



УДК 735.29

**О. В. Непомнящий, А. В. Хныкин,
Н. А. Мамбеталиев**

*Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Красноярский край, Россия*

ОДНОКРИСТАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТВЕТСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрено современное состояние проблем проектирования электронных систем управления ответственного применения. Изложена общая хронология использования электронных компонент в составе бортовых вычислительных комплексов отечественных космических аппаратов. Приведены общие сведения о элементной базе специального назначения от ведущих мировых производителей. Изложены результаты проектирования библиотечных компонент для однокристального бортового вычислителя.

Ключевые слова: система на кристалле, микропроцессор, космический аппарат, алгоритм, интерфейс.

**O. V. Nepomnyashy, A. V. Khnykin,
N. A. Mambetaliev**

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk,
Krasnoyarsk region, Russia*

SINGLE CHIP COMPUTER SYSTEMS OF RESPONSIBLE APPLYING

The current state of the design problems of electronic control systems was reviewed. A general chronology of the use of electronic components in the on-board computer systems of Russian spacecraft was written. The general information on special-purpose hardware components from leading manufacturers was seen. The results of the design component library for on-board single-chip calculator was written.

Key words: SoC, microprocessor, spacecraft, algorithm, interface.

На современном этапе проектирования встраиваемых электронных систем ответственного применения особое внимание уделяют модулям управления бортовыми системами. И здесь одним из приоритетных направлений следует считать переход от аналоговых на цифровые бортовые вычислительные системы, который очевиден и обусловлен целым рядом причин. Основными из

них следует считать: увеличение суммарной производительности, снижение собственного энергопотребления, расширение адаптивных характеристик, снижение массо-габаритных показателей и т.д.

Тем не менее при проектировании бортовых управляющих систем встает целый ряд проблем технического и организационного плана, так или иначе связанных с постоянным увеличением сложности последних. Сегодня отдельные коллективы разработчиков уже не могут решать весь комплекс задач по реали-

зации систем управления традиционными методами. Кроме того, реализация электронных систем специального назначения на основе устаревших аналоговых и цифроаналоговых систем первых поколений технически и экономически не обоснована.

С целью определения перспективных направлений в проектировании рассмотрим хронологию развития бортовых вычислителей в соответствии с применяемой микроэлектронной базой. В хронологии на данный момент выделяют три поколения (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что каждое поколение знаменуется определенной вехой в истории микроэлектронных компонент и ЭВМ в целом, на каждом этапе развития возникают различные требования к проектированию вычислительных подсистем и на данный момент имеется четко выраженная тенденция к использованию заказных и полузаказных микроэлектронных компонент на базе «готовых решений» в однокристалльном исполнении. Наиболее широкой номенклатурой предоставляемых возможностей для реализации конечных устройств являются интегральные схемы коммерческого диапазона применений. Однако несоответствие жестким условиям эксплуатации практически исключает применение последних в составе бортовых систем [1].

Доминирующим направлением в решении означенных проблем является применение однокристалльных вычислительных систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) специального назначения. Основное достоинство ПЛИС – ре-

конфигурируемая архитектура проектируемой системы, позволяющая реализовать практически весь ассортимент требуемых устройств.

Возможность реализации динамически реконфигурируемых архитектур, встроенных микропроцессоров и высокопроизводительных систем цифровой обработки сигнала на одном кристалле (SoC – System on Chip) или в одном корпусе (SiP – System in Package) позволяет решить весь комплекс задач при реализации бортовых систем управления. На основании архитектурно-организационных преимуществ однокристалльных систем и производства ПЛИС для ответственного применения, в том числе и радиационно стойких представителей данного класса, можно с уверенностью утверждать о наличии четвертого этапа в развитии бортовых вычислительных систем.

Основными производителями радиационно стойких ПЛИС, поставляющими свои продукты в Россию, являются Xilinx и Actel. Сравнение параметров различных серий ПЛИС проведено в табл. 2. К сериям радиационно стойких ПЛИС компании Xilinx относятся Virtex-4QV, Virtex-II XQR, Virtex XQR и Virtex-5QV, наиболее современной из них является Virtex-5QV. ПЛИС данной серии наиболее производительны и разработаны специально для противостояния жесткому радиационному излучению – общая накопленная доза радиации для этих ПЛИС составляет 1 Мрад, что при большей производительности превышает прошлые серии в от 3 до 10 раз. Кроме того, данные ПЛИС обладают высоким уровнем интеграции, что позволяет использо-

Таблица 1

Поколения развития БКУ в соответствии с базой электронных компонент

	1-е поколение	2-е поколение	3-е поколение
Годы	60-е	70–90-е	90-е – начало XX века
ОЗУ	–	8–32 кб	8 Мб
ПЗУ	–	64–52 кб	4 Мб
Куда были установлены	«Восток», «Союз», орбитальная станция «Салют»	Союз-Т, Союз ТМ, Прогресс, Прогресс М, Союз ТМА	Союз ТМА-МС, Союз ТМА-М
Вес	–	28–83 кг	5,85 кг
Электрическая мощность	–	75–300 Вт	40 Вт
Вычислительная мощность	–	200–490 тыс. оп/с	9 млн оп/с
Представители	–	Аргон-16, Салют-5Б	ЦВМ-101, состав современной МКС
Особенность	Использование аналоговых систем	Магистрально-модульный принцип построения	Сетевая многомашинная структура с трехуровневой организацией обработки данных и вычислений

Таблица 2

Сравнение семейств радиационно-устойчивых ПЛИС различных производителей

Производитель	Xilinx				Actel			
Семейство	Virtex-4QV	Virtex-IIxQV	VirtexXQR	Virtex-5QV	RTAX-S/SL	RTAX-DSP	RTSX-SU	RTProASIC3
Характеристика								
Количество логических ячеек	55К-200К	32К	6К-15К	130К	30К-500К	250К-500К	32К-72К	13К-75К
Максимальная накопленная доза радиации, крад	300	200	100	1000	300	300	100	25
Частота, МГц	400	300	200	450	350	125	230	350
Особенность	Xtreme DSP	Xtreme DSP	Xtreme DSP	TMR	Antifuse низкое потребление мощности	аппаратные умножители с накоплением	TMR	энергонезависимость и перепрограммируемость

вать их для проектирования высокопроизводительных аэрокосмических систем. Одной из особенностей данной ИС является тройное модульное резервирование (Triple Modular Redundancy – TMR), техника для защиты ячеек памяти от одиночных сбоев. В основе данного способа лежит троекратное увеличение количества ячеек памяти с последующим выбором правильно сохраненного значения на основе мажоритарной логики. Однако это не гарантирует отсутствия сбоев, поэтому производитель рекомендует предусмотреть механизм для восстановления корректного значения. Недостатком тройного резервирования является значительное увеличение площади. Для восстановления правильного значения предлагаются три мажоритарные схемы с обратной связью.

Компания Actel выпускает радиационно стойкие ПЛИС однократно и многократно программируемые. Семействами однократно программируемых ПЛИС являются RTAX-S/SL, RTAX-DSP (до 300 крад), RTSX-SU (до 100 крад). К многократно программируемому относятся микросхемы RTProASIC3, которые сохраняют возможность перепрограммирования в системе при дозе поглощенной радиации до 15 крад и сохраняют работоспособность при поглощенной дозе 25 крад.

Особенностью RTAX-DSP является большое количество встроенных аппаратных умножителей с накоплением, в результате чего повышается производительность при реализации арифметических функций, необходимых в DSPIP-блоках. Семейство RTSX-SU является улучшенной версией коммерческой серии SX-A. Для повышения радиационной

стойкости все регистры RTSX-SU используют тройное резервирование (TMR).

Маршруты и технологии проектирования систем на базе ПЛИС ответственного применения в большинстве случаев полностью совпадают с традиционными и перспективными маршрутами проектирования коммерческих приложений [2]. При разработке SoC для использования в условиях космического пространства полностью оправданным является применение промежуточных решений на базе однокристалльных систем и ПЛИС коммерческого направления. Такие решения позволяют максимально быстро выполнить разработку архитектуры будущей системы, осуществить разработку программного обеспечения для встроенных процессоров и провести серию первичных наземных испытаний. Дальнейшее проектирование систем для БКУ подразумевает перенос разработанных моделей, архитектур и реализованных макетов встроенных систем на целевой кристалл специального назначения [3].

С целью наиболее простого переноса коммерческого варианта системы на кристалл специального применения при изначальной разработке проекта следует использовать спецификации, имеющие реальное воплощение в целевом кристалле специального назначения. Например, использовать программное процессорное ядро, имеющее версию повышенной живучести, или IP-модули со встроенными системами дублирования и мажоритарными каскадами.

В настоящее время коллективом специалистов Сибирского федерального университета реализован ряд научно-прикладных за-

дач по разработке комплексов испытательной аппаратуры, встроенных вычислительных систем на базе сверхбольших интегральных схем (СБИС) и систем на кристалле (СнК). Разработаны модули математической обработки для центрального процессора, таймеры, генераторы сигнала, аппаратные кодеки, системы модуляции и пр. Перечисленные модули предназначены для использования в авиационной и космической промышленности. Так, большинство встраиваемых на кристалл узлов имеют схемы тройного резервирования, мажоритарные схемы выходных шин, схемы дублирования регистрового фрейма, модулей встроенной памяти и т.д. Опыт в разработке специализированных библиотек позволил перейти к проектированию однокристалльных систем для БКУ. В настоящее время выполняются работы по проектированию комплекса КПА электромеханических устройств КА,

разрабатывается СБИС для управления исполнительной автоматикой КА, электронные модули интерфейсных каналов КА.

Библиографические ссылки

1. Непомнящий О. В., Краснобаев Ю. В., Титовский С. Н., Хабаров В. А. Микроэлектронные устройства управления // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5, № 2. С. 162–168.
2. Рабаи Жан М., Чандракасан А., Николич Б., Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. М. : ООО «ИД Вильямс», 2007. 912 с.
3. Непомнящий О. В., Алекминский С. Ю. Проблемы верификации проекта при сквозном проектировании вычислительных систем на кристалле // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 4–7.

*Статья поступила в редакцию
13.11.2012 г.*