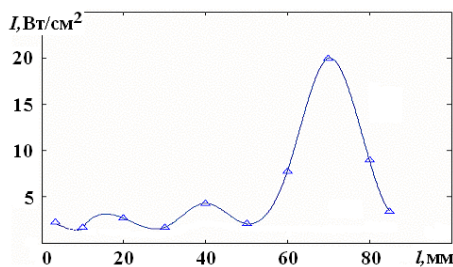


Рис. 9.

Вблизи полуволнового резонанса наблюдается заметное снижение порога срабатывания микросхем и, следовательно, повышение уровня поглощенной микросхемой мощности.

На более коротких длинах усов (при суммарной длине $l < 9$ мм) получили практически такой же результат, как и без усов.

Выполненные исследования показали возможность использования «антенной модели» [19] для описания воздействия СВЧ излучения на ИМС.

Зависимость амплитуды и формы протектированного сигнала от интенсивности падающего на ИМС излучения позволяет, в большинстве случаев, предсказать появление необратимых изменений характеристик микросхем. Так, например, если замедляется рост амплитуды протектированного сигнала с увеличением интенсивности, а в некоторых случаях наблюдается изменение знака протектированного сигнала, то эти эффекты могут свидетельствовать о развитии электрического пробоя и о возможном повреждении ИМС [20].

Испытания различных аналоговых и цифровых устройств показали, что СВЧ мощность, вызывающая переборс цифровых устройств из одного состояния в другое, больше мощности, нарушающей нормальную работу аналоговых устройств [21]. Функциональные сбои у аналоговых ИМС

происходят при средних плотностях потока мощности ~ 10 мВт/см² ($E=0.19$ кВ/м) [22].

Экспериментальные исследования по воздействию радиоимпульсов на ИМС показали, что, как и для микросхемы с низким и средним уровнями интеграции [7, 8] сбои в работе современных микросхем в значительной мере определяются взаимным расположением микросхемы и поля («антенный эффект»). Этот фактор определяет величины дополнительных напряжений, прикладываемых к микроструктурным элементам.

Для современных ИМС памяти 27C256-20FA установлено [23], что в ориентациях, когда грань кристалла ИМС параллельна вектору напряженности электрического поля волны (\parallel), сбои при записи и считывании происходят при значениях напряжённости электрической поля $E_m > 0.05$ кВ/м, а в ортогональных ориентациях (\perp) – при $E_m > 0.5$ кВ/м. Для микросхем TLC549IP и AD7243 в ориентации « \perp » сбои наблюдались при $E_m \geq 0.5$ кВ/м, а в ориентации « \parallel » - при $E_m > 0.05$ кВ/м.

Повышение степени интеграции микросхем, увеличение функций, выполняемых ИМС, и связанное с этим уменьшение размеров активных элементов делает их более чувствительными к СВЧ облучению. В неэкранированных и более медленных микропроцессорах (с тактовой частотой менее десятков МГц) сбои начинаются под действием импульсного СВЧ облучения (1...10 ГГц) при плотности потока мощности, большей 100мкВт/см² ($E > 20$ В/м).

В процессе исследований [24] было установлено, что сбои в работе микроконтроллеров ATtiny15 происходят при $E_m > 1$ кВ/м, у микро контроллера PIC16F628-20I/P начинаются при $E_m \geq 0.05$ кВ/м.

При исследовании (несущая частота была 2460 ± 50 МГц) микроконтроллеров ATmega 8515, ATmega 16 установлено, что наиболее уязвимы линии сброса, линий тактовой частоты и линий электропитания, чем линии данных. Воздействие на линии сброса, тактовой частоты и

электропитания показали сбои в работе микроконтроллеров при 15...20 В наводки, а линии данных показали сбой больше чем при 30 В наводки [25].

При воздействии радиоизлучения на микроконтроллеры наблюдаются так называемые эффекты «защелкивания».

Электрическое защелкивание (или «тиристорная защелка») является весьма опасным видом обратимых отказов КМОП микросхем. Микронные размеры элементов и малые расстояния между ними в объеме полупроводниковой подложки ИМС могут приводить к возникновению паразитных 4-слойных структур, которые при быстро изменяющемся напряжении на них ($dU/dt \sim 0,1 \dots 10$ В/нс) могут переходить в низкоимпедансное состояние (защелкивание) [26], даже если воздействующее напряжение не превышает допустимое.

В качестве примера, на рис. 10 а показано расположение элементов паразитного тиристора в подложке ИМС. На рис. 10 б показана электрическая схема этой тиристорной структуры, и рис. 10 в показана ее вольтамперная характеристика.

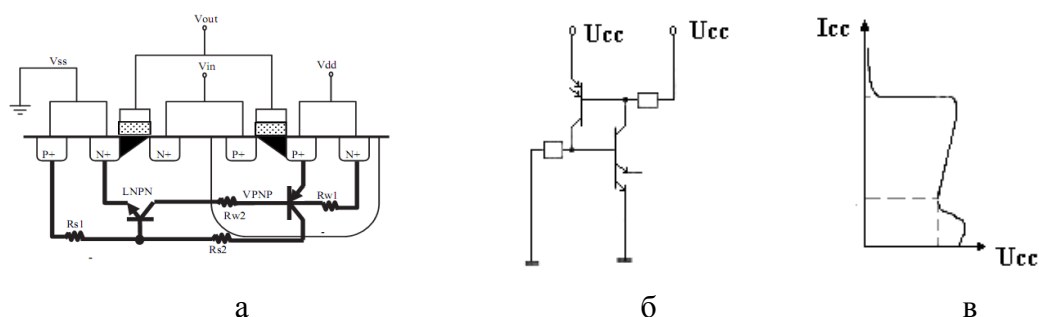


Рис. 10. Паразитные биполярные компоненты структуры PNPN. [27]

Здесь, R_{w1} - паразитное сопротивление между базой эмитентов PNP, и R_{s1} - паразитное сопротивление между базой эмитентов N-P-N-структуры.

Причиной для возникновения «защелки» помимо большой скорости нарастания фронта входного сигнала может быть наличие входных сигналов, когда питание (U_{cc}) находится в стадии выключения, с превышением напряжения питания над предельным значением $U_{cc} > 15$ В.

Функционирование ИМС при этом, как правило, нарушается и не восстанавливается после окончания воздействия. Только отключение питания

позволяет ликвидировать «защелкивание» и зависание всего прибора (например, ПК, GPS-навигатора и т.п.). А если нет ограничения по току у источника питания ИМС, то большой импульсный ток, который переводит защелку в положение «включено» (причем включенное состояние пребывает достаточно долгое время, до сотых долей миллисекунды) приводит к выгоранию металлизации или тепловому пробоев внутренних полупроводниковых структур микросхемы.

Для описания таких обратимых отказов полупроводникового прибора в работе [28] предложили величину BFR (см. рис. 11)- число отказов системы, разделенной на число импульсов, которые воздействовали на нее. После сброса воздействия (само - внешний - или сброса питания) система возвращается к функционированию. BFR ведет себя как показано на рисунке 12. Ее описывают две величины. BT (порог) - определяет величину электрического поля, при которой происходят первые обратимые отказы системы. BB (полоса пропускания) - диапазон электрического поля, в которой порог (BT) изменяется от нуля до единицы.

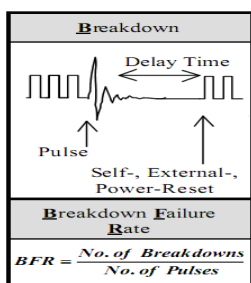


Рис. 11. Скорость обратимых отказов [28]

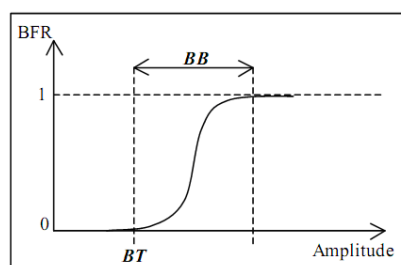


Рис. 12. BFR - принципиальное поведение и определения [28]

В работе [29] были исследованы обратимые отказы микроконтроллеров (см. рис. 13) с различным числом I/O-портов при воздействии СК ЭМИ (время нарастания $t_r = 100$ пс, длительность $\tau = 2.5$ нс).

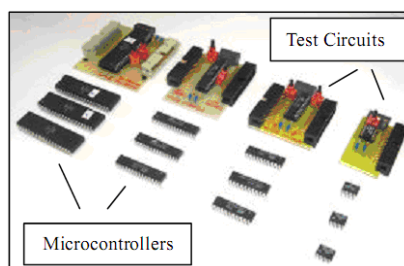


Рис.13. Микроконтроллеры и их цепи [29]

Эксперименты показали, что параметры ВТ и ВВ слабо зависят от состояния порта - высокий/низкий испытуемых микроконтроллеров, но зависят от их типа. А на восприимчивость исследованных микроконтроллеров влияет длина линий часов, электропитания и практически не влияет длина линии тактовой частоты. Влияние длины линий на восприимчивость исследованных микроконтроллеров представлена на рис. 14.

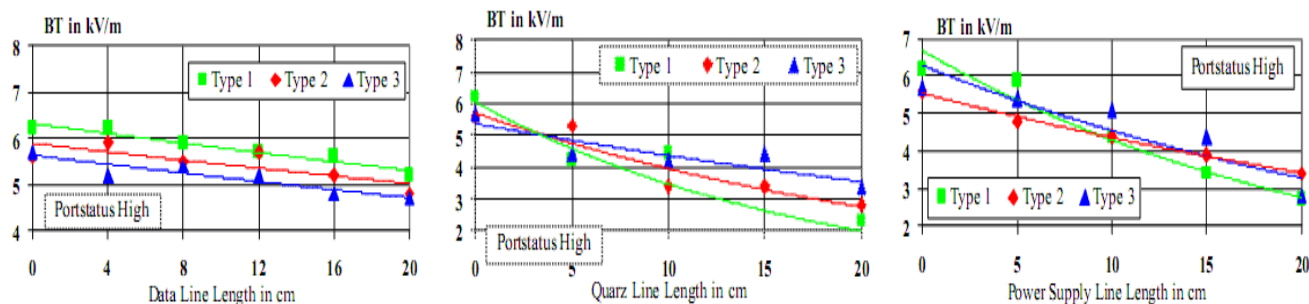


Рис. 14. Изменение ВТ от длины линий для трех разных микроконтроллеров [29]

Так, например, на порог (ВТ) и ширину полосы (ВВ) слабо влияет длина линии данных. ВТ уменьшается приблизительно на 1 кВ/м с 6...7 кВ/м – при минимальной длины линии до 6 кВ/м при длине линии данных 20 см.

При изменении длины линии электропитания, величина ВТ уменьшается приблизительно на 3 кВ/м с 6...7 кВ/м – при минимальной длины линии до 3.5...4.5 кВ/м – на 20 см. При этом величина ВВ уменьшается приблизительно на 2 кВ/м с минимальной длины линии электропитания на 20 см.

Исследования [30] различных микроконтроллеров, показали незначительное влияние управляющих программ. Те же самые результаты наблюдались во время исследования систем персональных компьютеров в минимальной конфигурации, т.е. очень низкое влияние на пороги ВТ тестовой программы, по сравнению с абсолютными величинами аварийных порогов (см. рис. 15).

Заметим, что восприимчивость электронных устройств к СК ЭМИ намного выше в динамическом режиме, чем в статическом. Это поведение наблюдалось на различных устройствах (сдвиговые регистры и цепи микроконтроллера) и различных технологиях (ТТЛ, КМОП) [30].

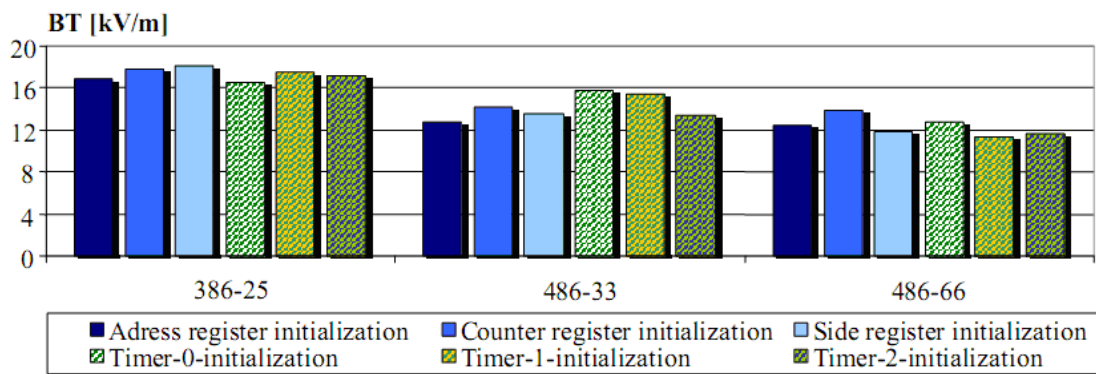


Рис. 15. Пороги функциональных сбоев трех систем ПК при работе шести различных программ [30]

При исследовании [29] поведения различные платы с микропроцессорами (см. рис. 16) с приблизительно одинаковыми размерами (для того, чтобы величина наводок на этих платах была сопоставима), замечено, что ВТ (сбои в работе) плат отличается.

Например, (см. рис.17) сбои при воздействие СК ЭМИ импульса на плату Rocky-518 HV с центральным процессором Pentium MMXtm работающем на 233 МГц начинаются приблизительно при 12 кВ/м. Для платы SSC-5x86 H с центральным процессором DX4-S в 100 МГц сбои начинаются приблизительно при 4 кВ/м.



Рис.16.

Платы с микропроцессорами [29]

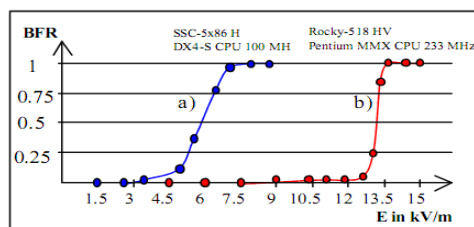


Рис.17. BFR [29]

a - SSC-5x86 H, b) Rocky-518 HV

Различное поведение плат с микропроцессорами основано на различной восприимчивости устройств и различным их расположением на платах.

В работе [9] были проведены исследования воздействия импульсов (300, 500 пс) с тремя различными частотами повторения (1, 10, 100 кГц) на различные выводы микроконтроллеров. На рис. 18 показана восприимчивость различных выводов к увеличивающейся амплитуде импульса. Как видно из представленных графиков на рис. 18, восприимчивость электронных устройств сильно зависит от функции выводов, на которые проведено воздействие.

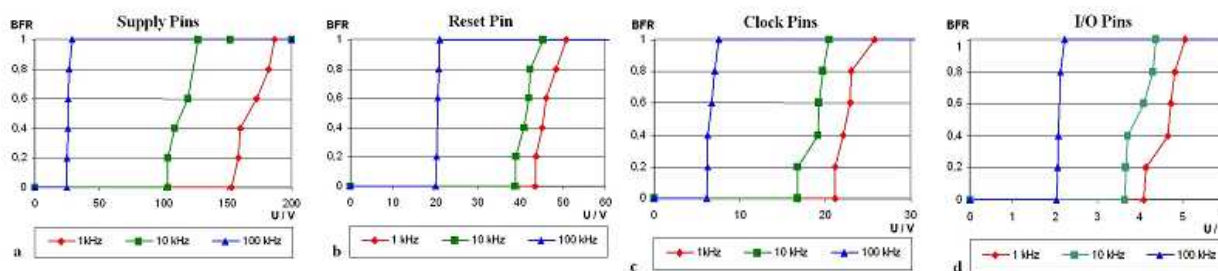


Рис. 18. BFR: (a) Питание Pins; (b) Сброс Pin; (c) Часы Pins; (d) I/O Pins. [9]

Кроме того, эти измерения показывают общее уменьшение порогов при увеличении частоты повторения (рис 19).

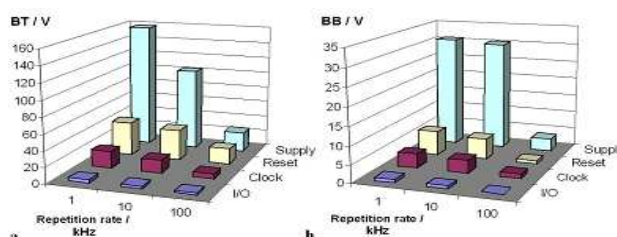


Рис. 19. Значение порогов отказов (VT) и полос (VB) для разных облучаемых выводов от частоты повторения импульсов. [9]

Вывод I/O (ввода/вывода) исследованных микроконтроллеров (см. рис.18) - самые восприимчивые, в то время как выводы питания - наименее восприимчивые. Исследования так же показали, что в худшем случае аварийный порог может быть понижен только к 16% прежней амплитуды, при увеличении частоты повторения от 1 кГц до 100 кГц. Заметим, что необходимый порог отказов понижается меньше чем на одну половину напряжения питания.

При теоретической оценки уязвимости ИМС к воздействию радиоизлучения в широком диапазоне параметров используют математическое моделирование с применением схемотехнических программ Spice или MicroCap [31, 32].

Как известно, устройства защиты от электростатического разряда существуют фактически во всех входных цепях: цифровых, логических, аналоговых, СВЧ микросхем. Анализ экспериментов [33, 34] показал, что при воздействии радиоизлучения на высокоскоростной CMOS ИМС наблюдаются внутренние паразитные резонансы (см. рис. 20).

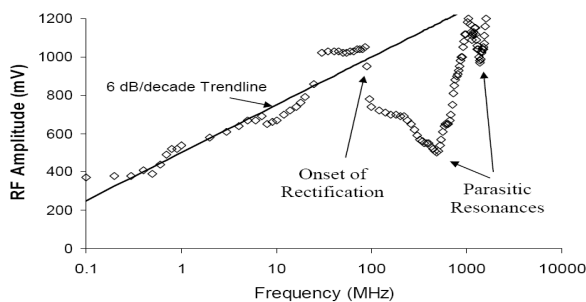


Рис. 20. [34]

Поведенное моделирование с использованием программы Spice [34, 35] показывает, что эффекты нестабильности в поведении микросхем объясняются детектированием радиоимпульсов диодами защиты от электростатического разряда.

Однако чаще для оценки результатов воздействия радиоимпульса на потенциально уязвимый элемент ИМС руководствуются методологией представленной в работах [36, 37]: определяют уязвимый элемент, «антенны» на которых формируются наводки, пути поступления к элементу наводок и простые модели самого уязвимого элемента [19]. При анализе более сложных устройств можно воспользоваться моделями, разработанными в ИРЭ РАН в лаборатории В.А.Черепенина [38, 39].

Понимание влияния импульсного радиоизлучения на ИМС оказывается принципиально важным для оценки эффектов и реакции, как отдельных узлов, так и ЭА в целом.

В реальных случаях происходит взаимодействие СВЧ излучения с множеством компонентов, плат, блоков и узлов, составляющих данное электронное устройство (персональные компьютеры (ПК), GPS приемники [40] и т.п.). Установлено [22], что наращивание структурной сложности исследуемых устройств и вариации уровней СВЧ воздействия приводит к увеличению числа возможных типов сбоев в функционировании системы и понижению пороговых уровней их возникновения. Остановимся на анализе работы ПК в условия воздействия радиоизлучения.

Уровни уязвимости ПК, не защищённого электромагнитным экраном, сильно зависят от параметров воздействующего радиоизлучения и может составлять всего 30 В/м [41].

Исследования воздействия импульсный радиоизлучения ($\lambda=10$ -см) ПК типа РС 386DX-40, работающего в режиме тестирования ячеек памяти, показали, что особенностью наносекундного диапазона длительностей импульса является увеличение порога функциональных сбоев при уменьшении длительности импульсов и частоты повторения СВЧ импульсов [42].

Частота повторения радиоимпульсов играет в некоторых случаях существенную роль – она определяется частотами повторения, свойственными работе исследуемой аппаратуры. Низкая частота повторения импульсов ведет к низкой вероятности нарушения работы и требует более высоких уровней излучения.

Воздействие сверхширокополосного сигнала с $\Delta f/f \approx 1$ связано с большим числом размерных резонансов, возникающих у различных типов ЭА. Так в работе [43] были проведены исследования с ПК (тактовыми частотами процессора от 166 до 1400 МГц) и сделали вывод о том, что существуют частоты (может быть резонансные) в диапазоне 0.7...0.9 ГГц (что соответствует длительности излучаемых импульсов – 0.5 нс), на которых уязвимость компьютеров наивысшая.

В результате облучения излучением СК ЭМИ работающего ПК наблюдались различные эффекты [44]: от искажений на экране монитора ($E_{\text{пор}} \geq 0.8$ В/м, $f = 0.5...2$ ГГц) до функциональных сбоев и "зависания" устройства. Любой из сбоев был связан с необходимостью повторного запуска ПК. При минимальной импульсной мощности ($E_{\text{пор}} \geq 0.025$ В/м, $f = 0.5...2$ ГГц) источников, достигалось блокирование клавиатуры ПК. Очевидно, для ПК этот узел является, наиболее уязвимым местом с точки зрения воздействия радиоизлучения.

Следует отметить, что уровни уязвимости для самых неэффективных режимов воздействия в 4...6 раз превысили уровни уязвимости, характерные для наиболее эффективных режимов.

Выводы

Проведена систематизация результатов экспериментальных и теоретических исследований воздействия радиоизлучения на ИМС.

Исследования показали, что, как обратимые отказы для микросхем, так сбои в работе современной электронной аппаратуры в значительной мере определяются взаимным расположением микросхем, аппаратуры и поля радиоизлучения («антенный эффект»).

При воздействии радиоизлучения на КОМП микросхемы наблюдается эффект «защелкивания». Функционирование ИМС, как правило, нарушается и не восстанавливается после окончания воздействия. Только отключение питания позволяет ликвидировать «защелкивание» и похожее зависание у ПК и GPS-навигаторов.

Как у высокоскоростной ИМС наблюдаются внутренние паразитные резонансы, так и у РЭА большее число размерных резонансов. Так в результате облучения излучением работающей аппаратуры, например, СК ЭМИ ПК наблюдались различные эффекты: от искажений на экране монитора до функциональных сбоев и "зависания" устройства.

Экспериментальные исследования эффектов воздействия радиоимпульсов на типовые устройства ЭА (в частности на ПК) показали, что основными причинами функциональных сбоев являются обратимые отказы ИМС, приводящие к нарушению целостности информации находящейся в обработке, а так же к нарушению режимов функционирования.

Сопоставление уровней обратимых отказов в работе ИМС с уровнями функциональных сбоев незранированной ЭА в целом позволяют констатировать их хорошее совпадение.

Частота повторения импульсов играет в некоторых случаях существенную роль - низкая частота повторения импульсов ведет к низкой вероятности нарушения работы и требует более высоких уровней излучения.

Литература

1. Antinone R.J. Young P.A., Wilson D.D., and et al. Electrical overstress protection for electronic devices. - Noyes Publications, 1986. - 394 p.
2. Messenger G.C., Ash M. S. The Effects of radiation on Electronic System's. - Van Nostrad, Reinhold Co. N.-Y. 1986. – 183 p.
3. Риккетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. – М., Атомиздат, 1979. – 328 с.
4. Антипин В.В., Громов Д. В., Годовицин В.А. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – Вып.1. – С. 37–53.
5. Григорьев Е.В., Борисов А.А. Старостенко В.В., Таран Е.П. Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы. // Измерительная техника, 1998, № 4, с. 65–67.
6. Грибский М.П. Физика процессов напряженных токовых и тепловых режимов микросхем при воздействии импульсных СВЧ полей: Дисс. к.ф-м.н. – Симферополь, ТНУ, 2009, - 155с.
7. Магда И.И., Блудов Н.И., Гадецкий Н.П. и др. Механизм деградации ИЭТ в полях мощного СВЧ излучения. // Петерб. журнал электроники, 1995, №3, с. 55–59.
8. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. // РиЭ, 2011, т. 56, № 3, с. 375-378.
9. Korte S., Garbe H. Breakdown behavior of electronics at variable pulse repetition rates. // Adv. Radio Science, 2006, N 4, pp. 7–10.
10. Taylor C.D., Harrison C.W. On the coupling of microwave radiation to wire structures. // IEEE Trans., 1992, vol. EMC-34, N 3, pp. 183-188.

11. Дементьев Ю.В, Каплун В.Г, Кучеров Ю.С, Сытник А.Ф. Влияние длины волны внешнего СВЧ излучения на стойкость элементной базы радиоэлектронной аппаратуры. // Радиотехника, 1996, №2, с.125-126.
12. Amdory R.A., Puglielly V.C.G., Richardson R.E. Microwave interference effect in bipolar transistors. // IEEE Trans.,1975,vol.EMC-19, N2, pp.49-56.
13. Forchier M.L., Richardson R.E. Microwave-rectification RFI response in field-effect transistors. // IEEE Trans., 1979, vol. EMC-21, N4, pp. 312-315.
14. Антипин В.В., Годовицын В.А, Громов Д.В., Раваев А.А. Деградация малощумящих СВЧ полевых транзисторов с затвором Шотки на арсениде галлия при воздействии мощных импульсных микроволновых помех. // Радиотехника, 1994, №8, с.34-38.
15. Бобрешов А.М. Усков Г.К. и др Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках. // Известия ВУЗов. Электроника, 2006, N5, с.69-77.
16. Листопад Н.И., Поборцев П.Н., Ясюля Г.И. Влияние помеховых сигналов на характеристики цифровых ИС. // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1988, вып.1(125), с.130-132.
17. Бригидин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М., Влияние электромагнитных помех на цифровые интегральные схемы. // Эл. техника. Сер. Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания. 1989, вып.5 (137), с. 55-57.
18. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. // Журнал радиоэлектроники, 2010, №8, с. 1-27.
19. Strickland B.R., Auden N.F. Numerical analysis technique for diode-loaded dipole antennas. // IEEE Trans. EMC, 1993, v. 35, N4, p. 480-484.
20. Залешин А.В., Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Работа детекторных диодов под действием коротких радиоимпульсов. // РиЭ, 2011, т. 56, № 6, с. 760-764.

21. Clayborne D. Taylor, Nicolas H. Younau. Effects from high power microwave illumination. // *Microwave Journal*, 1988, vol.35, №6, pp.80-96.
22. Бердышев А.В., Ивойлов В.Ф., Исайкин А.В. и др. Экспериментальные исследования воздействия СВЧ импульсов на содержащие интегральные микросхемы радиоэлектронные устройства. // *Радиотехника*, 2003, №6, с.85-88.
23. Грибский М.П., Ахрамович Л.Н., Григорьев Е.В. и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти. // *Радиоэлектроника и информатика*, 2006, т. 35, № 4, с. 15–17.
24. Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В. и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микро-контроллеры. / *Прикладная радиоэлектроника*, 2006, т. 5, № 2, с. 294–297.
25. Hong J. I., Hwang S. M., Nuh C. S. Susceptibility of Microcontroller Devices due to coupling effects under narrow-band high power electromagnetic waves by magnetron. // *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, 2008, v.22, p. 2451–2462.
26. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник/ П.П. Мальцев, Н.С. Долидзе, М.И. Критенко и др. – М.: Радио и связь, 1994, 240 с.
27. Kim K., Pliadis A.A. Latch-up effects in CMOS inverters due to high power pulsed electromagnetic interference. // *Solid-State Electronics*, 2008, vol.52, pp. 1589-1593.
28. Camp M., Garbe H., Nitsch D. Influence of the Technology on the Destruction Effects of Semiconductors by Impact of EMP and UWB Pulses. // *IEEE Intern. Symp. on EMC*, 2002, vol.1 pp.87-92.
29. Camp M., Garbe H., Nitsch D. UWB and EMP Susceptibility of Modern Electronics. // *IEEE International Symposium on EMC*, 2001, vol.2, pp. 1015 – 1020.
30. Camp M., Garbe H. Influence of Operation and Program-States on the Breakdown Effects of Electronics by Impact of EMP and UWB. // [Электронный ресурс]. URL: homepage.alice.de/camp/publikation18.pdf.

31. Whalen J.J., Trout J.G., Larson C.E., Roe J.M. Computer-aided analysis of RFI effects in digital Integrated circuits. // IEEE Trans. on EC., 1979, vol.21, N4, pp.291-297.
32. Tront J.G. Predicting URF upset of MOSFET digital IC's. // IEEE Trans., 1985, vol.EMC-27, N2, pp.64-69.
33. Gong K., Feng H., Zhan R., Wang A.Z.H. A Study of Parasitic Effects of ESD Protection on RF ICs. // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2002, vol. 50, N.1, pp. 393-402.
34. Rodgers J., Firestone T. M., Granatstein V. L., Walter M. Experimental Study of EMP Upset Mechanisms in Analog and Digital Circuits. // [Электронный ресурс]. URL: http://www.ipr.umd.edu/MURI-2001/Review_8June_02/09_Rodgers.pdf.
35. Rodgers J., Firestone T.M., Granatstein V.L. Diffusion Model of Nonlinear HPM Effects in Advanced Electronics. // [Электронный ресурс]. URL: http://www.ipr.umd.edu/MURI-2001/FinalReview-071406/05_Rodgers.pdf.
36. Garver R.V., Tatum J.T. Assessment Methodology for radio frequency effects. //IEEE National Symposium on electromagnetic compatibility, 1989, p.137-142.
37. Methodology guidelines for high power microwave (HPM) susceptibility assessments. Ed. By N.J. Chesser. Report. Chairman—A.Pesta.Jan.1990г. ДСП.
38. Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А. Помехи и сбои при нетепловом воздействии короткого электромагнитного импульса на радиоэлектронные устройства. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, т. 8, №1, с. 64-73.
39. Зиглин С.Л., Репецкая Л.В., Черепенин В.А. Воздействие мощных колебаний на импульсные устройства. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2008, т.13, №6, с. 16-17.
40. Nilsson T., Mansson D., Backstrom M. EMI effects on some wireless systems (GPS receivers). // IEEE EMC Meeting 24-24 Aug., 2006, p.16.

41. LoVetri J., Wilbers A.T.M., Zwamborn A.P.M. Microwave Interaction with a Personal Computer: Experiment and Modeling. // Proc. of the 13th Int. Zurich Symp. on EMC, Zurich, Switzerland, February 16-18, 1999, pp. 203-206.
42. Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артёменко С.Н. и др. Экспериментальное исследование воздействия СВЧ импульсов на работу персонального компьютера. // РЭ, 2001, т.46, №8, с.1020-1024.
43. Корнев А.Н., Сахаров К.Ю. и др. Исследование воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на персональные компьютеры. // Технологии ЭМС.- 2006.- № 2.- С. 44-49.
44. Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Магда И.И. Функциональные сбои персонального компьютера при воздействии электромагнитных импульсов сверхкороткой длительности. // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.modtop.ru/node/33849>.