

ПОЛУЗАКАЗНАЯ БИБЛИОТЕКА САМОСИНХРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ*

Денисов А.Н.¹, к.т.н. Степченко Ю.А.², к.т.н. Дьяченко Ю.Г.², к.т.н. Плеханов Л.П.², Филимоненко О.П.¹
¹ Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ (НПК "Технологический центр")
² Институт проблем информатики Российской академии наук (ИПИ РАН)

1 Введение

Проблемы создания отечественной элементной компонентной базы (ЭКБ) общеизвестны, но в ответственных приложениях, таких как космическое приборостроение, они становятся одним из определяющих факторов [1]. ЭКБ для применения в естественных условиях космического пространства – отдельный класс элементной базы, со своими отдельными требованиями, главными из которых являются *стойкость к накопленной дозе радиационного излучения, защищенность от тиристорного эффекта, минимизация энергопотребления и повышенная надежность.*

Радиационная стойкость

Космическое пространство характеризуется относительно низкими по интенсивности излучениями от естественных радиационных поясов земли. Для космических аппаратов (КА) со сроком активного существования до пяти лет на низких орбитах достаточно интегральной стойкости к накопленной дозе на уровне 100 крад. ЭКБ, произведенная в НПК "Технологический центр" на полузаказных матричных кристаллах (БМК) с аттестованными технологическими процессами и с уже созданными библиотеками элементов, отвечает требованиям 100 крад накопленной дозы. Для космического применения широко используются БМК серии 5503, изготавливаемые по технологии 1,5 мкм, с напряжением питания 5 В. В серии имеются кристаллы на 600, 1200, 3000 и 5000 вентиляей. Серия 5507 – полный аналог серии 5503, но с напряжением питания 3 В.

Для применений, существенно превышающих указанные выше уровни радиационной стойкости, требуется создание ЭКБ с использованием особых технологий, например, "кремния на изоляторе" (КНИ). В 2013 году завершается освоение в производство новых серий – 5508 и 5509. В эти серии входят БМК на 7,5; 15, 30 и 60 тыс. вентиляей. БМК серии 5509 реализованы на структурах КНИ и обладают повышенной стойкостью к ионизирующему излучению – более 1 Мрад. В 2008 г. завершена ОКР по созданию БМК серии 5521 на 1 миллион вентиляей.

Рассмотренные выше особенности БМК НПК "Технологический центр" для создания ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства относятся к технологическим способам. Наряду с ними в этих БМК реализован и ряд схемотехнических способов, причем одним из наиболее эффективных является введение в состав БМК библиотеки самосинхронных (СС) элементов. Здесь и далее под СС-элементами и схемами на их основе, понимаются элементы, правильная работа которых не зависит от задержек составляющих их компонентов. В этих схемах задержка любого компонента, например, инвертора, может быть произвольной, но конечной. Неотъемлемым компонентом этих схем является наличие в них индикатора окончания всех иницированных процессов. СС-схемы работают по реальным задержкам элементов (с учетом текущего уровня питающего напряжения, температуры и т.д.) и в них отсутствует необходимость настройки на худший случай, как в синхронных схемах (выбор частоты тактового генератора) и в асинхронных схемах (выбор величины задержки). Более подробно преимущества самосинхронного исполнения аппаратуры изложены в [2].

В КМОП ИС при облучении может происходить уменьшение быстродействия из-за увеличения сопротивления канала за счет сдвига порогового напряжения, т.к. при этом возрастает время перезарядки емкостей, что приводит к увеличению времени распространения сигнала. Поскольку правильная работа СС-схем обеспечивается при произвольных задержках элементов, данный вид облучения не скажется на их работоспособности.

Вследствие воздействия космического излучения происходит накопление заряда в подзатворном и захороненном окисле кристалла микросхем, что также приводит к увеличению их задержек и автоматически компенсируется при самосинхронном исполнении аппаратуры.

Защищенность от тиристорного эффекта

Тиристорный эффект является следствием воздействия на ИС одиночных высокоэнергетических частиц, и поэтому микросхемы космического применения должны обладать порогом устойчивости на уровне 60 МэВ·см²/мг и выше. ЭКБ производства НПК "Технологический центр" МИЭТ уже обладает соответствующим порогом и никаких дополнительных мероприятий для ее применения на борту КА в связи с этим не требуется [1].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках Государственного контракта № 2012/519/12-29н от 10.12.2012г.

Минимизация энергопотребления

Одним из достоинств самосинхронного исполнения аппаратуры на базе СС-библиотеки является их энергетическая эффективность, доказанная на результатах сравнительных испытаний синхронного и самосинхронного вариантов исполнения ядра микроконтроллера, выполненных с использованием библиотеки СС-элементов БМК 5503 [3]: самосинхронный вариант оказался на 50% более эффективным, чем синхронный. Основными факторами снижения энергопотребления при СС-исполнении являются:

- исключение из схемы генератора тактовых импульсов и путей разводки “клокового” дерева (от 30 до 50% от общего энергопотребления в синхронных схемах);
- автоматический перевод схемы в дежурный режим при отсутствии необходимости обработки информации;
- минимизация энергопотребления в дежурном режиме: определяется током утечки;
- минимизация энергопотребления за счет снижения питающего напряжения при сохранении работоспособности схемы в широких пределах.

На рис. 1 показано, что быстродействие СС-микроядра на смеси операций в зависимости от питающего напряжения и температуры для всех испытанных тестовых кристаллов изменяется в широких пределах от 15,2 МГц (+12,0 В, -63°С) до 1,81 КГц (+0,4 В, +125°С) с соответствующими значениями тока потребления: 89 мА и 1,1 мкА.

Повышение надежности

Самосинхронное исполнение аппаратуры характеризуется следующими свойствами:

- устойчивой работой – отсутствием сбоев при любых возможных условиях эксплуатации и изменении параметров элементов из-за процессов старения и воздействия окружающей среды (радиации),
- безопасной работой – прекращением работы в момент появления отказа любого элемента,
- максимально возможной областью эксплуатации (диапазоном работоспособности), определяемой только физическим сохранением переключательных свойств активных элементов базиса реализации,
- естественной устойчивостью к параметрической деградации, вызываемой старением элементов и изменением их параметров,
- прекращением всех переключений в момент появления любой константной неисправности элементов, естественной стопроцентной самопроверяемостью и самодиагностируемостью по отношению к множественным константным неисправностям, при которых сигнал в какой-либо цепи схемы “залипает” в одном состоянии,
- простотой реализации саморемонта.

На рис. 1 представлены результаты испытаний зоны работоспособности всех синхронных и самосинхронных образцов микроядра (40 образцов каждого типа с двух пластин). Зона работоспособности ($S = \Delta T^0 * \Delta U$) определялась как произведение диапазонов напряжения питания и температуры, в которых микроядро демонстрировало устойчивую работу. Из рис. 1 видно, что зона работоспособности всех самосинхронных образцов больше зоны работоспособности синхронных в 17 раз.

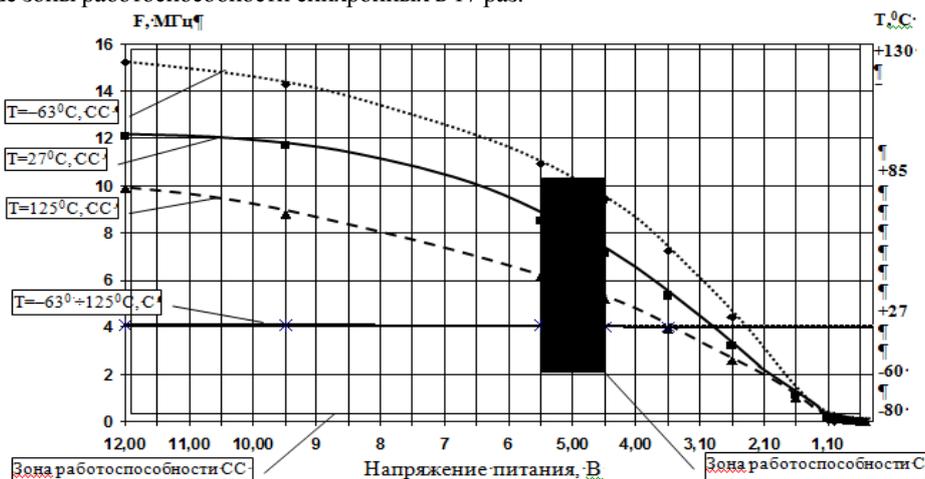


Рис. 1 Быстродействие Микроядра на смеси операций и зона работоспособности: СС – самосинхронный вариант реализации; С – синхронный вариант

2. Библиотека самосинхронных элементов 5503/5507СС

Фиксация окончания переходных процессов в элементах СС-схемы предопределяет ее реализацию на базе *однокаскадных* элементов, которые определяются следующим образом. Для любого входа X_i одно-

каскадного элемента должно выполняться условие: если X_i возбуждает элемент, то весь ток переключения, определяющий изменение потенциала его выхода, должен проходить через транзистор, управляющий электрод которого соединен с входом X_i . Из 350 библиотечных элементов БМК 5503 требованию *однокаскадности* удовлетворяют только 14 элементов: A21OI, A22OI, A31OI, INV, INV2, INV3, INV4, NAN2, NAN3; NOR2, NOR3, O21AI, O22AI и O31AI.

Проиллюстрируем необходимость однокаскадной реализации на примере индикаторов окончания переходных процессов, которые, по существу, являются средством синхронизации процессов в СС-схемах. Анализ стандартных библиотек отечественных БМК показывает, что СС-реализация даже элементарного индикатора (G-триггера) на два входа невозможна: нет однокаскадной реализации элемента 2И-2И-2И-ЗИЛИ-НЕ (см. рис 2).

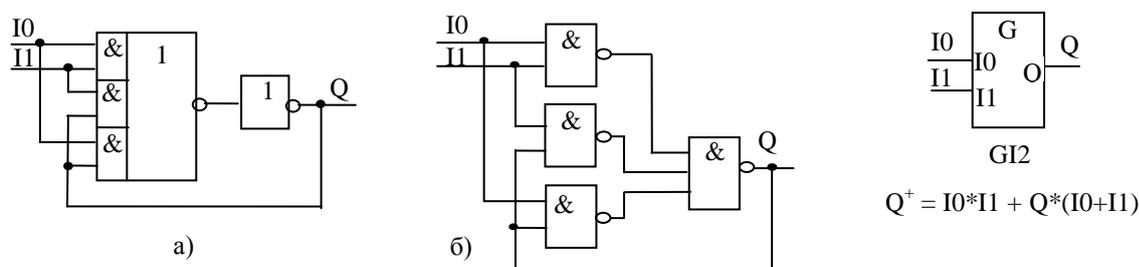


Рис. 2 Формы реализации индикаторных G-триггеров для двух инфазных сигналов:

- а) корректной (однокаскадной) в своей основной логической части;
 б) некорректной (двухкаскадной).

Если входные наборы I_0 и I_1 (00 и 11) фиксируются на длительное время, за которое успевают закончиться все переходные процессы, оба варианта реализации свободны от состязаний. Однако если в схеме рис. 2а изменение выхода является признаком окончания всех переходных процессов, то в схеме рис. 2б после изменения выхода переходные процессы в элементах первого каскада могут продолжаться.

G-триггер должен индцировать окончание переходных процессов не только в схемах, подключенных к его входам, но и в себе самом. При этом предполагается, что логические состязания на уровне одного однокаскадного элемента невозможны, т.к. время его переключения определяется, в основном, временем перезаряда его выходной емкости. Таким образом, схема на рис. 2 б не может быть использована для построения СС-схем. Отметим, что реализация однокаскадного самосинхронного триггера G12 требует 12, а двухкаскадная (с нарушением самосинхронности) – 18 транзисторов.

Библиотека СС-элементов для БМК 5503 представлена 135 элементами [4], которые наряду с 10 однокаскадными элементами базовой библиотеки могут использоваться для разработки СС-схем. Библиотека СС-элементов представлена следующими базовыми элементами:

- логические элементы, выполняющие простую функцию;
- логические элементы, выполняющие сложную функцию;
- мультиплексоры,
- преобразователи, компараторы, мажоритарные элементы;
- индикаторные элементы;
- триггеры – части макроэлементов;
- функционально законченные триггеры;
- разряды последовательных счетчиков;
- разряды сдвиговых регистров;
- элементы одноразрядного сумматора;
- арбитры;
- элементы шины.

Библиотека использовалась для разработки ряда тестовых и опытных СС-кристаллов, в частности тестовых кристаллов "Микроядро", реализующих функции вычислительного ядра 8-разрядного микроконтроллера PIC18CXX, широко используемого в отечественных разработках.

Все элементы библиотеки являются либо патенточистыми (сроки действия патентов закончились) либо патентозащищенными (на элементы библиотеки получено 20 патентов РФ).

3. Библиотека самосинхронных элементов 5508/5509СС

В настоящее время завершена разработка библиотеки СС-элементов для БМК 5508/5509 (250 элементов). Новые возможности кристаллов и опыт проектирования СС-схем позволили пополнить библиотеку рядом эффективных технических решений. В частности, на рис. 3 показан представитель семейства D-

триггеров с однофазным входом, который позволяет уменьшить в два раза число связей между источником (ИСТ) и приемником (ПРМ) в n-разрядном тракте передачи информации.

На рис. 4 показан представитель семейства СС-триггеров с мощными выходами. Информационный выход (Q, QB) формируется инверторами, обеспечивающими увеличенную нагрузочную способность и электрическую развязку элемента памяти триггера, хранящего его состояние, от внешнего окружения, что повышает помехоустойчивость триггера. Ранее не удавалось найти такие компактные схмотехнические решения.

Данные схмотехнические решения защищены патентами на изобретения РФ и патентами США [6,7].

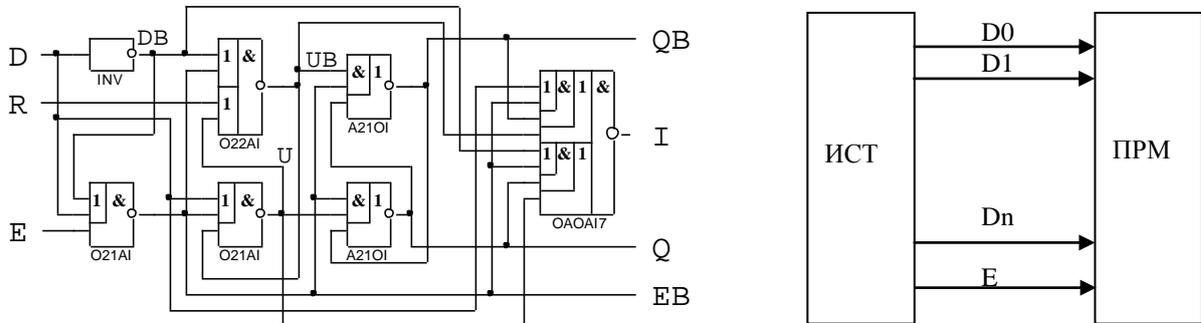


Рис. 3 Двухтактный самосинхронный D-триггер

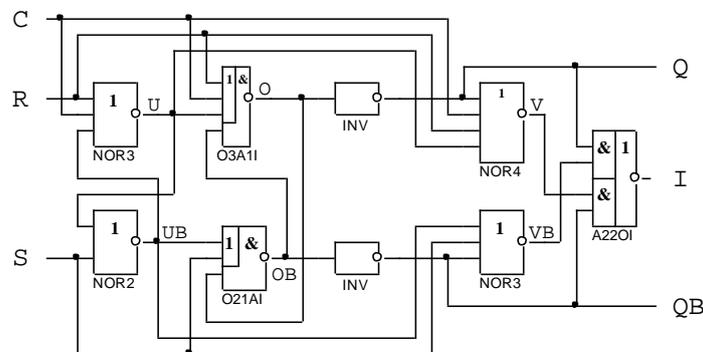


Рис. 4 Двухтактный самосинхронный RS-триггер с мощными выходами

4 Заключение

Впервые в отечественной и зарубежной практике в рамках полузаказных ИС создана библиотека СС-элементов, которая позволит разрабатывать устройства с работоспособностью, действительно не зависящей от быстродействия их элементов. Такая библиотека отвечает критерию построения СС-схем, оптимальных для реализации на их основе надежных средств ВТ, стойких к накопленной дозе радиационного излучения, защищенных от тиристорного эффекта и характеризующихся минимальным энергопотреблением.

Литература

1. Басаев А.С., Гришин В.Ю. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция. Электроника: наука, технология, бизнес. 8, 2009 — С. 4-11.
2. Бобков С.Г., Степченко Ю.А., Плеханов Л.П., Дьяченко Ю.Г., Сурков А.В. Самосинхронный базис реализации радиационнстойких микросхем / Первая Российско-Белорусская научно-техническая конференция «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённая 110-летию со дня рождения О. В. Лосева, 4 с.
3. Степченко Ю.А., Петрухин В.С., Дьяченко Ю.Г. Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле // Нано- и микросистемная техника, №5, 2006. – С. 29-36.
4. Степченко Ю.А., Денисов А.Н., Дьяченко Ю.Г., Гринфельд Ф.И., Филимоненко О.П., Фомин Ю.П. Библиотека элементов БМК для критических областей применения // Системы и средства информатики", М., Наука, вып. 14, 2004. - С. 318-361.
5. Степченко Ю.А., Денисов А.Н., Дьяченко Ю.Г. и др. Библиотека самосинхронных элементов для проектирования полузаказных микросхем серий 5503 и 5507 // – М.: ИПИ РАН, 2008. – 238 с.
6. Sokolov I.A., Stepchenkov Y.A., Dyachenko Y.G. Self-timed trigger with single-rail data input. U.S. Patent № 8324938 (04.12.2012).
7. Sokolov I.A., Stepchenkov Y.A., Dyachenko Y.G. Self-timed RS-trigger with the enhanced noise immunity. U.S. Patent № 8232825 (31.07.2012).