

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.382

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СБОЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СВЕРХКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ УСЛОВИЙ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

© 2019 г. А. П. Степовик^{1, *}, М. М. Арманов¹, Е. Ю. Шамаев¹, А. А. Кондратьев¹,
И. А. Сорокин¹, Е. В. Заволоков¹

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина,
Российская Федерация, 456770 Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

*E-mail: dep5@vniitf.ru

Поступила в редакцию 20.11.2017 г.

После доработки 20.12.2017 г.

Принята к публикации 21.01.2018 г.

Исследован функциональный сбой микроконтроллера (МК) ATmega 8515 при действии пачек сверхкоротких импульсов и частотах тактирования 1, 8 и 15 МГц. Проведен анализ вероятностей возникновения видов сбоя в его работе, их связи с частотой тактирования и величиной напряженности поля. Показана корреляция сбоя с фазой работы МК. Продемонстрировано, что с использованием известных математических моделей можно исследовать, по крайней мере качественно, поведение сложных электронных систем.

DOI: 10.1134/S0033849419050127

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью исследований обратимых эффектов в микроэлектронных устройствах, возникающих при действии сверхкоротких сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СК СШП ЭМИ), является изучение физики их возникновения и степени влияния на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА). Однако экспериментальные и расчетные работы, проводимые в этой области, касаются в основном относительно простых интегральных микросхем (см., например, [1–3]). Результаты исследований сложных устройств типа микроконтроллера (МК) опубликованы в относительно небольшом числе работ (см., например, [4–7]).

В работе [7] были рассмотрены вероятностные характеристики возникновения обратимого функционального сбоя МК при частоте внутреннего тактирования 1 МГц без анализа его особенностей. В то же время одним из важных вопросов является влияние соотношения между частотой следования импульсов излучения и временными характеристиками переходных процессов, связанных с работой облучаемого устройства. В частности, возможно, что важную роль играет частота тактирования МК, которая в той или иной степени может характеризовать эти процессы.

Целью данной работы является анализ вероятностей возникновения различных видов сбоя в работе МК и их связи с частотой тактирования, величиной напряженности поля.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты были выполнены в безэховой камере с использованием генератора ЭМИ СВЧ-диапазона на основе сверхсветового источника [8, 9] с длительностью излучения на уровне $\sim 10^{-10}$ с при напряжении на генерирующем фотодиоде (ФД) ~ 64 кВ. Соответствующий диапазон излучаемых частот составлял примерно 1...30 ГГц. Вспомогательное оборудование (источник питания МК – аккумуляторная батарея и линейный стабилизатор) разместили в экранированном прямоугольном корпусе. МК был закреплен на кронштейне (стальной трубке), вмонтированном в одну из граней корпуса (рис. 1). Через трубку проходили линии связи (витая пара) для передачи информации на осциллограф и провода для подачи на него питания. Сравнение экспериментальных результатов, полученных с использованием витой пары и волоконно-оптической линии связи, показало, что такая замена не вносит значимых погрешностей.

Ориентация экранирующего корпуса под углом 45° к направлению падения излучения обеспечивала отсутствие влияния отражения от корпуса на тыльную сторону МК. Амплитуду напряженности электрического поля E измеряли с помощью датчика ИППЛ-Л. Диапазон изменения E в месте расположения МК составляла 65...180 кВ/м, погрешность ее измерений была обусловлена в основном погрешностью калибровки датчика ($\pm 10\%$), относительная погрешность составляла 1...3%.

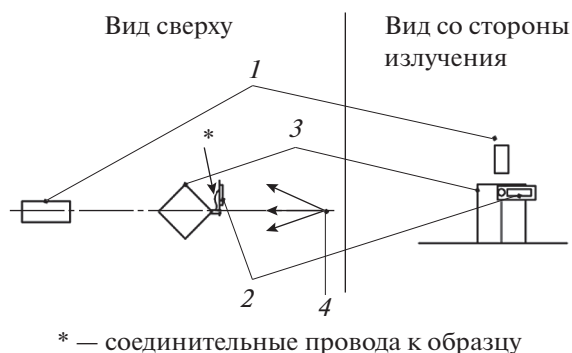


Рис. 1. Схема проведения экспериментов с СШП ЭМИ: 1 – ИППЛ-Л; 2 – МК; 3 – корпус устройства; 4 – ФД.

Для контроля функционирования МК была написана программа, которая выполняла инкремент значения регистра PORTA в бесконечном цикле. Сигнал вывода младшего бита регистра выводили из безэховой камеры и подавали на осциллограф. Тактирование МК с частотой 1 и 8 МГц осуществляли от внутреннего RC-генератора, а с частотой 15 МГц – от внешнего. Штатную работу МК характеризовали периодической сменой логических состояний, что на экране осциллографа имело вид меандра бесконечной длительности, а сбой работы – его прекращение на разный промежуток времени. Ввиду большой скважности СК СШП ЭМИ ($\sim 10^7$), одновремен-

ное отображение на развертке осциллографа импульса ЭМИ и сигнала с вывода МК достигалось с помощью интегрирующей схемы, используемой для относительных измерений амплитуды СШП ЭМИ, следующих в килогерцовой последовательности. После очередного облучения осциллограммы записывали в стандартные, для данного типа осциллографа, файлы с расширением wfm.

Эксперименты по облучению МК выполняли в двух вариантах: 1) в состоянии поставки и 2) на печатной плате, изготовленной по стандартной технологии (печатная плата – вариант 1 [7]). Внешние выводы МК были перпендикулярны корпусу и вектору электрической компоненты поля, который в свою очередь был параллелен большой стороне корпуса. В первом варианте излучение *принималось* только внутренними дорожками МК, а во втором – и дорожками печатной платы. С целью повышения статистической достоверности результатов количество повторений облучений в одинаковых условиях составляло 100 раз.

1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ ПО СБОЮ МК

На рис. 2 приведены осциллограммы некоторых наблюдаемых видов сбоя. Термин “зависание” обозначает такой вид сбоя, при котором восстановления периодической смены состояний, наблюдаемое на длительности развертки осцилло-

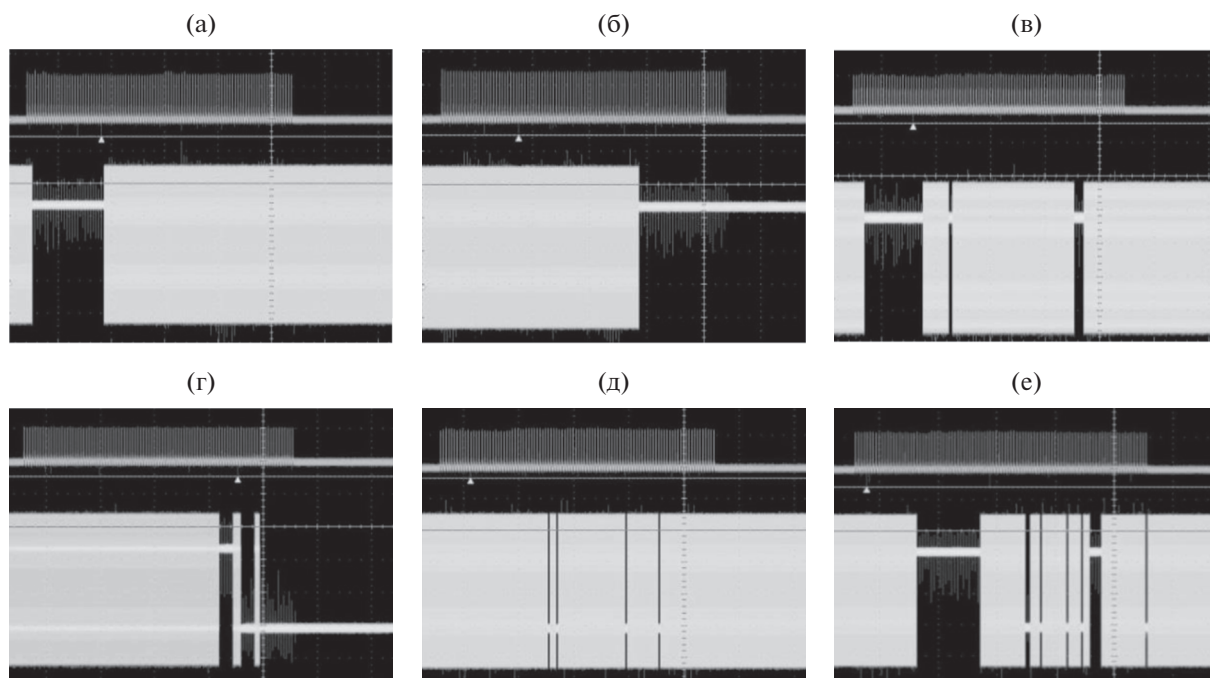


Рис. 2. Типичные виды зарегистрированных сбоев МК: а – однократный с восстановлением; б – однократный с зависанием; в – многократный с восстановлением; г – многократный с зависанием; д – многократный δ -сбоями с восстановлением; е – многократный с δ -сбоями и восстановлением. Верхний луч – пачка импульсов излучения, нижний луч – меандр периодической смены логических состояний. Цена большого деления развертки 20 мс.

Таблица 1. Количественные данные о наблюдаемых эффектах в МК, облучаемого в состоянии поставки, при частоте тактирования 1 МГц и различных амплитудах напряженности поля E

Результат облучения	E , кВ/м							
	95	101	107	116	128	138	151	178
Вероятность сбоя, %	–	19	23	19	29	31	39	17
Количество сбоев	–	19	26	20	31	35	40	20
Количество пусков с δ -сбоями, %	–	0	0	0	0	0	0	0
Зависание, %	–	95	80	50	45	50	75	77
Зависание при однократном сбое, %	–	100	100	90	85	95	95	80
Восстановление, %	–	5	20	50	55	50	25	23
Однократный сбой, %	–	100	90	95	95	90	95	80
Множественный сбой, %	–	0	10	5	5	10	5	20

Таблица 2. Количественные данные о наблюдаемых эффектах в МК, облучаемого в состоянии поставки, при частоте тактирования 8 МГц и различных амплитудах напряженности поля E

Результат облучения	E , кВ/м					
	90	97	102	113	126	135
Вероятность сбоя, %	0	12	41	49	71	100
Количество сбоев	–	12	43	62	110	644
Количество пусков с δ -сбоями, %	–	0	0	5	40	95
Зависание, %	–	90	85	70	55	30
Зависание при однократном сбое, %	–	100	94	83	65	0
Восстановление, %	–	10	15	30	45	70
Однократный сбой, %	–	100	95	90	60	0
Множественный сбой, %	–	0	5	10	40	100

графа, после окончания действия пачки импульсов не происходило. Термин “ δ -сбой” обозначает сбой с длительностью, меньшей 1 мс – периода следования импульсов в пачке. Как видно из рис. 2, наблюдается большое разнообразие сбоев разной длительности МК на протяжении действия пачки.

Основные количественные данные, полученные при частотах тактирования 1 и 8 МГц и разных величинах амплитуды напряженности поля, приведены в табл. 1 и 2 для МК в состоянии поставки, а в табл. 3–5 – при облучении на печатной плате. Для всех таблиц приняты следующие обозначения:

“вероятность сбоя” – количество случаев сбоя МК на 100 повторений действия пачек, интегральная вероятность [7];

“количество сбоев” – общее число сбоев МК на протяжении действия пачки при 100 ее повторениях;

“зависание” – относительное количество случаев реализации этого вида сбоя, как конечной стадии реакции МК, на 100 повторений действия пачек импульсов;

“восстановление” – относительное количество случаев восстановления работы МК, как ко-

нечной стадии его реакции, на 100 повторений воздействия пачки (разность между единицей и вероятностью зависания);

“количество зависаний при однократном сбое” – относительное число из общего числа зависаний, как единственной реакции МК на 100 повторений воздействия пачки импульсов.

2. СВЯЗЬ ВИДА СБОЯ С ЧАСТОТОЙ ТАКТИРОВАНИЯ

На рис. 3 представлены зависимости интегральной вероятности сбоя функционирования МК в состоянии поставки при частотах тактирования 1 и 8 МГц от величины амплитуды напряженности поля. Для частоты 8 МГц приведены данные с учетом δ -сбоя и без него, для частоты 1 МГц δ -сбой никогда не отмечался. Из рис. 3 видно, что при частоте 1 МГц наблюдается слабый рост вероятности сбоя до ~40% в диапазоне амплитуд напряженностей 90...150 кВ/м с дальнейшим ее спадом при увеличении амплитуды, тогда как при частоте 8 МГц происходит непрерывный ее рост вплоть до величины ~100% при $E \approx 140$ кВ/м. Эти различия в поведении вероятностей начинаются со значения $E \sim 105$ кВ/м.

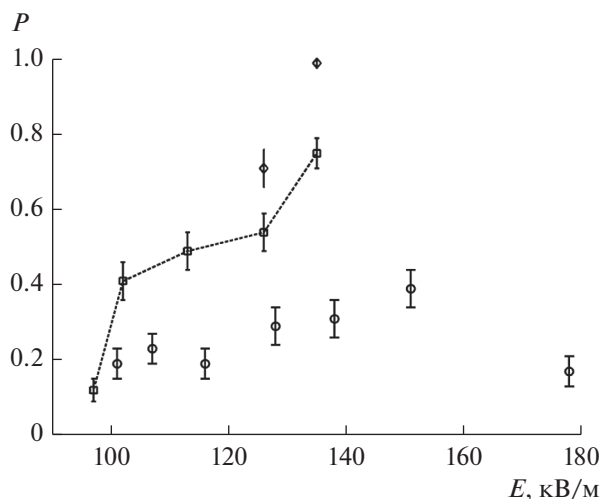


Рис. 3. Зависимости интегральной вероятности сбоя функционирования МК в состоянии поставки при частотах тактирования 1 и 8 МГц от амплитуды напряженности электрического поля: 1 МГц (кружки), 8 МГц без δ -сбоя, (квадратики), 8 МГц с δ -сбоем (ромбики).

Для выяснения связи между видами сбоя и частотой тактирования были построены зависимости вероятности их реализации от амплитуды на-

пряженности поля при разных частотах. На рис. 4 и 5 представлены зависимости долей сбоя в общей совокупности сбоев двух их видов (зависания и многократного сбоя) для МК в состоянии поставки и частот 1 и 8 МГц соответственно. Видно, что при данной частоте сбой преимущественно однократный, лишь при очень высокой амплитуде напряженности (~ 180 кВ/м) доля многократных сбоев достигает 20%.

Из рис. 4 и 5 также видно, что если для обеих частот тактирования в диапазоне $E \sim 95 \dots 130$ кВ/м изменение долей сбоя “зависание” близки (наблюдается ее спад от 90...95% до 45...50%), то при частоте 8 МГц с повышением напряженности доля зависаний продолжает быстро снижаться до 30% при $E \approx 115$ кВ/м, после чего доля многократных сбоев быстро растет до 100%. Одновременно с этим возникают δ -сбои, которые вносят значительный вклад в статистику многократных сбоев.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наряду с появлением δ -сбоя при частоте 8 МГц в этом диапазоне напряженностей изменяется и сам вид сбоя — он становится преимущественно многократным. Следовательно, можно предположить, что увеличение частоты тактиро-

Таблица 3. Количественные данные о наблюдаемых эффектах в МК, облучаемого на печатной плате, при частоте тактирования 1 МГц и различных амплитудах напряженности поля E

Результат облучения	E , кВ/м								
	65	89	93	108	109	125	146	146	157
Вероятность сбоя, %	0	7	35	30	34	18	24	26	22
Количество сбоев	—	7	38	31	35	18	27	27	22
Количество пусков с δ -сбоями, %	—	0	0	0	0	0	0	0	0
Зависание, %	—	85	75	53	73	50	75	60	36
Зависание при однократном сбое, %	—	85	85	93	96	90	90	93	100
Восстановление, %	—	15	25	47	27	50	25	40	64
Однократный сбой, %	—	100	90	95	95	90	90	95	100
Многократный сбой, %	—	0	10	5	5	10	10	5	0

Таблица 4. Количественные данные о наблюдаемых эффектах в МК, облучаемого на печатной плате, при частоте тактирования 8 МГц и различных амплитудах напряженности поля E

Результат облучения	E , кВ/м					
	85	95	106	109	123	145
Вероятность сбоя, %	6	38	40	40	83	100
Количество сбоев	6	41	48	44	191	502
Количество пусков с δ -сбоями, %	0	0	0	0	71	72
Зависание, %	100	80	72	75	34	52
Зависание при однократном сбое, %	100	93	83	93	50	15
Восстановление, %	0	20	28	25	66	62
Однократный сбой, %	100	95	85	90	35	5
Многократный сбой, %	0	5	15	10	65	95

Таблица 5. Количественные данные о наблюдаемых эффектах в МК, облучаемого на печатной плате, при частоте тактирования 15 МГц и различных амплитудах напряженности поля E

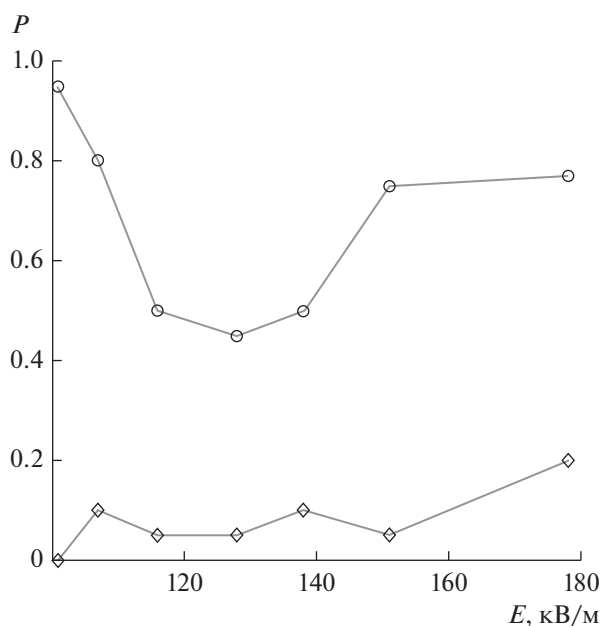
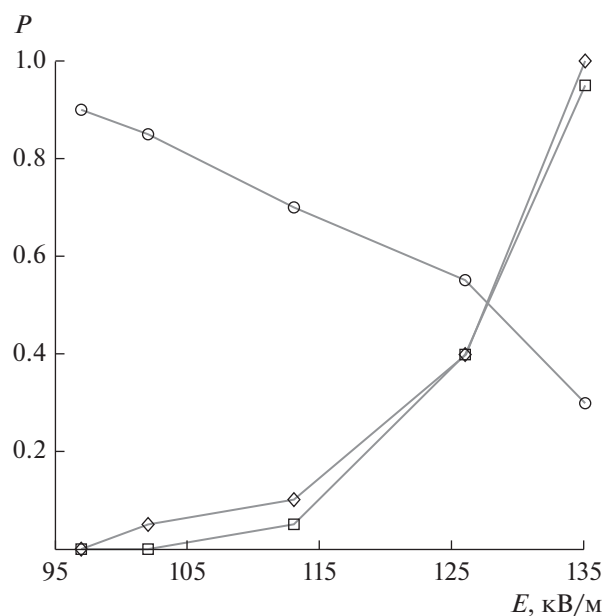
Результат облучения	E , кВ/м			
	87	97	111	120
Вероятность сбоя, %	13	10	34	100
Количество сбоев	13	10	42	165
Наличие δ -сбоев, %	Нет	10	20	72
Зависание, %	40	20	3	20
Зависание, приводящее к однократному сбою, %	100	100	0	10
Восстановление, %	60	80	97	80
Однократный сбой, %	100	100	80	5
Множественный сбой, %	0	0	20	95

вания приводит к реализации разных механизмов сбоя в работе МК в состоянии поставки.

На рис. 6 приведены зависимости доли многократного сбоя в общей их совокупности от величины амплитуды напряженности поля при разных частотах тактирования и облучении МК на печатной плате. Ранее было отмечено [7], что распайка МК на печатную плату приводит к сдвигу зависимостей интегральной вероятности его сбоя от величины амплитуды напряженности в сторону ее меньших значений. Это подтверждено и настоящими данными — сдвиг составил ~ 10 кВ/м.

Из данных рис. 6 следует, что если для частоты 1 МГц сбой преимущественно однократный во всем диапазоне напряженности поля (уровень 75...100%), то для частот 8 и 15 МГц наблюдается быстрый монотонный рост доли многократного сбоя от 0 до $\sim 90\%$. Таким образом, видно, что общий тренд вероятностей сбоя не зависит от того, как облучается МК — в состоянии поставки или на печатной плате.

На основании представленных выше данных можно сделать вывод, что при увеличении напряженности поля появляется связь между реализа-

**Рис. 4.** Изменение долей различных видов сбоев МК в состоянии поставки в общей их совокупности в зависимости от напряженности поля для частоты тактирования 1 МГц. Кружки — доля зависаний, ромбики — доля многократных сбоев.**Рис. 5.** Изменение долей различных видов сбоев МК в состоянии поставки в общей их совокупности в зависимости от напряженности поля для частоты тактирования 8 МГц. Кружки — доля зависаний, квадратики — доля δ -сбоев, ромбики — доля многократных сбоев.

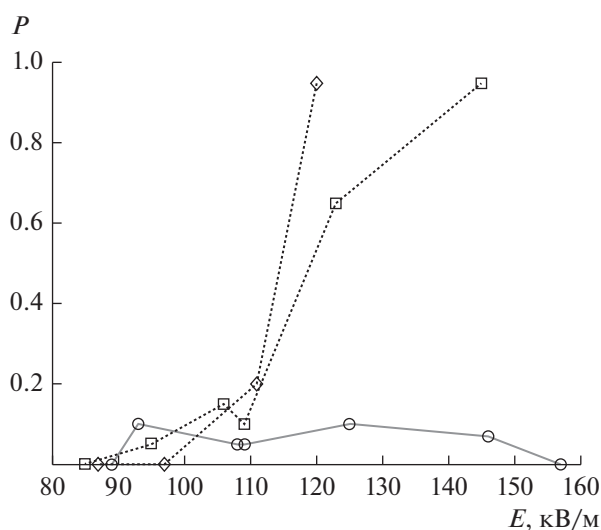


Рис. 6. Зависимости доли многократного сбоя в общей совокупности сбоев МК на печатной плате от напряженности поля при частотах тактирования 1 МГц (кружки), 8 МГц (квадратики) и 15 МГц (ромбики).

цией зависания МК и многократного его сбоя (в том числе и δ -сбоя).

3. О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РЕАКЦИИ МК ПРИ ДЕЙСТВИИ ПАЧЕК СК СШП ЭМИ

Эффект зависания. Из анализа экспериментальных данных видно, что, несмотря на разнообразное количество комбинаций видов сбоя, их основу составляют два вида: зависание и δ -сбой. Остальные виды сбоев отличаются от указанных только длительностью, которая может изменяться от единиц до десятков миллисекунд.

Можно однозначно утверждать, что зависание является пороговым эффектом, который не зависит от частоты тактирования. По-видимому, при минимальных для сбоя амплитуд напряженности поля, амплитуд электрических напряжений, наводимых на выводах, достаточно, чтобы *переход в состояние сбоя* произошел, однако самостоятельно, без вмешательства извне или работы заложенной программы или воздействия остальных импульсов пачки, МК из этого состояния выйти не может. Переход в него напоминает классическую защелку — тиристорный эффект в полевых КМОП-транзисторах. В то же время уже относительно небольшое (на ~10%) увеличение напряженности поля приводит к росту вероятности возникновения многократного сбоя и, в результате, к возможности восстановления работы МК.

Для анализа возможных причин, приводящих к зависанию, было проведено сравнение величин временных интервалов между моментом действия ближайшего импульса пачки, перед восстановлением генерации меандра и ее началом, со

временем, требуемым для выхода МК в рабочий режим при подаче питания и аппаратном сбросе при различных настройках внутреннего RC-генератора. Эти временные интервалы составили: 0.34 или 0.48 мс для частоты 15 МГц и 0.64 или 0.88 мс для частоты 8 МГц, которые отличались высокой степенью своей повторяемости. Для частоты 1 МГц отмечен случайный разброс величин от 0.16 до 0.42 мс. На основании результатов сравнения можно предположить, что наиболее вероятным сценарием реализации зависания может быть следующий.

Для тактирования МК частотой 1 МГц, при повышении напряженности поля выше пороговой происходит искажение информации в управляющих регистрах, что в итоге приводит к зависанию, как доминирующему типу сбоя. В случае единичных сбоев с перезапуском МК времена рестарта имеют большой разброс относительно импульса ЭМИ, предшествующего ему. Полученный разброс не коррелирует с данными измерений времени, требуемого для выхода МК в рабочий режим.

Для тактирования МК частотой 8 МГц наблюдается более сложная картина: при относительно небольших напряженностях поля реализуются как зависания, так и перезапуск МК. Временные интервалы 0.64 и 0.88 мс наиболее близки к времени выхода в рабочий режим 0.5 мс. На этом основании можно предположить, что для этой частоты реализуется аппаратный рестарт МК потенциалами, наведенными на вывод “RESET”. Аналогичная ситуация наблюдается и при тактировании с частотой 15 МГц.

Отмеченное различие в поведении МК при тактировании с частотами 1 и 8 (15) МГц, скорее всего, связано с настройками его конфигурационных регистров (фьюзов), от которых зависит активация различных блоков схемы.

Частота тактирования и вероятность сбоя. На рис. 7 представлены зависимости вероятностей сбоев от амплитуды напряженности поля в пересчете на отдельный импульс излучения (p_0) пачки из 100 импульсов при 100 повторениях их действия и разных условиях облучения. Видно, что при $E \geq 110$ кВ/м и частотах тактирования 8 и 15 МГц наблюдается резкий рост величины p_0 . Так, если при $E < 110$ кВ/м и любых условиях облучения $p_0 \approx 1 \dots 4 \times 10^{-3}$, то при $E = 130 \dots 140$ кВ/м и частоте 8 МГц $p_0 \approx 8 \times 10^{-2}$, для частоты 15 МГц p_0 возрастает до $\sim 5 \times 10^{-2}$ при $E \approx 120$ кВ/м. Наблюдаемый рост слабо зависит от размеров приемных антенн МК: или только от длины внутренних дорожек, или их увеличенной длины за счет дорожек печатной платы.

Сбой пачкой с ограниченным количеством импульсов. При превышении величиной напряженности поля порога для зависания МК оказывает-

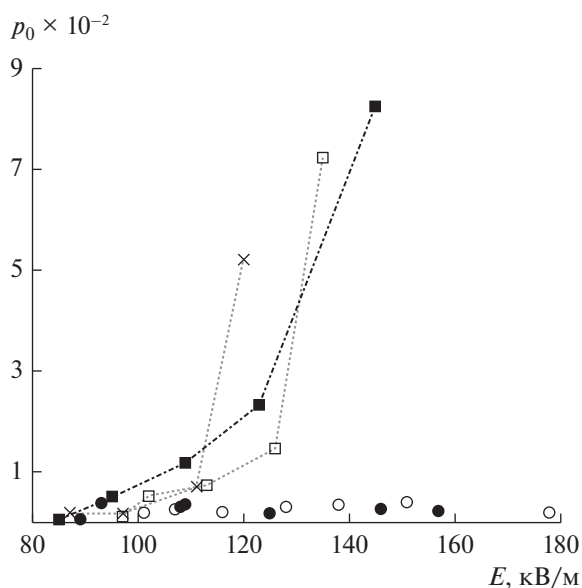


Рис. 7. Зависимости вероятности возникновения сбоя в пересчете на отдельный импульс излучения (p_0) от напряженности поля при разных условиях облучения: МК в состоянии поставки при частоте тактирования 1 МГц (светлые кружки) и 8 МГц (светлые квадратики); МК на плате при частоте тактирования 1 МГц (темные кружки), 8 МГц (темные квадратики) и 15 МГц (крестики).

ся в трудно предсказуемом состоянии, которое характеризуется реализацией произвольной цепочки событий, вызванных действием ограниченной пачки: сбоя, восстановление генерации меандра, следующий сбой, возможно, последующее зависание. Как показали результаты анализа, эта цепочка является стохастической по отношению к отдельным ее звеньям, в силу чего длительность периодов между сбоями может быть разной и зависеть от вероятности реализации события,

приводящего к конкретному сбою. В конечном итоге МК должен остаться в одном из двух стабильных состояний: 1) генерации непрерывного меандра, когда пачка закончится, или 2) зависания, когда восстановление генерации невозможно без вмешательства извне. Как следует из данных табл. 1–5, по крайней мере в исследованном диапазоне напряженностей поля, значительно (на порядок) преобладающая вероятность реализации какого-либо из этих двух эффектов при разных условиях облучения и частотах тактирования не отмечена.

Временные условия, необходимые для сбоя МК. Одной из основных задач, которую требовалось решить, являлось выяснение причины, вследствие которой происходит сбой, и условий, необходимых для его реализации. Было предположено, что одним из условий может быть существование определенных временных соотношений между моментом действия излучения и фазой работы МК, когда действие электрических напряжений на его выводы будет наиболее эффективным с точки зрения реализации сбоя (подобный эффект частично описан в [4]).

Как видно из рис. 2, на каждой осциллограмме кроме меандра зафиксирована последовательность импульсов, характеризующих пачку СК СШП ЭМИ — растянутые во времени изображения, которые отличаются от сигналов с датчика более длительным фронтом и значительно более длительным спадом. Для примера на рис. 8 приведена часть осциллограммы, иллюстрирующая данный эффект при частоте тактирования 1 МГц. Как видно, момент действия излучения относительно момента смены состояний может быть отмечен достаточно точно.

Было исследовано большое количество осциллограмм при облучении МК в состоянии постав-

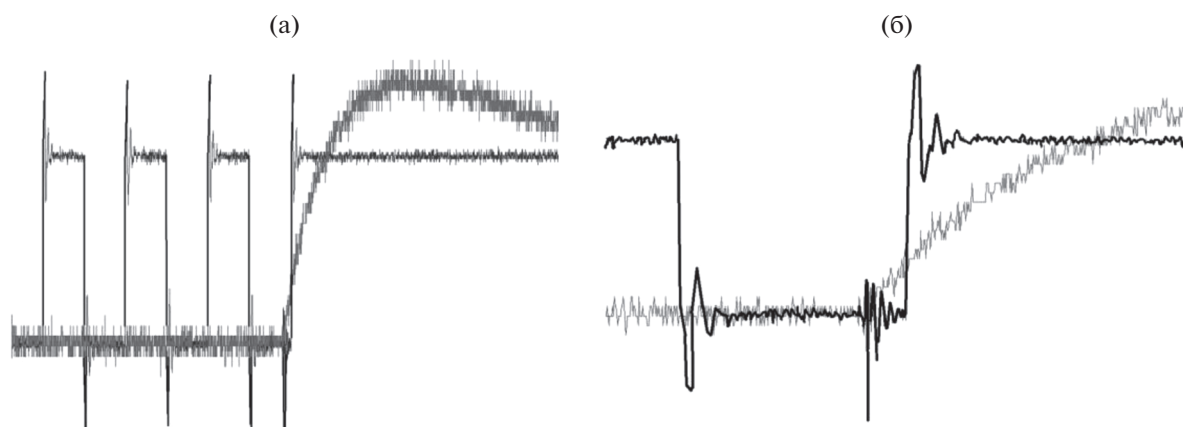


Рис. 8. Генерация меандра в разном временном масштабе (а) и (б) с наложенным изображением действующего импульса излучения. Период меандра 10 мкс (частота тактирования 1 МГц). Представлен случай реализации длительного сбоя.

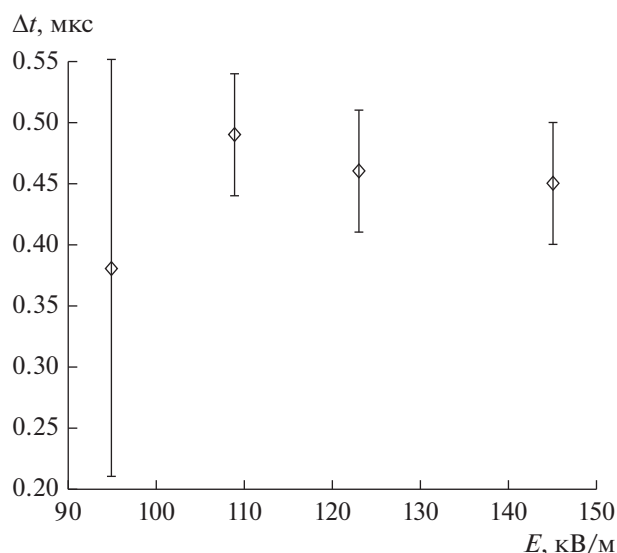


Рис. 9. Зависимость временной задержки Δt между моментом действия излучения и фазой генерации меандра, приводящей к сбою, от напряженности поля. Частота тактирования 8 МГц.

ки или на печатной плате, разных частотах тактирования и напряженностях поля. Как и следовало ожидать, 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 (приводящего к сбою) импульса излучения в фазе генерации нуля происходил переход на высокий уровень и, наоборот, при действии в фазе генерации 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. Для тактовой частоты 1 МГц (период меандра ~ 10 мкс) в $\sim 75\%$ случаев сбой происходил при действии импульса излучения через $\Delta t = 4.2 \pm 0.1$ мкс относительно последней смены фазы меандра, в $\sim 25\%$ случаев $\Delta t = 3.2 \pm 0.1$ мкс, в другие моменты времени вероятность реализации сбоя была чрезвычайно мала.

Для тактовой частоты 8 МГц величина Δt составила 0.45...0.5 мкс при длительности половины периода меандра 0.62 мкс, и она сопровождалась значительным разбросом данных (разброс посчитан на основе выборок из 20 сбоев для каждой серии) (рис. 9). Такой разброс явился следствием сложности точного измерения времени из-за помехового сигнала, наложенного на меандр.

Для тактовой частоты 15 МГц при длительности половины периода меандра 0.46 мкс величина задержки составила 0.07...0.09 мкс. Для всех частот величина Δt не зависела от облучения МК на печатной плате или в состоянии поставки.

На основании данных по измерениям временного интервала между моментом действия ближайшего перед восстановлением генерации меандра, импульса пачки и ее началом (см. разд. “Эффект зависания”) можно сделать вывод, что процесс восстановления генерации запускается импульсом пачки и он не определяется только внутренними процессами в МК, которые могли бы привести к его самовосстановлению. К такому же выводу можно прийти, если проанализировать длительность сбоев, вызванных действием импульса пачки: независимо от того, произошел δ -сбой или длительность сбоя была несколько единиц...десятков миллисекунд, восстановление генерации происходило с указанными временными интервалами.

Отсюда следует, что при высокой частоте тактирования и действии пачки с неограниченным числом импульсов и амплитудой, достаточной для реализации сбоя, процесс генерации меандра никогда не закончится: на всем своем протяжении он будет сопровождаться бесконечным числом сбоев, длительность которых предсказать невозможно в силу стохастичности данного процесса.

В настоящее время нет убедительного объяснения, с чем связано наличие указанных величин временных задержек или временных интервалов, для этого необходимо детально знать работу данного МК. Можно дать только общий ответ на вопрос, почему изменяется временная задержка при разных частотах тактирования. Эти частоты задаются внутренним или внешним генератором, и их роль определяющая, поскольку они задают последовательность выполнения операций при функционировании МК. Поэтому при смене частоты тактирования должны изменяться и временные соотношения между фазой генерации меандра и моментом действия импульса излучения, вызывающего сбой.

4. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ ПОВЕДЕНИЯ ТИПОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В качестве модели обобщенного цифрового элемента – генератора прямоугольных колебаний – в работе [3] использован генератор Ван дер Поля с большой величиной коэффициента нелинейности, на который действует внешняя сила. С этой точки зрения исследованный режим работы МК – генерация прямоугольных колебаний – близок к режиму который рассматривали авторы работы [3] при проведении расчетов. Ввиду значительно-

го отличия сложного устройства МК с большим количеством внутренних связей от используемой математической модели, возможно лишь качественное сопоставление некоторых результатов.

Согласно расчетам [3], при большом значении параметра нелинейности переключение генератора из одного метастабильного состояния в другое носит пороговый характер, поэтому для его переключения достаточно небольшого увеличения амплитуды внешнего воздействия. Как показывают результаты экспериментов, при увеличении напряженности первым видом сбоя МК реализуется зависание, которое имеет пороговый характер. В качестве амплитуды внешней силы можно рассматривать амплитуду электрических напряжений, наводимых на выводах МК в поле СШП-излучения.

Как было показано расчетом, существует связь между моментом действия импульса силы и моментом переключения генератора, которая зависит от амплитуды, вызывающей переключение. В экспериментах установлено, что сбой функционирования МК достаточно точно синхронизован с моментом действия СШП-излучения: для частоты тактирования 1 МГц сбой происходит через ~1 мкс после действия излучения, а для частоты 8 МГц этот интервал близок к ~0.1...0.15 мкс.

Другим примером качественного согласования экспериментальных и расчетных данных могут служить результаты работы [10], где рассмотрен генератор Ван дер Поля для случая, когда частоты внешней силы и генератора различаются на три порядка. Из расчетов следовало, что в этом случае происходит срыв генерации, которая восстанавливается через время, сравнимое с периодом внешнего воздействия. Характерно, что периоды восстановления и генерации, согласно приведенному в [10] рисунку, изменяются произвольным образом. В проведенных нами экспериментах частоты повторения возмущающих импульсов в пачках (1 кГц) и генерации меандра (100 кГц или ~1 МГц) соотносятся примерно таким же образом.

Полученные экспериментальные данные качественно хорошо согласуются с результатами расчетов, за исключением случая реализации сбоя вида зависания. Но, с нашей точки зрения, его реализация может иметь более сложную природу, чем просто переключение логических уровней, и это, возможно, связано с внутренними физическими процессами, происходящими в компонентах МК (типа классической “зашелки”).

Таким образом, сопоставление полученных данных с расчетом экспериментально подтвердило, что с использованием известных математических моделей можно исследовать, по крайней мере качественно, поведение не только заложенного в программу расчета обобщенного цифрового элемента, но и более сложных электронных систем.

Положительным является возможность предсказания не очевидных эффектов, например, многократного сбоя [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что частота тактирования существенно влияет на реализацию функционального сбоя МК СК СШП ЭМИ. При этом величина напряженности поля не является определяющим параметром для характеристики количества сбоев в диапазоне, превышающем порог; более важное значение имеет частота тактирования. В результате одним из основных параметров, характеризующих сбой функционирования МК, оказывается кратность его реализации на протяжении действия пачки импульсов. С точки зрения потенциального воздействия это заключение существенное, поскольку на протяжении действия пачки импульсов будет невозможным штатное функционирование МК.

В то же время нельзя рассматривать в отдельности величину напряженности поля и частоту тактирования. Величина напряженности определяет порог возникновения сбоя, который слабо зависит от частоты тактирования. Таким пороговым видом сбоя оказалось зависание. Это один из опасных видов сбоя, поскольку МК в результате его реализации перестает функционировать, что может быть чревато катастрофическими последствиями для дальнейшей работы РЭА.

Из полученных данных следует, что зависание более характерно для частоты тактирования 1 МГц и при увеличении напряженности поля в исследованном диапазоне значений вероятность его реализации значительно не изменяется. Это означает, что при ограниченной длительности пачки СК СШП ЭМИ функционирование МК может быть восстановлено только при вмешательстве извне, т.е. произойдет катастрофический отказ облучаемого устройства РЭА.

Для более высоких частот тактирования с увеличением напряженности поля реализация зависания становится менее опасной, поскольку восстановление генерации меандра может произойти каким-либо импульсом пачки. В этом случае катастрофического сбоя не будет, но возникнет ситуация, когда с увеличением напряженности поля и частоты тактирования увеличится вероятность реализации многократного сбоя. В результате пока будет облучение пачкой СК СШП ЭМИ, штатное функционирование МК будет невозможно в силу случайного чередования по своей длительности реализуемых сбоев. Отсюда, использование пачки с неограниченным числом импульсов для функционального сбоя приведет к невозможности функционирования РЭА из-за возникно-

вения неограниченного числа сбоя, но вмешательства извне не требуется.

Зависимость вероятности сбоя от частоты тактирования с точки зрения нарушения работы РЭА оказывается достаточно сложной: при высокой частоте тактирования увеличение напряженности поля приведет к повышению вероятности реализации многократного сбоя, а при низкой — велика вероятность зависания, все будет зависеть от их соотношения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В.* // Журн. радиоэлектроники, электронный журнал. 2010. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug10/3/text.pdf>.
2. *Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В. и др.* // Радиоэлектроника и информатика. 2007. Т. 39. № 4. С. 676.
3. *Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 1. С. 64.
4. *Clarke T., Dietz D., French D.M.* // Proc. Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA'12). Cape Town. 2–7 Sep. N.Y.: IEEE, 2012. P. 1266.
5. *Camp M., Gerth H., Garbe H., Haas H.* // IEEE Trans. 2004. V. EMC–46. № 3. P. 368.
6. *Грибский М.П., Григорьев Е.В., Войтович А.К. и др.* // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т. 5. № 2. С. 294.
7. *Степовик А.П., Шамаев Е.Ю., Арманов М.М. и др.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 8. С. 812.
8. *Лазарев Ю.Н., Петров П.В.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 5. С. 1689.
9. *Кондратьев А.А., Лазарев Ю.Н., Потапов А.В. и др.* // ДАН. 2011. Т. 438. № 5. С. 615.
10. *Зиглин С.Л., Репецкая Л.В., Черепенин В.А.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13. № 6. С. 16.