

Методы обеспечения стойкости микросхем к одиночным событиям при проектировании радиационно-стойких микросхем

В.Н. Ачкасов¹, В.А. Смерек¹, Д.М. Уткин², В.К. Зольников³

¹ФГУП "Научно-исследовательский институт электронной техники", Воронеж, Россия

²Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия, utkin64@yandex.ru

³Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия

Аннотация – Рассмотрено влияние одиночных сбоев на работу цифровых устройств. Показана реализация методов защиты от одиночных сбоев на примере микросхем K1830VE32UM и 1830VE32U.

Ключевые слова – интегральная схема, одиночные сбои, структурная избыточность, временная избыточность, программная избыточность.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время развитие микроэлектроники привело к резкому уменьшению проектных норм, увеличению степени интеграции и внедрению передовых методов проектирования с использованием макрофрагментов, которые получили название сложные функциональные блоки (СФ блоки). В результате на одном кристалле стало возможным реализовать несколько СФ блоков. Это привело к созданию специализированных сверхбольших интегральных схем типа «система на кристалле» (СНК). Из-за малых размеров активных областей в данных изделиях в них в большей степени стали проявляться так называемые одиночные события. Данные эффекты относятся к новому классу микродозиметрических радиационных эффектов в электронных приборах и носят вероятностный характер. Их исследования проводились в ряде работ [1-4]. Основными методами защиты от данных эффектов, которые применяются как в аппаратуре, так и в СБИС, являются: схемотехнические решения по защите элементов СБИС; использование специальных кодов, исправляющих ошибки; методы структурной, временной и программной избыточности [5].

Основная трудность в применении этих методов заключается в их оптимизации и выработке доминирующих решений в зависимости от конкретного блока. Рассмотрим эту задачу.

II. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ СБОЕВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ПРИМЕРЕ МИКРОСХЕМ K1830VE32UM и 1830VE32U

Известно, что первым этапом для применения методов защиты от сбоев при проектировании сложных СБИС является выделение определенных функциональных блоков. Затем необходимо оценить имеющиеся средства защиты с точки зрения не превышения ограничений.

Одной из первых областей, на которой следует сосредоточить внимание прежде всего, являются ячейки ОЗУ. Они наиболее критичны к одиночным сбоям из-за относительно большой площади и «тяжести отказа» - потери информации. Вначале проводится оценка площади ОЗУ без средств защиты ячеек, затем со «специальными» ячейками – т.е. с применением схемотехнических методов, и, наконец, оценивается возрастание площади при резервировании ячеек, которые в общем случае могут быть как обычные, так и «специальные». После этого следует принять решение, каким методом следует воспользоваться.

Для организации радиационно-стойкой ОЗУ СБИС 1830VE32U применялись стандартные незащищенные блоки памяти. Схема состоит из трех блоков ОЗУ и блока определения ошибки (рисунок 1).

При чтении данных микрокомандой ядра микроконтроллера происходит одновременное считывание информации сразу из трех блоков. Комбинационные элементы, содержащиеся в схеме выбора, определяют значение, передаваемое на свой выход, по двум совпадениям. Недостатком данной организации является то, что в случае сбоя ячейки памяти в любом из блоков ОЗУ и обнаружения соответствующей ошибки, не происходит коррекции испорченных данных. Если ячейка памяти (в случае соответствующей организации программы) долгое время не переписывается, то возможен сбой уже в двух блоках,

что приведет к тому, что схема выбора выдаст на выход неправильное значение.

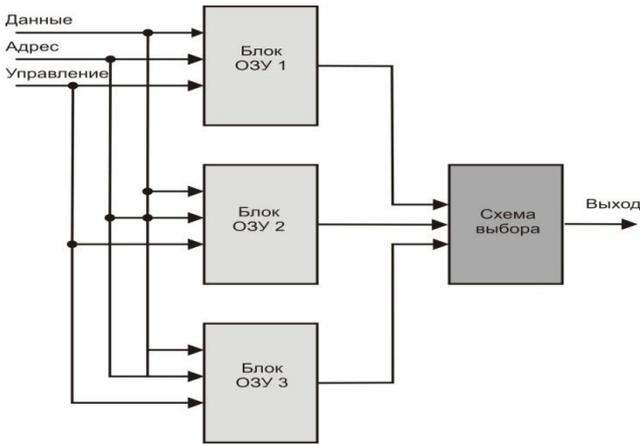


Рис. 1. Применение TMR для защиты ОЗУ в микросхеме 1830VE32У

Модификация данного метода может производиться путем добавления блока мониторинга. Этот блок в те моменты времени, когда нет обращения микрокомандами к ОЗУ, производит последовательное чтение и перезапись данных памяти. В случае, когда возникает сбой в одном из блоков ОЗУ, производится перезапись всех блоков ОЗУ правильным значением. С такой организацией защиты ситуация, когда данные долгое время не модифицировались, невозможна. Блок коммутации предназначен для переключения между входными данными, поступающими в ОЗУ от микропроцессорного ядра, и от блока мониторинга. Таким образом организована защита от одиночных сбоев ОЗУ ИМС К1830VE32УМ (рисунок 2).

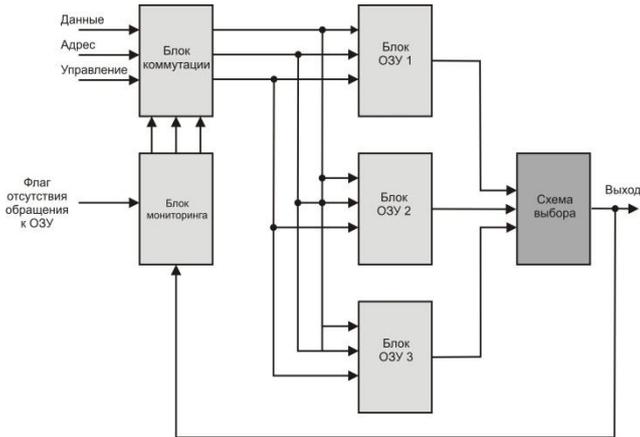


Рис. 2. Применение блока мониторинга для предотвращения множественных ошибок ОЗУ микросхемы К1830VE32УМ

Блок мониторинга состоит из управляющего регистра, предназначенного для переключения между режимами работы, регистра, в котором хранится значение ячейки ОЗУ, счетчика адреса ячейки, содержащего информацию об адресе ячейки, требующей чтения, блока определения простоя шины данных,

генератора внутренних сигналов управления СФ-блоками ОЗУ. Счетчик адреса в случае простоя шины данных перебирает всю область адресов ОЗУ. Значения, читаемые из 3-х блоков ОЗУ, сравниваются между собой, и схема выбора принимает решение по двум совпадениям. Правильное значение сохраняется в регистре. В случае, если значение одного из трех блоков отличается от двух других, происходит перезапись всех трех блоков сохраненным в регистре значением.

При использовании методов тройного резервирования ОЗУ в схемах разработки ФГУП «НИИЭТ», в СБИС 1830VE32У рост площади кристалла составил 14%, а в СБИС К1830VE32УМ – 2%.

Следующей рассматриваемой областью может быть ПЗУ.

В области ПЗУ могут храниться неоперативные данные (поправочные коэффициенты, состояния устройств и т.д.) и пользовательские программы. Сбой программы может привести к неконтролируемому последствием, что в системах реального времени нежелательно (требуется время, чтобы неправильно функционирующую программу сбросил сторожевой таймер).

Так как в современных схемах объем ПЗУ играет определяющую роль в формировании потребительских свойств СБИС, методы тройного резервирования (TMR) для защиты от сбоев в них использовать нецелесообразно. Самым оптимальным видится использование корректирующих кодов Хэмминга [6]. При организации ПЗУ схемы 1830VE32У блоками по 1024 слов по 16 бит (1024x16) для каждого блока необходимо ввести дополнительные 1024 слов по 8 бит (1024x8) для того, чтобы осуществлялось исправление одной и фиксации двух ошибок в слове данных. В ИС К1830VE32УМ использовались СФ-блоки памяти EEPROM со встроенной защитой данных кодом Хэмминга.

Общая занимаемая площадь ПЗУ на кристалле составляет 42%, из них на долю проверочной информации приходится 13% от общей площади, занимаемой всеми элементами.

Далее необходимо рассмотреть регистры, которые представляют собой совокупность триггеров, объединенных общей функциональностью. Для защиты от сбоев некоторые разработчики используют помехоустойчивое кодирование (бит четности или код Хэмминга). Недостатком является необходимость прописывать данную защиту в HDL-коде и недостаточный охват такой защитой всех триггерных элементов. Это означает, что все равно возможны сбои в отдельных, не сгруппированных в регистры, триггеров. Выходом является использование специальных библиотечных триггерных элементов с защитой от одиночных сбоев. В случае, если специальных триггерных элементов с защитой от сбоя в библиотеке нет, возможно создание управляющей программы (скрипта), который будет автоматически заменять

библиотечные триггера на систему триггеров, защищенных от одиночных сбоев. Такая методика применялась во ФГУП НИИЭТ при разработке СБИС K1830BE32UM. Скрипт запускался после загрузки gate-нетлиста в программу синтеза топологии. Результирующая схема состояла из трех эквивалентных триггеров, схемы выбора и инверторов, предназначенных для разнесения по времени процесса записи (временная избыточность). Площадь составной ячейки превышает площадь одного триггера в 4-5 раз. Так как общая площадь под всеми триггерными элементами (12616 шт.) в ИМС K1830BE32UM составляет 12% от общей площади под элементами, то применение данного метода привело к увеличению общей занимаемой площади всего примерно на 4-6% процента. Достоинством данного метода является то, что все триггера в ИМС защищены от сбоев. Данная методика применима для различных технологий и не требует создания специальных ячеек.

Наконец, рассмотрим реализованные методы защиты комбинационной логики. При попадании ТЗЧ в элементы комбинационной логики возможно возникновение переходного процесса (иголки) на выходе. Так как входные сигналы (выходы соответствующих триггеров) в результате сбоя не изменяются, то через некоторое время после сбоя на выходе комбинационной логики устанавливается правильное значение. Резервирование, например, TMR для таких элементов не всегда эффективно, так как требует очень много площади, поэтому для защиты от сбоев элементов комбинационной логики лучше использовать методы временной избыточности, а именно, уменьшение тактовой частоты устройства.

Максимальная тактовая частота ИМС определяется временем выполнения самой долгой операции. Ограничение на частоту накладывает самый долгий (по времени) комбинационный путь в схеме. Если произойдет попадание ТЗЧ и возникновение иголки в самом длинном (по времени) пути, то у комбинационной логики не будет запаса по времени для восстановления правильного значения на своем выходе. В случае правильной разработки ИМС таких длинных по времени путей большое множество. Выходом является введение запаса (30%-50%) от максимальной тактовой частоты ИМС.

На рисунке 3 представлена ситуация возникновения иголки в случае, если частота функционирования устройства максимальна, а на рисунке 4 – в случае, если устройство функционирует на частоте, равной половине от максимальной. На рисунках видно, что во втором случае существует вероятность исправления ошибки, а в первом случае такой вероятности нет.

Вероятность исправления зависит от времени, когда происходит попадание частицы и от места попадания.

В случае, если иголка возникает в элементах комбинационной логики, находящихся ближе к выходу логики, то восстановление на выходе правильного

значения требует времени меньше, чем когда иголка возникает в элементах, расположенных близко к входу.

Микросхема K1830BE32UM представляет собой быстродействующий экономичный 8-разрядный КМОП микроконтроллер, производимый по технологии КМОП с проектными нормами 0,35 мкм. Микросхема обеспечивает работу с частотой от 1,25 МГц до 33 МГц и поддерживает два режима экономии мощности, выбираемых программно. Этим она обеспечивает достаточно высокую сбоеустойчивость за счет временной избыточности.

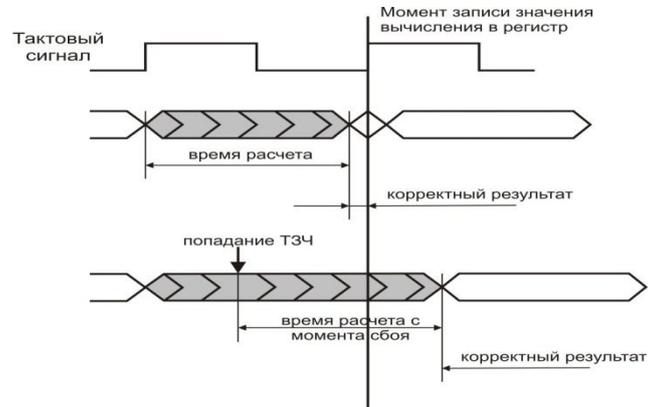


Рис. 3. Возникновение сбоя в комбинационных элементах при функционировании на максимальной частоте

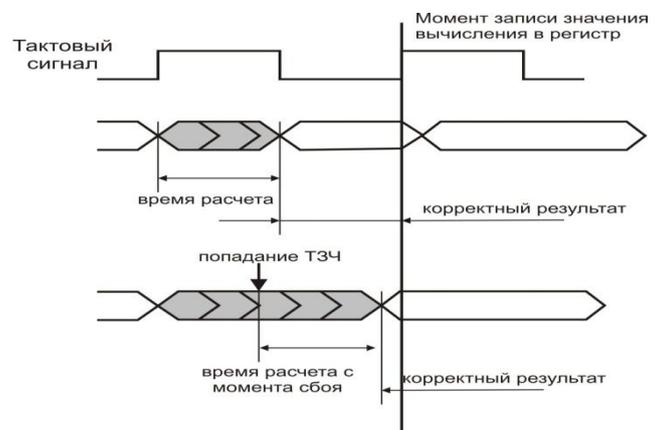


Рис. 4. Возникновение сбоя в комбинационных элементах при функционировании на частоте меньшей, чем максимальная

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОСХЕМ K1830BE32UM И 1830BE32U НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ

Для испытаний выбрана микросхема 1882BE53U, выполненная по технологии КМОП 0,35 мкм (без применения защиты ОЗУ и ПЗУ), микросхема 1882BE53UM, выполненная по технологии 0,35 КМОП X-Fab (резервирование ОЗУ - три блока по 512 байт, "регенерация" ОЗУ - постоянное чтение и перезапись в случае обнаружения ошибки, резервирование всех триггеров, защита кодом Хэмминга памяти данных и

памяти команд) и 1830BE32У (Танк-5), выполненная по технологии 0,5 мкм КМОП/КНИ НИИСИ РАН (резервирование ОЗУ - три блока по 256 байт).

Экспериментальные исследования проводились на циклотроне У-400М при воздействии ионов Kr_{84} с ЛПЭ(Si) - 40 МэВ (для ИС 1882BE53У, 1882BE53УМ) и ионов He_{131} с ЛПЭ(Si) – 60 МэВ (для ИС 1830BE32У).

Для проведения радиационных исследований была разработана и изготовлена специализированная тестирующая плата, позволяющая осуществлять функциональный контроль серии 8-разрядных микроконтроллеров с архитектурой MCS-51 и включающая в себя следующие основные функциональные узлы: ПЗУ команд объемом 64К×8 на основе электрически стираемой и программируемой flash-памяти AT29C512; ОЗУ данных объемом 32К×8 UM62256, защелка адреса – восьмиразрядный регистр 74AC373SMT; формирователь сигналов – четыре логических элементов 2И 74AC08 и дешифратор – демультимплексор 3 на 8 74НС138; устройство сброса – с использованием супервизора TLC77331Р; ИС МАХ3232 – приемопередатчик, согласующий уровни стандарта RS-232 с цифровыми уровнями.

В качестве генератора тактовых импульсов используется внутренний генератор исследуемой ИС при подключении к выводам XTAL1 и XTAL2 кварцевого резонатора 24 МГц с двумя согласующими конденсаторами.

При исследовании ОС и ТЭ напряжения питания ИС и платы подавались от разных источников питания, при этом ток потребления ИС измерялся с помощью автоматизированной измерительной системы на базе ПК. В случае возникновения ТЭ предусмотрено автоматическое ограничение тока потребления, которое устанавливалось на уровне 100 мА. Кроме того, обеспечивалось кратковременное отключение источника питания при возникновении ТЭ.

Исследуемые ИС устанавливались в контактирующее устройство УК48-4С. На плате установлены драйверы и интерфейсные разъемы портов СОМ1 и СОМ2 для двунаправленного обмена информацией (для связи ИС с компьютером через его последовательный порт RS-232).

В процессе облучения при осуществлении ФК и измерении тока потребления исследуемых ИС используются 4 компьютера: 2 в качестве управляющих (для источников питания и платы тестирования), расположенных в облучаемой зоне, и 2 в качестве удаленных ПК, расположенных в измерительной комнате, соединенных через Ethernet (кросс) кабель.

Для проверки функционирования ИС в процессе воздействия ТЗЧ была разработана программа, с помощью которой происходит последовательная запись чисел FFh, 00h, 55h, AAh (контроль ОЗУ). Сначала производится запись числа FFh в каждую ячейку ОЗУ с последующим считыванием ОЗУ, затем числа 00h, и так далее в указанной выше последовательности.

При исследовании ПЗУ (для ИС «Тема-3» и «Тема-3М») происходит последовательная запись чисел FFh, 00h, 55h, AAh. Сначала происходит стирание ПЗУ, запись числа FFh в каждую ячейку ПЗУ, затем числа 00h, и так далее в указанной выше последовательности.

По окончании записи и чтения всех четырех чисел весь цикл повторяется. Программа выполняет подсчет количества отказов и сбоев исследуемой микросхемы при воздействии ТЗЧ.

Результаты испытаний показали повышение сбоеустойчивости микросхем 1882BE53УМ по сравнению с остальными, присутствующими в эксперименте. Так при воздействии ионов Kr_{84} с ЛПЭ(Si) - 40 МэВ на микросхему 1882BE53УМ были зафиксированы только тиристорные эффекты. При этом сечение ТЭ составляет $\sigma_{ТЭ}=2,1 \times 10^{-4} \text{ см}^2$ при $N_{ТЭ} - 38$ и $\Phi = 1,8 \times 10^5 \text{ ион/см}^2$.

При воздействии ионов Kr_{84} с ЛПЭ(Si) - 40 МэВ на микросхему 1882BE53У (Тема-3) были зафиксированы и одиночные сбои, и тиристорные эффекты. Сечение ОС составило $\sigma_{ОС}=3,47 \times 10^{-5} \text{ см}^2$ при $N_{ОС} - 34$ и $\Phi = 9,8 \times 10^5 \text{ ион/см}^2$, сечение ТЭ составило $\sigma_{ТЭ}=2,04 \times 10^{-5} \text{ см}^2$ при $N_{ТЭ} - 20$ и $\Phi = 9,8 \times 10^5 \text{ ион/см}^2$.

При воздействии ионов He_{131} с ЛПЭ(Si) – 60 МэВ на микросхему 1830BE32У (Танк-5) были зафиксированы только одиночные сбои. Сечение ОС составило $\sigma_{ОС}=6,67 \times 10^{-7} \text{ см}^2$ при $N_{ОС} - 8$ и $\Phi = 1,2 \times 10^7 \text{ ион/см}^2$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перспективы использования субмикронных КМОП СБИС в сбоеустойчивой аппаратуре, работающей под воздействием атмосферных нейтронов / Бетелин В.Б., Баранов С.В., Бобков С.Г., Краснюк А.А., Осипенко П.Н., Стенин В.Я., Черкасов И.Г., Чумаков А.И., Яненко А.В. // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 1. С. 48-52.
- [2] Моделирование сбора заряда при воздействии тяжелых заряженных частиц в кмоп элементах микросхем / Зольников В.К., Потатов И.П., Таперо К.И. // IV Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)". Сб. трудов. М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 275-278.
- [3] Модель физических процессов в элементах СБИС при воздействии тяжелых заряженных частиц / Смерек В.К., Зольников В.К., Таперо К.И. // Моделирование систем и процессов. 2010. № 1-2. С. 41-48.
- [4] Разработка математических моделей расчета радиационной стойкости параметров типовых элементов и определение адекватности схемотехнических и конструктивно-технологических решений / Зольников В.К., Крюков В.П., Ачкасов В.Н., Смерек В.А. // Моделирование систем и процессов. 2011. № 1-2. С. 24-26.
- [5] Методы обеспечения сбоеустойчивости к одиночным событиям в процессе проектирования для микропроцессоров К1830BE32УМ и 1830BE32У / Яньков А.И., Смерек В.А., Крюков В.П., Зольников В.К. // Моделирование систем и процессов. 2012. № 1. С. 92-95.
- [6] Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1972. 400 с.