

Исследования воздействия радиочастотного и ионизирующего излучений на микроконтроллер ATmega8515

© А.П. Степовик, Е.Ю. Шамаев, В.В. Отставнов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина,
456770 Снежинск, Челябинская обл., Россия
e-mail: dep5@vniitf.ru

(Поступило в Редакцию 2 марта 2018 г.)

Представлены результаты исследований действия сверхширокополосного и тормозного излучений на сложно-функциональное устройство типа ATmega8515 в радиопрозрачном корпусе. Показано, что реакция микроконтроллера на облучение в обоих случаях близкая: реализуется кратковременный сбой в работе или зависание. Реализация эффектов зависит от момента действия излучений относительно фазы генерируемого микроконтроллером меандра. В то же время результат облучения тормозным излучением зависит и от экспозиционной дозы, что может приводить как к уширению генерируемой фазы сигнала, так и к зависанию устройства.

DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47183.153-18

Введение

В настоящее время в современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) используются сложные устройства на основе новых перспективных компонент микроэлектроники, в частности больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных микросхем. Исследования физических процессов в подобных устройствах при действии ионизирующего излучения (ИИ) проводятся уже не одно десятилетие. Однако в последние годы одной из насущных проблем стала проблема их устойчивости к действию радиочастотных излучений: СВЧ, сверхкоротких (СК), сверхширокополосных (СШП) импульсов электромагнитного излучения (ЭМИ). Ее появление связано как с потенциальной террористической угрозой, так и с возможной разработкой радиочастотного оружия. На эту тему опубликовано большое количество работ, в которых показана опасность действия СШП ЭМИ, например, [1–3]. Как было получено авторами, реакция одного из сложно-функциональных компонентов — микроконтроллера (МК) на их действие заключается в появлении различного рода сбоев в работе, от однократного с самовосстановлением до так называемого „зависания“, когда для восстановления работоспособности необходимо вмешательство оператора.

Не исключено, что одни и те же компоненты микроэлектроники могут применяться как в условиях действия ИИ, так и при действии радиочастотного излучения. Отсюда представляет интерес рассмотрение их поведения в условиях раздельного действия этих факторов.

1. Методические вопросы проведения исследований

Для исследований был выбран МК широкого применения в радиопрозрачном корпусе ATmega8515. Такие

устройства обладают свойствами миникомпьютера, и они являются основой блоков управления большого количества электронных систем. Отсюда сбой функционирования МК может привести к сбою или отказу в работе этих систем. Последствия реализации такого сценария могут быть самыми разными: от необходимости перезапуска системы до катастрофического отказа, если система выполняла жизненно важные функции.

Выбор конкретного типа МК был обусловлен двумя факторами:

- полученными авторами данными о возможности сбоя в его работе при облучении пачками СК (длительность 0.1 ns) СШП ЭМИ [4];

- имеющимися литературными данными о его радиационной стойкости (примерно 10 kR) к действию ИИ, полученными в условиях стационарного облучения на источнике Cs¹³⁷ [5].

МК ATmega8515 состоит из большого количества функциональных блоков, которые условно можно разделить на несколько групп: вычислительное ядро, подсистема памяти, периферийные устройства, система тактирования, выходные буферы. В состав вычислительного ядра входят арифметико-логическое устройство (ALU), регистры текущего состояния и контроля, оперативно-запоминающее устройство (ОЗУ), регистры общего назначения и т.д. При подаче питания на МК происходит процедура инициализации ядра, включающая первоначальную настройку оборудования согласно параметрам изготовителя. Затем происходит загрузка программы, записанной во внутреннюю флэш-память.

В составе МК ATmega8515 содержится 5 портов, из которых 4 — стандартные восьмиразрядные, а один порт имеет 3 вывода. При проведении экспериментов использовали только порт А (активный порт был сконфигурирован как выход), остальные находились в Z-состоянии. Для контроля функционирования МК была написана программа, которая выполняла инкремент значения

регистратора PORTA в бесконечном цикле [4]. Тактирование осуществлялось от внутреннего RC-генератора с частотой 8 МГц. Штатная работа МК характеризовалась периодической сменой логических состояний (период $\sim 1.2 \mu\text{s}$), что на экране осциллографа регистрировалось как меандр бесконечной длительности, а функциональный сбой — его прекращение на разный промежуток времени.

При облучении СШП ЭМИ использовали пачки из 100 импульсов, которые следовали в них с частотой 1 кГц, что связано с малой вероятностью сбоя работы МК одиночным импульсом. Облучение ИИ (тормозным излучением, ТИ) проводили одиночными импульсами на мощной импульсной электронной установке [6], поскольку такой режим является для нее рабочим. В этих условиях частота тактирования 8 МГц была более предпочтительной: как было получено, вероятность сбоя МК данного типа увеличивается с ростом частоты.

2. Облучение СШП ЭМИ

Экспериментальные исследования были проведены в безэховой камере с использованием генератора ЭМИ СВЧ-диапазона на основе сверхсветового источника [7,8] с длительностью излучения на уровне $\sim 10^{-10}$ с и напряжением на генерирующем фотодиоде (ФД) ~ 64 кВ. При таком напряжении соответствующий диапазон излучаемых частот составляет примерно 1–30 ГГц. Вспомогательное оборудование (источник питания МК — аккумуляторная батарея и линейный стабилизатор) разместили в экранированном прямоугольном корпусе. МК закрепили на кронштейне (стальной трубке), вмонтированном в одну из граней корпуса (рис. 1). Через трубку проходили линии связи для передачи информации на осциллограф и провода для подачи на него питания.

Ориентация экранирующего корпуса под углом 45° к направлению падения излучения обеспечивала отсутствие влияния его отражения от корпуса на тыльную сторону МК. Для измерений амплитуды напряженности электрического поля использовали датчик ИППЛ-Л1 [9]. Диапазон изменения напряженности в месте расположения МК 65–180 кВ/м, погрешность ее измерений обу-

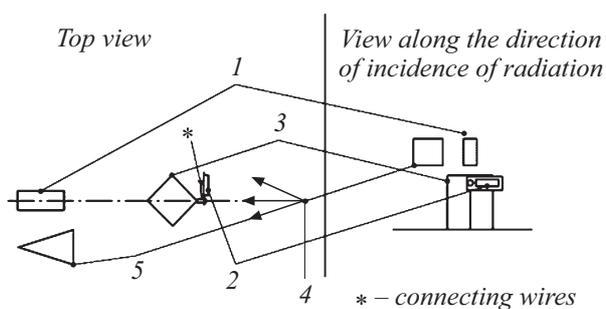


Рис. 1. Схема проведения экспериментов с СШП ЭМИ: 1 — датчик ИППЛ-Л1, 2 — МК, 3 — корпус устройства, 4 — ФД, 5 — рупорная антенна П6-123А.

словлена в основном погрешностью калибровки датчика ($\pm 10\%$), относительная погрешность 1–3%.

Ввиду большой скважности СК-импульсов ($\sim 10^7$), одновременное отображение на развертке осциллографа момента действия излучения и меандра достигалось с помощью интегрирующей схемы, используемой персоналом источника для относительных измерений их амплитуды при следовании с частотой 1 кГц. Схема состоит из рупорной антенны П6-123А для приема излучения и интегрирующей цепи с входным резистором 1 М Ω на входе цифрового осциллографа типа Tektronix. После каждого облучения осциллограммы записывались в стандартные для данного типа осциллографа файлы с расширением *wfm*.

МК облучали в состоянии поставки, внешние выводы перпендикулярны его корпусу и вектору электрической компоненты поля, большая сторона корпуса параллельна ему. В результате излучение принималось только его внутренними дорожками [4]. С целью повышения статистической достоверности результатов количество повторений облучений в одинаковых условиях составляло 100 раз.

На рис. 2 приведены осциллограммы некоторых наблюдаемых видов сбоя. Термином „зависание“ обозначили такой вид, при котором восстановление периодической смены состояний, наблюдаемое на длительности развертки осциллографа, после окончания действия пачки импульсов не происходило. Термином „ δ -сбой“ обозначили сбой с длительностью, меньшей 1 мс — периода следования импульсов в пачке. Как видно из рис. 2, наблюдается большое разнообразие сбоев МК разной длительности на протяжении действия пачки. Однако несмотря на это существуют только два кардинально различающихся вида сбоя: зависание и δ -сбой, остальные отличаются только длительностью, которая может изменяться от единиц до десятков мс.

Были проведены исследования зависимости реализации различных эффектов в МК от величины напряженности поля, в частности, приведенных на (рис. 3).

На основании данных экспериментов было получено, что зависание является пороговым эффектом: оно реализуется в $\sim 100\%$ случаев при однократном сбое и минимальной величине напряженности поля. В то же время уже относительно небольшое (на $\sim 10\%$) увеличение напряженности поля приводит к росту вероятности возникновения многократного сбоя и в результате возможности восстановления работы МК. По-видимому, при этих напряженностях амплитуд электрических напряжений, наводимых на внутренних дорожках МК [4], достаточно, чтобы переход в него произошел, но самостоятельно, без вмешательства извне или работы заложенной программы или воздействия остальных импульсов пачки он из этого состояния выйти не может. Переход в зависание напоминает защелку — тиристорный эффект в КМОП полевых транзисторах. Необходимо отметить, что данный эффект скорее всего связан с наведенными потенциалами на выводе „reset“

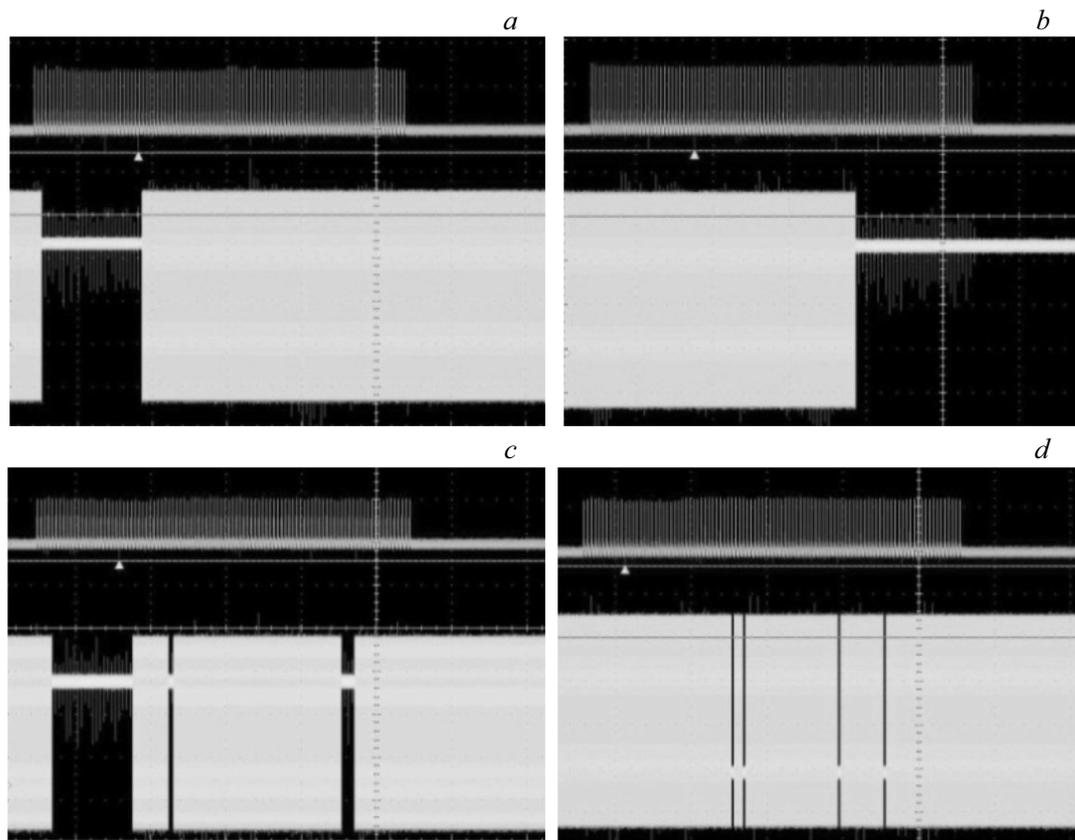


Рис. 2. Типичные виды зарегистрированных сбоев МК. Верхний луч — пачка импульсов излучения (длительность пачки 100 ms), нижний луч — меандр периодической смены логических состояний. *a* — однократный с восстановлением; *b* — однократный с зависанием; *c* — многократный с восстановлением; *d* — многократные δ -сбои с восстановлением.

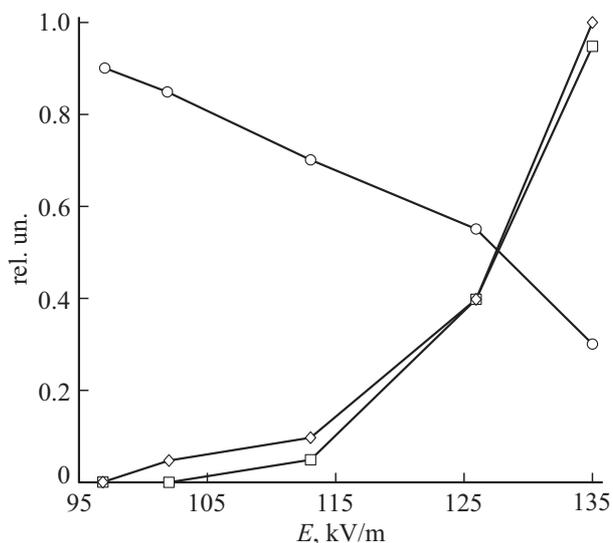


Рис. 3. Изменение долей некоторых видов сбоев МК в общей их совокупности в зависимости от напряженности поля. ○ — доля зависаний, □ — доля δ -сбоев, ◇ — доля многократных сбоев.

и не связан с увеличением тока потребления, как при тиристорном эффекте.

Одной из основных задач исследований являлось выяснение условий, необходимых для реализации сбоя в работе МК. Было предположено, что одним из условий может быть существование определенных временных соотношений между моментом действия излучения и фазой работы МК, когда действие электрических напряжений, возникающих на выводах его схемы, будет наиболее эффективным с точки зрения реализации сбоя (подобный эффект частично описан в [2]).

Было исследовано большое количество осциллограмм на выходе МК при разных напряженностях поля. Как и ожидали, импульс излучения случайным образом действовал в разные моменты времени: в фазе логической „единицы“ или „нуля“ или, что очень редко, в момент перехода из одного состояния в другое. Как правило, при действии эффективного импульса излучения в фазе „нуля“, происходил переход на высокий уровень и, наоборот, при действии в фазе „единицы“ происходил переход на низкий уровень.

Измерения произвольной выборки временных интервалов Δt между моментом последнего (предсбойного) переключения с одного логического уровня на другой и моментом действия эффективного импульса излучения показали следующее. Величина Δt составила 0.45–0.5 μ s при длительности половины периода меандра 0.62 μ s, и она сопровождалась значительный

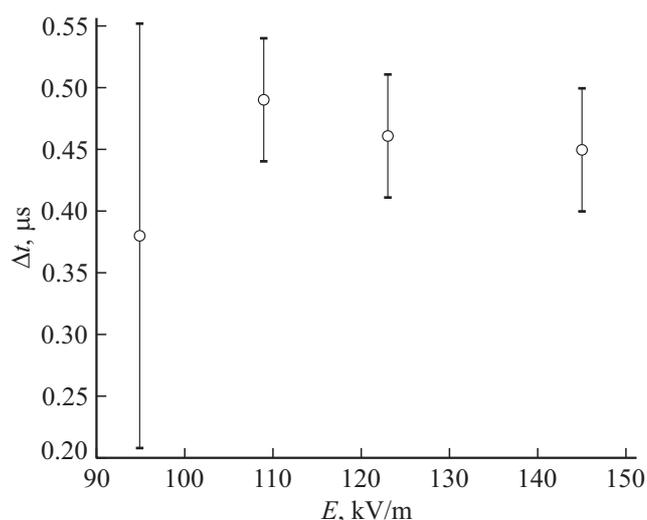


Рис. 4. Зависимость временной задержки Δt между моментом действия СШП излучения и фазой генерации меандра, приводящей к сбою.

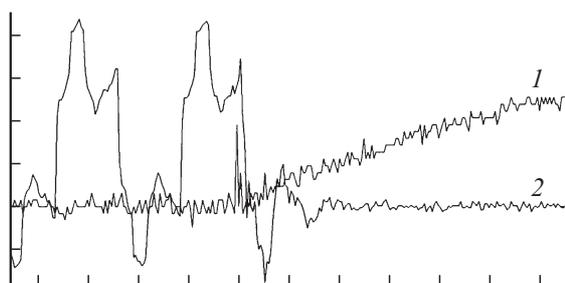


Рис. 5. Оциллограмма меандра (2) — реализация длительного сбоя с наложенным изображением интеграла действующего импульса излучения (1). Время — 500 ns/div. Амплитуда — 0.5 V/div.

разбросом данных при низких уровнях напряженности поля (разброс посчитан на основе выборок из 20 сбоев для каждой серии) (рис. 4). Такой разброс явился следствием сложности точного измерения времени из-за помехового сигнала, наложенного на меандр (рис. 5).

3. Действие тормозного излучения

При исследованиях действия ТИ МК располагали напротив анода ускорительной трубки установки. Величину экспозиционной дозы облучения изменяли с использованием поглотителя из свинца разной толщины, который размещали перед МК, в некоторых случаях изменяли и расстояние до анода установки. Погрешность измерения экспозиционной дозы составляла $\pm 20\%$.

На рис. 6 приведены оциллограммы сигнала с выхода МК и амплитудно-временного профиля ТИ, полученных в пусках при изменении дозы D и мощности дозы его облучения P .

Характерными особенностями осциллограмм сигналов на выходе МК (рис. 6) являются:

— при малой величине дозы (\sim единицы Röntgen) изменения длительности генерируемых фаз не отмечали, т. е. сбоя в работе МК нет;

— при увеличении дозы и действии ТИ в фазе „нуля“ (рис. 6, *a*) или „единицы“ (рис. 6, *b*) происходит увеличение длительности этой фазы — нарушение штатной работы.

В то же время случались события, когда изменялись длительности обеих фаз. Как видно из осциллограммы (рис. 6, *c*), при величине дозы 24 R излучение действовало в момент перехода МК из фазы генерации „единицы“ в фазу „нуля“, что привело к увеличению длительностей обеих фаз. Дальнейшее увеличение дозы ТИ в такой же момент его действия привело к реализации зависания (рис. 6, *d*).

Несмотря на небольшое количество данных для их статистической обработки (число пусков мощной установки ТИ всегда ограничено), можно проанализировать полученные результаты с точки зрения влияния на реакцию МК момента действия излучения. Как видно из рис. 6, наблюдали два вида эффектов: уширение генерируемых фаз сигналов, которое квалифицировали как сбой в работе, и зависание. Зависание — это наиболее радикальный эффект, и оно возникало при действии ТИ в следующие моменты времени:

- в момент переключения из „нуля“ в „единицу“ или наоборот;
- в момент генерации „единицы“ через 0.3–0.4 μ s от начала этой фазы;
- в момент генерации „нуля“ через 0.5 μ s от начала этой фазы.

Таким образом, видно, что существует определенная связь между генерируемой МК-фазой и его реакцией на облучение при зависании. В остальных случаях наблюдали уширение генерируемой фазы на величину от 0.15 до 1–1.1 μ s.

Все наблюдаемые эффекты зависят и от величины дозы облучения МК. Так, до величины дозы ~ 25 R зависание не зарегистрировано, свыше 46 R, включая и это значение (в диапазоне доз 25–45 R данные не получены), зависание регистрировали во всех случаях.

Несмотря на единичные реализованные случаи, необходимо обратить особенное внимание на действие ТИ в моменты смены фаз с „нуля“ на „единицу“ и наоборот. Как было получено, это — наиболее важные фазы, с точки зрения влияния на реакцию МК. Так, облучение ТИ, момент действия которого совпал с переходом из „нуля“ в „единицу“, привело к реализации зависания при дозе 6 R, что почти на порядок ниже, чем зарегистрировано в других случаях. В то же время, когда излучение действовало в момент перехода из „единицы“ в „ноль“, при дозе 82 R реакция МК зарегистрирована не была. Отсюда видно, что момент действия излучения относительно фазы работы МК оказывает существенное влияние на его реакцию, что совпадает с результатами,



Рис. 6. Осциллограммы сигналов при действии ТИ. Верхний луч — сигнал с выхода МК (1 V/div), нижний луч — временной профиль ТИ. *a* — $D = 13 R$, $P = 2.6 \cdot 10^8 R/s$; *b* — $D = 25 R$, $P = 5.6 \cdot 10^8 R/s$; *c* — $D = 24 R$, $P = 5 \cdot 10^8 R/s$; *d* — $D = 120 R$, $P = 2.7 \cdot 10^9 R/s$. Время — 500 ns/div.

полученными при воздействии СШП-излучения. Таким образом, показано, что реакция МК на действие ТИ зависит и от величины дозы облучения, и от момента действия ТИ относительно фазы его работы.

4. Действие импульсов электрического напряжения

Для выяснения реакции МК на действие импульсов электрического напряжения с длительностью, близкой к длительности действия ТИ, были проведены исследования в лабораторных условиях при количестве повторений воздействия, равном 200; схема измерений представлена на рис. 7. Изменяли длительность импульса напряжения и его амплитуду. Импульс подавали в цепь питания МК, а для исключения его шунтирования конденсаторами источника питания использовали защиту в виде индуктивности обмотки L импульсного трансформатора МИТ-12.

В табл. 1 и 2 приведены данные о реакции МК на действие импульсов. Указаны: амплитуда импуль-

са U (V); вероятность сбоя или зависания (%); промежуток времени между моментом смены фазы меандра и воздействием (от спада — переход из „единицы“ в „ноль“, от фронта — переход из „нуля“ в „единицу“, μs); величина уширения генерируемой фазы (μs).

Из табл. 1 следует, что при длительности импульса 20 ns:

- при амплитуде напряжения 200 V реализуется только сбой;
- с увеличением амплитуды импульса увеличивается вероятность сбоя, и реализуются случаи зависания;
- вероятность сбоя выше, чем зависания.

Как следует так же из табл. 1, сбой реализуется:

- при действии импульса напряжения через 0.3–0.45 μs от начала генерации „нуля“, и это приводит к уширению фазы на половину периода меандра;
- при действии импульса напряжения в фазе генерации „единицы“ в большинстве случаев наблюдается уширение на 0.62 или 0.75 μs через 0.45 μs от фронта.

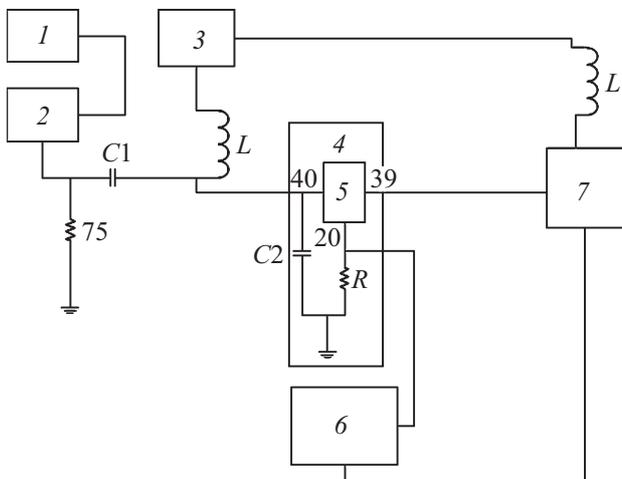
При длительности импульса 50 ns (табл. 2) вероятности реализации сбоя или зависания такого же уровня по величине и с теми же временными интервалами,

Таблица 1. Параметры, характеризующие реакцию МК на действие импульсов напряжения длительностью 20 ns разной амплитуды

U, V	Сбой					Зависание		
	Вероятность сбоя, %	Генерация „нуля“		Генерация „единицы“		Вероятность зависания, %	От спада, μs	От фронта, μs
		От спада, μs	Уширение, μs	От фронта, μs	Уширение, μs			
200	2	0.33	0.62	0.45	0.62; 0.75	0	–	–
212	3.5	0.3–0.4	0.62	0.45	0.75	3.5	0.55	0.56
300	8	0.3–0.45	0.62	0.3–0.45	0.62	5	0.55	0.57

Таблица 2. Параметры, характеризующие реакцию МК на действие импульсов напряжения длительностью 50 ns разной амплитуды

U, V	Сбой					Зависание		
	Вероятность сбоя, %	Генерация „нуля“		Генерация „единицы“		Вероятность зависания, %	От спада, μs	От фронта, μs
		От спада, μs	Уширение, μs	От фронта, μs	Уширение, μs			
250	2.5	0.3–0.42	0.62	0.3–0.45	0.62–0.68	5.5	0.55	0.55–0.6
270	6	0.3–0.42	0.63–0.75	0.3–0.42	0.63–0.75	4.5	0.53	0.55

**Рис. 7.** Электрическая схема измерений: 1 — генератор запуска Г5-54, 2 — генератор импульсов напряжения Г5-13, 3 — источник питания Б5-7, 4 — корпус для размещения МК, 5 — МК, 6 — цифровой осциллограф TDS 2014, 7 — эмиттерный повторитель, R — резистор нагрузки МК, L — обмотка импульсного трансформатора МИТ-12.

т.е. существенные отличия во временных зависимостях отсутствуют. Тем не менее эти измерения необходимо было провести, поскольку в этом диапазоне времен изменялась и длительность ТИ.

5. Обсуждение результатов

Из приведенных результатов видно, что при действии импульса электрического напряжения или при облучении ТИ или при действии СШП ЭМИ реакция МК близкая: наблюдается сбой в работе (уширение генерируемой фазы меандра) или зависание. Более того, временные интервалы между моментом смены фаз меандра и действием этих помеховых факторов (Δt), при которых наблюдаются эффекты их воздействия, во всех случаях достаточно близки: 0.3–0.45 μs — для электрического импульса; 0.3–0.5 μs — для ТИ; 0.45–0.5 μs — для СШП ЭМИ.

Как следует из табл. 1 и 2, при действии импульса напряжения генератора зависание реализуется через $\sim 0.55 \mu s$ от момента перехода генерируемой „единицы“ в „ноль“, или через это же время от перехода „нуля“ в „единицу“, т.е. в непосредственной близости к смене фазы генерации меандра (за $\sim 0.07 \mu s$ до очередной смены при длительности половины периода генерации $\sim 0.62 \mu s$). Анализ, проведенный на основе результатов, полученных при действии СШП ЭМИ, показал, что зависание реализуется при практически таком же временном интервале между моментом смены фаз в меандре и моментом действия излучения, так же, как и при действии ТИ. Таким образом, можно констатировать близость моментов действия всех помеховых факторов

относительно фазы генерации меандра МК, приводящих к нарушению его работы, заложенной в программу.

Тем не менее существуют и различия между реакциями МК на действие этих факторов. В случае действия однократных электрических импульсов или одиночного импульса ТИ уширение генерируемой фазы меандра составляет величину, близкую к половине его периода для электрических импульсов ($0.62-0.75 \mu\text{s}$) или находится в диапазоне $0.15-1.1 \mu\text{s}$ — при действии ТИ. К сожалению, реально возможное относительно небольшое количество пусков установки ТИ не позволило оценить эту величину более точно. Можно только предположить, что уширение зависит от дозы (мощности дозы) облучения ТИ.

Как указано выше, в случае СШП ЭМИ исследования были проведены при действии пачек импульсов. Существование различных комбинаций между моментом действия очередного импульса пачки и генерируемыми импульсами меандра, при наличии эффекта восстановления генерации одним из импульсов излучения, приводит к сложной связи между импульсами пачки и длительностью сбоя в работе МК. Она изменяется в пределах от δ -сбоя до нескольких десятков ms . Поэтому сравнение длительности такого сбоя с уширением при действии электрического импульса или ТИ становится некорректным.

Тем не менее можно предложить следующий механизм воздействия, который приводит к сбою в работе МК во всех исследуемых ситуациях, а именно изменение режима работы его электрической схемы. Так, при действии короткого (десятки ns) импульса электрического напряжения с амплитудой, много большей напряжения питания 5V , изменяется величина напряжения питания, в результате чего некоторые компоненты схемы могут оказаться в насыщении, что приводит к появлению интервала времени микросекундного диапазона, требуемого для восстановления штатного режима работы МК. Амплитуда „порогового“ напряжения составляет около 200V . Превышение этого значения приводит к реализации зависания. Здесь отметим, что, как и в случае СШП ЭМИ, существенна пороговость значения этой амплитуды.

При действии СШП ЭМИ источником паразитных напряжений и токов являются элементы многослойной разводки МК. Скорость стекания паразитного заряда напрямую зависит от текущего электрического режима активного элемента схемы, к которому подключен элемент разводки. Поэтому время релаксации может варьировать в значительных пределах.

При облучении ТИ изменение режима работы достигается за счет возникающей проводимости кристалла полупроводника: при его ионизации в электрической схеме появляются дополнительные носители тока. Время их релаксации и восстановления работы схемы при сбое определяется временем жизни носителей заряда в кремнии и не зависит от режима работы прибора. Оно не превышает периода меандра, что близко к реакции

МК на действие импульса электрического напряжения с длительностью ТИ.

Была проведена так же оценка радиационной стойкости МК типа АТmega8515. Суммирование доз ТИ в пусках установки, в которых исследовали его реакцию на воздействие, показало, что была достигнута доза облучения МК около 5kR (доза изменялась в пусках от 6 до 800R), что ниже величины, приведенной в [5]. Для уточнения допустимой дозы, при которой по использованной методике контроля еще не фиксируется необратимое нарушение работоспособности МК (статический ток потребления не увеличивается), были проведены дополнительные пуски установки. В конечном итоге величина достигнутой дозы составила свыше 24kR , и необратимые изменения не отмечены.

После набранной этой величины дозы было проведено перепрограммирование МК с использованием внутренней флэш-памяти, которое подтвердило сохранение его работоспособности. В [5] отказ флэш-памяти в МК наблюдали при дозе 4.7 и 9.5kR (для разных образцов), облученных в пассивном режиме, и при 11 и 13kR (для разных образцов) при облучении в активном режиме. Это позволяет утверждать, что при импульсном облучении МК данного типа (диапазон изменения величины дозы во всех пусках составил от 6 до 5400R) его радиационная стойкость значительно выше, чем при стационарном.

Заключение

Впервые исследована в динамическом режиме одна из сложно-функциональных интегральных микросхем — МК на раздельное воздействие ТИ и СШП ЭМИ. В числе наиболее интересных и значимых итогов получено, что, несмотря на зависимость результатов действия ТИ от дозы облучения МК, его реакция на действие ионизации близка к реакции на действие СШП ЭМИ.

Наиболее критичным моментом действия излучений является смена генерируемых фаз меандра, т.е. совпадение момента действия излучений с фронтом или спадом генерируемой фазы. Наличие этого эффекта зарегистрировано и в условиях действия импульсного напряжения в цепь питания МК. Отличительной чертой этих экспериментов было то, что, как правило, величина уширения фазы при сбое была близка к половине периода генерируемого меандра.

Предложен механизм воздействия исследованных помеховых факторов на функционирование МК, который приводит к сбою в его работе, а именно изменение режима работы его электрической схемы.

Полученные данные позволяют также утверждать, что при импульсном облучении МК данного типа его радиационная стойкость значительно выше, чем при стационарном облучении: величина достигнутой дозы без проявления необратимых нарушений в работоспособности составила свыше 24kR , т.е. получено превышение дозы свыше двух раз по сравнению с результатами [5].

Список литературы

- [1] *Camp M., Gerth H., Garbe H., Haas H.* // IEEE Trans. on EMC. 2004. Vol. 46. N 3. P. 368–379.
- [2] *Clarke T., French D.* // Proceeding of ICEAA Conference, Torino, Italy, 2012. D04X.
- [3] *French D.M., Clarke T.* // AMEREM-2014. Book of Abstracts. ID096. University of Albuquerque, New Mexico, USA. July 27–31. 2014.
- [4] *Степовик А.П., Шамаев Е.Ю., Арманов М.М.* // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 8. С. 812–818.
- [5] *Лоскутов И.О., Калашников А.А., Некрасов П.В.* // 20-я научно-техническая конф. „Радиационная стойкость электронных систем — СТОЙКОСТЬ-2017“. Лыткарино, 6–7 июня 2017. Тезисы докладов. 2017. С. 196–197.
- [6] *Лаврентьев Б.Н., Мунасыпов Р.Н., Павловских Д.Е.* и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Вып. 2. С. 105–109.
- [7] *Лазарев Ю.Н., Петров П.В.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. Вып. 5. С. 1689–1707.
- [8] *Кондратьев А.А., Лазарев Ю.Н., Потапов А.В.* и др. // ДАН. 2011. Т. 438. № 5. С. 615–618.
- [9] *Сахаров К.Ю.* Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерения их параметров. М.: Московский гос. ин-т электроники и математики, 2006. 159 с.