

---

Проектирование полузаказных БИС на  
БМК серий 5503 и 5507

---

С.В.Гаврилов, А.Н.Денисов,  
В.В.Коняхин, М.М.Макарцева

Под ред. А.Н.Саурова

книга **2** *САПР «Ковчег 3.0» для  
проектирования микросхем на  
БМК серий 5503, 5507, 5521 и 5529*

Москва 2013

Гаврилов С.В., Денисов А.Н., Коняхин В.В., Макарецва М.М.

САПР «Ковчег 3.0» для проектирования микросхем на БМК серий 5503, 5507, 5521 и 5529. – М.: \_\_\_\_\_, 2013, ??? с.: ил..

Книга содержит описание системы автоматизированного проектирования «Ковчег 3.0», предназначенной для проектирования КМОП БИС на основе БМК широко применяемых в различных радиоэлектронных устройствах.

Предназначена для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, а также для преподавателей, студентов старших курсов и аспирантов, изучающих современные методы проектирования полужаказных БИС. Учебная версия САПР «Ковчег 3.0» доступна на сайте (<http://www.asic.ru>).

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения авторов книги.

ISBN 5-93497-011-9

© Гаврилов С.В., Денисов А.Н.,  
Коняхин В.В., Макарецва М.М.

## ***Введение***

Одним из основных способов достижения необходимых эксплуатационных характеристик при разработке современной радиоэлектронной аппаратуры, предназначенной для критических условий эксплуатации, является применение специализированных микросхем.

Традиционно специализированные интегральные микросхемы (ASIC — Application-Specific Integrated Circuits) по способу изготовления и освоения в производстве разделяют на три большие группы:

- полностью заказные микросхемы, для которых требуется изготовление полного комплекта фотошаблонов, выполнение полного цикла обработки кремниевых пластин и проведение полного комплекса квалификационных испытаний;
- полузаказные микросхемы на основе базовых матричных кристаллов (БМК), для изготовления которых используются базовые пластины с заранее сформированными транзисторными структурами и частично сформированными слоями разводки, а сам процесс изготовления сводится к формированию одного или нескольких слоёв межсоединений, для чего изготавливаются фотошаблоны только переменных слоёв: металлизации, контактных и переходных окон. Квалификационные испытания проводятся только на этапе освоения БМК и для выпуска конкретных типов полузаказных микросхем не требуются;
- программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС), которые представляют собой корпусированные микросхемы, специализация («зашивка») которых осуществляется индивидуально пользователем вне кремниевой фабрики путём замыкания или размыкания перемычек внутри схемы с помощью специальных программно-аппаратных средств. Надежность специализированных микросхем на ПЛИС в значительной степени

---

определяется не только самой ПЛИС, но и надежностью способа специализации каждой конкретной микросхемы.

Оптимальный выбор элементной базы для реализации аппаратуры зависит от множества факторов. Для аппаратуры специального назначения при всей важности экономических показателей, определяющими факторами являются повышенная стойкость к внешним воздействующим факторам (ВВФ), высокая надёжность и долговечность, низкое энергопотребление, высокая функциональность, возможность оперативной разработки и поставки интегральных микросхем (ИС), длительный период (до 25 лет) поддержки производства данного типа ИС. При этом серийность специализированных микросхем в большинстве случаев крайне низка и может составлять сотни и даже десятки микросхем.

Принято считать, что полностью заказные микросхемы обеспечивают максимальную функциональность, надёжность и стойкость, минимальную стоимость при массовом производстве, но требуют максимальных затрат на этапе разработки и освоения производства и для производства малых партий не применимы. ПЛИС имеют более высокое энергопотребление, дополнительные элементы для специализации, что снижает надёжность микросхем и определяет их более высокую стоимость по сравнению с другими группами специализированных ИС. Полузаказные ИС занимают промежуточное положение между полностью заказными ИС и ПЛИС. По показателям надёжности, энергопотребления и стойкости к ВВФ они сравнимы с заказными ИС, в тоже время по длительности цикла «разработка–изготовление–испытание» сопоставимы с ПЛИС. Производство БМК, как правило, поддерживается в течение длительного времени (более 15 лет), производители предлагают заказчикам собственные библиотеки и технологии проектирования ИС, а также предоставляют услуги по прототипированию полузаказных микросхем. Как уже отмечалось, выбор способа реализации специализированных ИС для специальной аппаратуры определяется множеством факторов, но во многих случаях именно полузаказные ИС обеспечивают наилучшие показатели.

## ***Особенности БМК***

Базовый матричный кристалл (БМК) — это универсальная заготовка для производства ИС. Специализация БМК осуществляется технологически путём формирования слоёв металлизации. В структуре БМК, в сравнении с ПЛИС, отсутствуют избыточные элементы, обеспечивающие программирование электрической схемы, что значительно снижает общую сложность микросхемы, повышая её надёжность. Использование микросхем на основе БМК обеспечивает следующие преимущества:

- уменьшение габаритов аппаратуры за счёт снижения количества используемых микросхем и уменьшения размеров печатных плат;
- улучшение технических характеристик за счёт увеличения системного быстродействия и сокращения потребляемой мощности;
- повышение надёжности в сравнении с ИС малой степени интеграции и ПЛИС;
- возможность объединения в одной микросхеме цифровой и аналоговой обработки информации;
- обеспечение защиты разработки от возможного несанкционированного воспроизводства.

Все наиболее дорогостоящие и длительные процедуры проектирования, производства и аттестации полузаказных ИС выполняются на этапе освоения БМК, разработка которого осуществляется с учётом жестких условий эксплуатации. Изготовление микросхем выполняется по стандартной технологии массового производства. Эксплуатационные параметры ИС определяются параметрами БМК и подтверждаются квалификационными и периодическими испытаниями на ИС, являющейся типовым представителем. Результаты испытаний распространяются на все ИС, разработанные и изготовленные на данном типе БМК. Выпускаются групповые технические условия (ТУ). В качестве документации на

конкретную полузаказную ИС формируется карта заказа, которая является приложением к групповым ТУ.

Для создания полузаказной ИС выбирается необходимый по объему и параметрам БМК. Проектирование микросхемы заключается в разработке электрической схемы и соответствующей топологии слоев металлизации, а производство — в формировании этих слоев на ранее изготовленных и аттестованных пластинах-полуфабрикатах БМК с уже сформированными транзисторными структурами.

### ***Методология проектирования специальной аппаратуры с применением БМК***

Разработка современной аппаратуры — сложный и длительный процесс, в ходе которого решаются системные и технические задачи, выполняется проектирование специализированной элементной базы, отрабатываются алгоритмы функционирования, интерфейсы и взаимодействие блоков в составе изделия, разрабатываются конструкция и печатные платы, разрабатывается и тестируется программное обеспечение и т.д. При этом используются определённые методы и маршруты проектирования, позволяющие реализовать необходимые схмотехнические решения с помощью программных или аппаратных средств. Поэтому процесс разработки аппаратуры можно назвать методологией проектирования.

Традиционно, методология проектирования специализированной аппаратуры с применением стандартных компонентов базировалась на микросхемах малой и средней степени интеграции, а также дискретных компонентах. Разработчик мог использовать серийно выпускаемые разрешённые к применению в специальной аппаратуре микросхемы и дискретные компоненты, функциональные возможности которых были весьма ограничены. Хотя методология проектирования на стандартных компонентах имела существенные ограничения, связанные с функциональными возможностями электронной компонентной базы (ЭКБ) и средств проектирования, она сформировала принцип ориентации при разработке изделия на серийный образец, его технологичность,

тестопригодность, а также на выполнение всего цикла разработки макетного, опытного и серийного образцов в рамках единой ЭКБ, что позволяло эволюционно построить процесс разработки и освоения в производстве новых изделий.

Следующим шагом в развитии методологии проектирования аппаратуры стала методология разработки аппаратуры с применением БМК. Традиционно проектирование полузаказных микросхем на основе БМК предполагает моделирование поведения микросхемы специальными программными средствами и конечную проверку правильности функционирования микросхемы в аппаратуре после её изготовления. Разработка выполняется на основе отработанных методов, средств и маршрутов проектирования и ориентирована на получение годных микросхем уже при первом изготовлении. Это обеспечивается высокими требованиями к тестируемости микросхемы, качеству проектирования и производства.

Основными недостатками методологии разработки аппаратуры с применением БМК являются длительный цикл изготовления полузаказных микросхем и невозможность исследования проектов микросхем в составе аппаратуры до их изготовления, что, как правило, ведет к многократным коррекциям и повторным изготовлениям микросхем в процессе разработки изделия. Появление ПЛИС, позволяющих легко выполнять коррекцию проекта специализированной ИС непосредственно в аппаратуре, явилось новым шагом в развитии методологии разработки аппаратуры. Применение ПЛИС обеспечивает рекордно короткий проектно-технологический цикл, минимальные затраты на проектирование, максимальную гибкость при модификации аппаратуры. При этом весь проектно-технологический цикл выполняется разработчиком РЭА на одном рабочем месте.

Попыткой совместить преимущества разработки аппаратуры с применением ПЛИС с одновременным обеспечением высоких эксплуатационных и надежности характеристик стала методология ПЛИС-БМК, которая предполагает отработку макетных образцов аппаратуры на ПЛИС с последующей их заменой на БМК.

сложным этапом указанной методологии является переход от проекта ПЛИС к проекту БМК, который, как правило, требует полного перепроектирования. Это обусловлено конструктивными особенностями ПЛИС, применяемыми методами проектирования, особенностями библиотек элементов. При необходимости коррекции проекта в результате испытаний экспериментальных образцов требуется либо одновременное сопровождение изменений в проектах ПЛИС и БМК, либо повторная отладка проекта на ПЛИС с повторным переводом скорректированного проекта на БМК.

Методология разработки аппаратуры ПЛИС – БМК, имеет возможность отработки проекта микросхемы средствами ПЛИС в составе аппаратуры. Однако, даже нормально функционирующая аппаратура с использованием ПЛИС фактически является только макетным образцом и для получения опытного и серийного образцов требуется значительные усилия, так как помимо перевода проектов микросхем с ПЛИС на БМК или заказные отечественные БИС требуется полная переделка всех печатных плат, повторная отладка и проведение всего комплекса предварительных и квалификационных испытаний разрабатываемого изделия.

Следующим шагом в развитии методологии проектирования стала методология БМК – ПЛИС – БМК, разработанная и реализованная специалистами НПК «Технологический центр» на базе системы автоматизированного проектирования (САПР) «Ковчег 3.0».

Методология основана на прототипировании микросхем с использованием имитаторов БМК. Конструкция имитаторов представляет собой микромодуль, в нижней части которого располагается ПЛИС в микрокорпусе, а в верхней части расположено ПЗУ и реализована схема загрузки ПЛИС. Тип ПЛИС соответствует объему поля транзисторов имитируемого БМК. ПЗУ обеспечивает возможность загрузки в ПЛИС логической модели прототипируемого проекта ИС. На нижней печатной плате имитатора расположены внешние выводы. Размер печатной платы соответствует размеру корпуса, в котором выпускаются БМК, расположение внешних



выводов имитатора так же соответствует расположению внешних выводов БМК (рис. 1а, 1б).

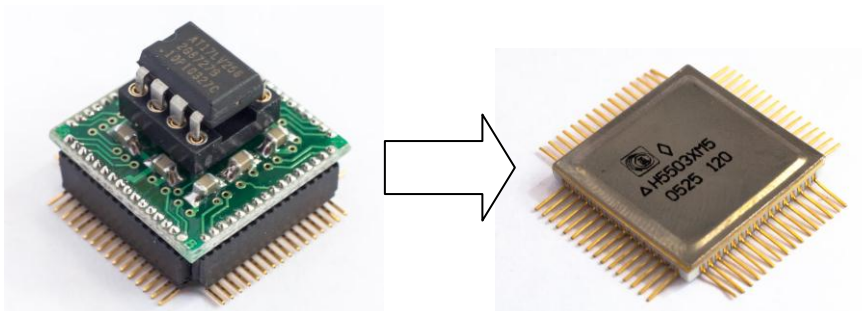


Рис. 1а. Имитатор и микросхема на основе БМК H5503XM5

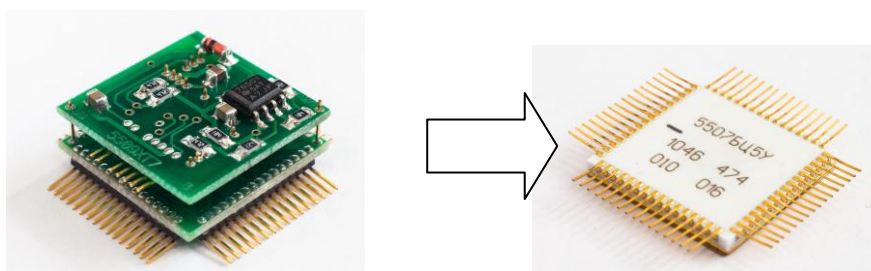


Рис. 1б. Имитатор и микросхема на основе БМК 5507БЦ5У

Данная методология позволяет в короткие сроки выполнить разработку и отладку макетного образца изделия с одновременной обработкой печатных плат. При переходе к опытному образцу обеспечивает быструю и гарантированную реализацию изделия на отечественной ЭКБ.

Можно выделить четыре основных принципа, которые лежат в основе методологии БМК – ПЛИС – БМК:

1. Ориентация на отечественную элементную базу, разрешенную к применению в аппаратуре специального назначения. Разработка технических требований к изделию выполняется с учетом возможностей освоенных в производстве серий БМК. Исходя из технических требований, разрабатывается архитектура изделия, формулируются требования к полузаказным микросхемам, проектируются печатные платы под конструкцию БИС на БМК. Весь

---

процесс разработки обеспечивает эволюционную отладку изделия, начиная со стадии эскизного проекта.

2. Получение годных образцов микросхем с первой попытки. Это достигается:

- за счёт применения методов бездефектного проектирования;
- за счёт разработки функциональных и контрольно-диагностических тестов, обеспечивающих проверку правильности функционирования и возможность прогнозирования электрических и временных параметров разрабатываемой микросхемы;
- за счёт разработки топологии с учетом специфики проекта микросхемы, скоростных и критических цепей;
- благодаря проведению аттестации проекта микросхемы с учётом факторов окружающей среды и разброса технологических параметров изготовления.

3. Применение оригинальной библиотеки элементов, учитывающей специфику БМК и ориентированной на методы бездефектного проектирования;

4. Прототипирование на имитаторах, позволяющее провести исследование и испытание микросхем в процессе их проектирования в составе реальной аппаратуры до их изготовления.

### ***Серии БМК 5503 и 5507***

На российском рынке полный комплект услуг по разработке и производству больших интегральных схем (БИС) на основе БМК предоставляет НПК «Технологический центр».

Основные характеристики БМК серий 5503 и 5507, разрешенных к применению в аппаратуре специального назначения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип БМК	Количество условных вентилях в поле БМК	Количество внешних контактов	Напряжение питания, В ( $\pm 10\%$ )	Рабочая частота до, МГц	Типы используемых корпусов
5503ХМ1	576	28	5	30	H09.28-1В 5123.28-1
5503ХМ2	1296	42	5	30	H14.42-1В 5124.44-1
5503ХМ5	3072	64	5	30	H18.64-1В 4239.68-1
5503БЦ7У	5478	64	5	25	H18.64-1В 4239.68-1
5507БЦ1У	576	28	3	25	H09.28-1В 5123.28-1
5507БЦ2У	1296	42	3	25	H14.42-1В 5124.44-1
5507БЦ5У	3072	64	3	25	H18.64-1В 4239.68-1
5507БЦ7У	5478	64	3	25	H18.64-1В 4239.68-1

Серии БМК 5503 и 5507 имеют единую библиотеку ячеек [1, 2] с универсальной системой обозначений, которая состоит из трёх частей:

1) библиотека базовых ячеек (5503) включает в себя все основные группы логических элементов, а также периферийные элементы, обеспечивающие функции входа, выхода и вход/выхода цифровых и аналоговых сигналов, пассивное или активное доопределение внешнего контакта. Библиотека включает в себя 287 ячеек.

2) библиотека цифро-аналоговых ячеек (5503+), включает в себя 28 ячеек, позволяющих реализовать аналого-цифровую обработку сигналов.

3) библиотека специальных ячеек (5503++), которая содержит элементы, разработанные по специфическим требованиям различных заказчиков. Данная библиотека сторонним заказчикам не предоставляется.

---

На базе БМК серий 5503 и 5507 разработано и выпускается более 500 типов полузаказных микросхем, в том числе для аппаратуры космического назначения. Например, для космических кораблей «Прогресс-М» (25 пусков), «Союз-ТМА» (18 пусков), разгонного блока «Бриз-М» (39 пусков) и других космических аппаратов. Примеры некоторых специализированных микросхем приведены на нашем сайте (<http://www.asic.ru>).

Книга написана в форме технического описания и состоит из 16 разделов, посвященных описанию подсистем и команд САПР «Ковчег 3.0», и 2-х приложений, включающих в себя краткое описание серий БМК 5503, 5507, 5521 и 5529 и средств прототипирования микросхем. Каждый раздел имеет самостоятельное содержание и составную нумерацию страниц, включающую в себя номер раздела и номер страницы в разделе. Рисунки также имеют составные номера.

Каждый раздел содержит, по возможности, полную информацию по описываемому вопросу и включает в себя ссылки на другие разделы. Жирным шрифтом отмечены названия команд и меню графической оболочки САПР «Ковчег 3.0», а также названия окон.

Система проектирования «Ковчег» активно развивается, поэтому некоторые разделы книги могут не соответствовать текущей версии САПР и будут доработаны и скорректированы в последующих изданиях.

Учебная версия САПР «Ковчег» доступна для скачивания на нашем сайте (<http://www.asic.ru>). В состав учебной версии входят:

- полная промышленная версия САПР для проектирования ИС на БМК серий 5503 и 5507;
- учебная версия САПР для проектирования ИС на младших типах БМК серий 5521 и 5529.