Содержание

1. Эволюция СБИС. Системы на кристалле, в корпусе и на подложке

2. Базовые технологии и их ограничения

3. Проблемы проектирования микросхем с низковольтным питанием

4. Микросхемотехника аналоговых и аналого-цифровых СФ блоков

Библиографический список

1. Эволюция СБИС. Системы на кристалле, в корпусе и на подложке

Переход на субмикронную и частично глубокую субмикронную технологии наглядно показал, что эффективность применения БИС и СБИС микроконтроллеров любой архитектуры в радиоэлектронной аппаратуре определялась качеством и номенклатурой периферийных ИС, образующих интерфейс связи с датчиками и исполнительными устройствами соответствующей мини-системы. Низкая надежность и помехозащищенность внешних (внекристалльных) соединений, сложность тестирования и поиска неисправностей сделали экономически целесообразной замену плат и мини-блоков. Именно поэтому и произошел переход от мини-систем к микросистемам – системам на кристалле (СнК), где указанные соединения реализуются в кристалле или на побложке. Отметим, что первоначально для задач управления микро- и мини-роботов, а также для сверхточного управления традиционными объектами были разработаны микросистемы – относительно несложные микроизделия, реализующие весь цикл измерения и преобразования от сенсора до исполнительного механизма. Эта область (микросистемная техника) имеет самостоятельное развитие, где ограничивающими факторами в первую очередь являются материалы и технологические нормы изготовления микросенсоров и исполнительных механизмов.

Современные задачи связи, автоматического управления и техники специальных измерений требуют для обеспечения относительно высокой серийности изделий не только кардинального повышения надежности, но и возможности их программной адаптации к решаемой задаче. Именно поэтому такие системы должны иметь очень мощное программируемое ядро с набором быстродействующих областей памяти констант (программ) и данных. Реализовать указанное можно либо применением новых дорогостоящих материалов, либо за счет перехода в цифровой части системы на глубокую (≤ 0,35 мкм) субмикронную технологию. Однако даже для цифрового процессора в любом случае важнейшей задачей в процессе производства и эксплуатации остается тестирование.

В перспективе в рамках систем на кристалле могут быть решены многие проблемы интеграции аналоговых, цифровых, радиочастотных (RF) и даже более экзотических структур – микромеханические системы (MEMS), датчики, силовые приводы, химические преобразователи, оптические блоки и т.п. Поэтому в современной интерпретации СнК является сложной интегральной схемой, объединяющей на одном чипе или чипсете все основные функциональные элементы полного конечного продукта. В общем случае СнК как проект включает в себя как минимум один программируемый процессор, внутрикристалльную память и аппаратно реализованные ускоряющие функциональные элементы. В состав СнК также входят интерфейсы с периферийными устройствами и(или) с внешней средой, именно поэтому их базовым признаком являются аналоговые компоненты, узлы и устройства.

Следует подчеркнуть, что слово «система» в термине «система на кристалле» важней, чем слово «кристалл». Потребности практики всегда опережают технологические возможности, поэтому для многих наиболее наукоемких приложений оказывается целесообразным проектирование функциональных блоков как часть интегрированного целого, а физически они размещаются не в кристалле, а на одной подложке и корпусе. Такие системы – System in Package (SiP), System on Package (SoP) – оказываются более надежными, качественными и дешевыми, но при этом они проектируются как единое целое. Их составные части – сложно-функциональные блоки (СФ блоки) – являются также интегрируемыми проектами СнК (IP блоки) и основой повышения производительности и «живучести» проектирования за счет повторного использования этого интеллектуального продукта.

Важным фактором в развитии такого подхода явилось создание организации Virtual Socket Interface (VSI) Alliance, объединяющей ведущие электронные фирмы для разработки эффективных методов повторного использования IP, стандартных требований по их созданию и обмену. Деятельность ассоциации позволила установить необходимые «горизонтальные» связи между системными компаниями, дизайн-центрами и компаниями, занимающимися САПР. Можно утверждать, что без таких ассоциаций развитие современной микроэлектронной техники невозможно.

Указанное проектирование оказало решающее влияние на электронную промышленность в целом. Эволюция технологических процессов при-вела к резкому увеличению единовременных расходов. Например, стоимость шаблонов на уровне 0,13 мкм приближается к 1,0 млн долл. Но более быстрыми темпами росли затраты на проектирование отдельных устройств. Так, даже при значительных успехах в повторном проектировании (IP) стоимость СиК на уровне 0,13 мкм оценивается от 5,0 до 20,0 млн долл. Статистика последних лет показывает, что общее число проектов в классе специализированных интегральных схем (ASIC проектов) сократилась практически в 3 раза. Однако произошло увеличение проектов в сегменте стандартных ИС (ASSP) и полузаказных (FPGA) ИС (БМК, ПЛИС, ПАИС, ПЛМ), которые можно классифицировать как СнК в начальной форме.

Такой сдвиг в стилях проектирования привел к ряду последствий в электронной промышленности. Во-первых, если РЭА может технически ориентироваться на полузаказные ИС, то это оказывается эффективным при серийности от сотен до десятка тысяч экземпляров. Во-вторых, в этом же классе предпринимаются попытки превращения начальной формы СнК в гибкую платформу, которая может быть использована для различных инженерных приложений с помощью программируемости и многочисленных интерфейсов. Однако в любом случае опережающая разработка СФ блоков для конкретных технологий (IP) приобретает первостепенное значение. В этом отношении следует отметить, что технологические уровни менее 0,35 мкм существенно ухудшают качественные показатели аналоговых компонентов, определяющих динамический диапазон узлов, устройств и СФ блоков. Поэтому для многих инженерных приложений системы на подложке и в корпусе останутся основными.

Как отмечалось ранее, многие задачи построения РЭА требуют проектирования под конкретную технологию специальных аналоговых или цифро-аналоговых СнК. Также БИС и СБИС образуют специальный и во многом специфический класс электронных систем, которые условно называются смешанными – содержащими значительное число не только вспомогательных аналоговых узлов и устройств. Зарубежная классификация их отмечает как mixed-signal SoC и Analogue/mixed-signal (AMS) SoC. Однако работа в этой области только начинается. Так, Texas Instruments, явившаяся пионером в этом направлении, несмотря на первоначальные планы создания смешанной СнК, интегрирующей цифровую, аналоговую и радиочастотную части на одной кремниевой подложке, не имеет в настоящее время явных (рыночных) успехов.

Обсуждаемые СнК можно условно разделить на два основных типа. Во-первых, следует выделить AMS SoC с некоторыми специфическими аналоговыми блоками – модули фазовой автоподстройки частоты, АЦП, ЦАП, блоки периферийных интерфейсов, видеоаудиокодеки и т.п. Такие СнК образуют «D/а» класс – в основном цифровые, немного аналоговые. В таких системах аналоговые блоки можно рассматривать в качестве унифицированных СФ блоков. Их на этапе проектирования можно рассматривать в качестве «серых ящиков», и они могут успешно интегрироваться в общую систему на основе строгих правил, которые заранее оговорены их разработчиками. Ко второму типу следует отнести СнК «А/d» класса – в основном аналоговые и немного цифровые. Из этого не следует, что цифровая часть системы не требует мощного программируемого ядра. Скорее наоборот – особенность функционирования СнК предопределяет высокопроизводительные процессорный модуль и даже подсистему. Однако в этом классе СнК аналоговые модули нельзя рассматривать в качестве «черных ящиков». Здесь аналоговые узлы, а возможно, и СФ блоки обеспечивают основу функционирования системы (не только интерфейсы) и поэтому накладывают сложные и во многом специфические ограничения на их интеграцию. Специалисты Texas Instruments считают, что для обеспечения надежности проекта разработчики аналоговых блоков должны быть основными системными (СнК) интеграторами. С точки зрения РЭА конечного назначения AMS A/d класса обеспечивают взаимодействие СнК с «высшим миром». Указанная функция реализуется СФ блоками СнК, внешними микросенсорами и исполнительными устройствами.

2. Базовые технологии и их ограничения

В настоящее время доминирующим направлением остается кремниевая КМОП-технология со свойственными ей преимуществами и недостатками. В первую очередь по этой причине достаточно сложно в едином технологическом цикле изготовить качественные активные компоненты для аналоговой и дискретно-аналоговой обработки сигналов, а дальнейшее ужесточение технологических норм существенно ухудшает не только их малосигнальные параметры, но еще более усложняет процедуру тестирования системы в целом. Именно поэтому увеличение числа аналоговых входов (портов ввода) осуществляется практически всегда за счет мультиплексирования и повышения производительности встроенного АЦП. Однако номенклатура аналоговых узлов, необходимых для решения практических задач, остается достаточно большой. Так, в состав СБИС микроконверторов входят указанные выше мультиплексор и АЦП, коммутируемый источник опорного напряжения для согласования максимального входного напряжения с АЦП, датчик температуры, косвенно обеспечивающий учет температурной погрешности преобразования физических величин, компаратор, блок ФАПЧ, а также набор ЦАП. В этой связи прецизионное масштабирование и ограничение спектра входных сигналов должно либо выполняться в аналоговых датчиках, либо приходится, пусть и в ограниченном виде, возвращаться к мини-системе. Характерной чертой таких систем является достаточно большая, в основном определяемая аналоговой частью потребляемая мощность. Аналогичный вывод справедлив и для аналоговых микроконтроллеров, в которых взамен блоков ФАПЧ и компараторов включены простейшие, совместимые с 10-разрядной шиной АЦП, инструментальный усилитель и фильтр нижних частот (подключается внешний частотозадающий конденсатор). Иногда параметры этих устройств инициализируются пользователем. Отсутствие качественных аналоговых портов ввода с прецизионным преобразованием сигналов аналоговых датчиков и сенсорных датчиков связано с жестким ограничением на число аналоговых компонентов кристалла. Здесь доминирующими факторами остаются потребляемая мощность и геометрия аналогового транзистора. В силу этих и других не менее важных для точности вычисления факторов практически всегда применяется режим разделения времени преобразования и основного вычисления.

Кремниево-германиевая (SiGe) БиКМОП технология занимает лидирующие позиции в области изготовления СБИС для цифровой обработки сигналов, телекоммуникационных систем и многих других важных практических приложений, что обусловлено простотой интеграции в стандартный КМОП процесс, относительно низкой стоимостью производства, боль-шим процентом выхода годных и высоким быстродействием приборов [86]. Крупнейшие компании, такие как IBM, Daimler-Benz, Phillips, Hitachi, сегодня разрабатывают и производят интегральные схемы, основным компонентом которых являются быстродействующие SiGe биполярные транзисторы, с граничными частотами 100 ГГц. Так, компанией IBM было показано, что граничная частота SiGe биполярных транзисторов с гетеропереходом может достигать 210 ГГц. С развитием технологии Si1-xGex-сплавов появилась возможность создания быстродействующих МОП транзисторов с SiGe/Si каналом, что в перспективе позволит создавать на их основе быстродействующие КМОП микромощные схемы с граничными частотами 40–50 ГГц [6].

Важную роль в современной микроэлектронике играют высокотемпературные силовые элементы и преобразователи на базе карбида кремния. Несмотря на значительные инвестиции в этом направлении федеральными правительствами и фирмами ряда стран, ожидаемого результата получить не удалось. Характерные для этого случая зонные процессы приводят к недостаточному качеству малосигнальных параметров приборов.

Результаты отечественных и зарубежных исследований показывают [8], что для создания высоконадежных аналого-цифровых КМОП БИС, для случаев, когда требуются повышенная радиационная стойкость и температурная стабильность, весьма эффективно использование технологии «кремний на изоляторе» (КНИ). По сравнению с традиционной КМОП технологией на объемном кремнии технология КНИ обладает целым рядом важных преимуществ.

Для цифровых КМОП схем эти преимущества можно сформулировать следующим образом [8]:

* очень хорошая изоляция элементов друг от друга и очень малые токи утечки;
* меньшая площадь КМОП КНИ элемента по сравнению с элементом, изготовленным по «объемной» технологии (при отсутствии контакта к подложке);
* меньшие емкости переходов, повышенные частоты работы схем, меньшая потребляемая мощность.

Для аналого-цифровых КМОП схем КНИ технология обеспечивает ряд дополнительных преимуществ [8]:

* высокое качество изоляции цифровых и аналоговых блоков в смешанных АЦ системах на кристалле;
* возможность создания на КНИ подложках высококачественных пассивных R, С, L-элементов;
* меньшие потери переменной мощности в радиочастотном и СВЧ диапазонах;
* большая крутизна ВАХ приборов в области малых токов по сравнению с приборами, выполненными по «объемной» технологии.

Использование технологии «кремний на изоляторе» позволяет повысить верхний диапазон рабочих температур ИС до 200 °С.

субмикронный микросхема блок кристалл

3. Проблемы проектирования микросхем с низковольтным питанием

Последние несколько лет источники питания с напряжением 5 В вытесняются более низковольтными. Требования к уменьшению рассеиваемой мощности и уменьшению числа батарей в таких приложениях, как беспроводные устройства связи и персональные компьютеры, привели к снижению напряжения питания в цифровых схемах до уровня 1,5 В. Эта тенденция была реализована в современных SiGe транзисторах, которые сконструированы так, чтобы обеспечить максимальную частоту среза (f1) в компромиссе с напряжением пробоя (Uпр). Для кремниевых транзисторов . Таким образом, малые размеры транзисторов, обеспечивающие высокие значения f1 (до 200 ГГц), привели к снижению напряжения питания микросхем.

Уменьшение напряжения питания Еп в цифровых биполярных схемах приводит к появлению новых проблем, и некоторые из них становятся особенно важными при напряжении питания менее 2 В. Принципиальная сложность уменьшения напряжения Еп состоит в том, что биполярный транзистор имеет фиксированное напряжение база-эмиттер Uбэ, которое не сокращается линейно с уменьшением технологических норм, так как

, (1)

где , Iк – ток коллектора; Is – обратный ток эмиттерного p-n перехода. При этом параметры транзистора и уровни тока оказывают слабое влияние на напряжение Uбэ. На практике плотность тока в биполярном транзисторе (Iк/Is), изменяя свое значение, также слабо влияет на напряжение Uбэ. Если в используемой технологии Uбэ =0,8 В, то применение 1,5 В источника питания приводит к тому, что между «землей» и шиной Еп не может быть включено больше, чем один переход база-эмиттер.

Другая трудность в проектировании низковольтных аналоговых и цифровых схем на биполярных транзисторах состоит в том, что значение амплитуды переключения в типичных ЭСЛ схемах не может определяться произвольно, а минимальное значение ограничено уровнем шума. Биполярная дифференциальная пара (дифференциальный каскад в структуре ЭСЛ) требует, чтобы уровень входного логического сигнала был как минимум 5,5ϕт. В действительности же, к этому напряжению нужно еще добавить падение напряжения на сопротивлениях в эмиттерной цепи, а также остаточное напряжение при неполном переключении, ограниченном коэффициентом усиления по току, и падение напряжения на шинах питания. Все это приводит к тому, что минимальное напряжение переключения должно составлять несколько сотен милливольт.

Для того чтобы поддерживать высокую скорость работы транзисторов, они не должны входить в «тяжелый» режим насыщения. Это ограничение прямо воздействует на минимальное напряжение коллектор-эмиттер (Uкэ), которое тоже составляет примерно 400 мВ. Учитывая вышесказанное, а также численные значения напряжения Uбэ≈ 800 мВ, можно сделать вывод о том, что запрещается использовать многоярусные дифференциальные пары или каскодные конфигурации (архитектуры) при напряжении питания 1,5 В.

Таким образом, отсутствие возможности масштабирования напряжения на переходе база-эмиттер еще больше обостряет проблему дальнейшего масштабирования напряжения питания схем на биполярных транзисторах. Для КМОП транзисторов такой проблемы не существует в принципе, потому что их пороговое напряжение Uп может быть снижено на стадии производства.

На практике такие неидеальности КМОП транзисторов, как наличие проводимости, при отсутствии приложенного к затвору порогового напряжения (так называемая подпороговая проводимость), зависимость порогового напряжения от температуры, а также эффект короткого канала, приводят к тому, что необходимо для КМОП транзисторов установить пороговое напряжение, равное нескольким сот милливольтам. Это приближает их по статическим характеристикам к биполярным транзисторам.

4. Микросхемотехника аналоговых и аналого-цифровых СФ блоков

Сдерживающим фактором развития СБИС типа «система на кристалле» является несовершенство аналоговой микросхемотехники, которая требует увеличения области кристалла, отводимой на активные и пассивные компоненты цепи, и значительных рабочих токов, обеспечивающих необходимое качество малосигнальных параметров. В этой связи одним из главных направлений в микроэлектронике по-прежнему являются системные исследования в предметных областях, которые должны быть нацелены на воспроизводство новых архитектур контроллеров и микроконверторов, ориентированных на создание соответствующего класса радиоэлектронной аппаратуры, обоснование экономической и технологической целесообразности перераспределения «центра тяжести» между СБИС, датчиками и исполнительными механизмами систем и т.п. [6, 5]. Однако, очевидно, всегда в состав обсуждаемого класса СБИС будут входить достаточно сложные аналоговые и, чаще всего, инициализируемые посредством программируемого ядра блоки, которые и составляют базу «интеллектуального продукта». Здесь следует учитывать еще одно важное в практическом отношении обстоятельство: создание под результаты системных исследований комплекта аналоговых IP блоков позволит выйти на новый принцип организации производства изделий микроэлектронной техники, когда независимо от внутрикристалльной принадлежности функционально законченные устройства обеспечивают более полную аппаратно-программную совместимость нового класса мини-систем. Все это уменьшает номенклатуру изделий микроэлектроники, позволяет согласовать их параметры и характеристики и, что самое главное, упрощает их применение в конкретной аппаратуре [5].

С учетом сказанного можно в настоящее время выделить по крайней мере 4 взаимосвязанные задачи аналоговой микросхемотехники с традиционным функциональным подчинением.

1. Разработка схемотехники микрорежимных узлов элементного базиса с низким влиянием технологических погрешностей изготовления активных компонентов.
2. Создание комплекта принципиальных схем активных элементов для аналоговых портов ввода-вывода.
3. Схемотехника широкополосных экономичных аналоговых мультиплексоров, компараторов, источников опорного напряжения и питания, операционных усилителей, преобразователей импеданса и т.п.
4. Схемотехника прецизионных функционально завершенных устройств аналогового интерфейса – инструментальные усилители, фильтры, блоки ФАПЧ, АЦП, ЦАП, балансные смесители и умножители, квадратурные модуляторы и демодуляторы, управляемые генераторы гармонических колебаний и мультивибраторы и т.п.

В классе первой проблемы необходимы предельные и теоретически обоснованные ограничения, устанавливающие связь геометрии, технологических норм и режимов работы активных компонентов и их комбинаций с параметрами, характеризующими широкополосность и усилительные свойства простейших узлов-каскадов и блоков различного функционального назначения. Выполненные исследования показывают, что влияние проходной паразитной емкости транзисторов на граничную частоту полосы пропускания можно существенно уменьшить за счет собственной компенсации – цепи компенсирующей обратной связи, образованной дополнительными транзисторами. Реализуемый в этом случае эффект широкополосности может быть использован для уменьшения потребляемой мощности (не только тока потребления, но и минимального напряжения питания). Так, для существующих субмикронных биполярных транзисторов достаточно просто обеспечивается уменьшение указанной мощности каскада примерно на порядок. Учитывая, что в схемотехнике операционных усилителей, преобразователей импеданса, компараторов, стабилизаторов и источников опорного напряжения количество каскадов усиления не превышает двух, а число активных компонентов составляет несколько десятков единиц, увеличение общего числа транзисторов оказывается незначительным и реализуемый эффект существенным для решения общей задачи. Следует отметить, что увеличение граничной частоты полосы пропускания каскада позволяет также повысить скорость нарастания выходного напряжения. Однако в случае уменьшения потребляемой мощности повышение скорости нарастания выходного напряжения без дополнительного увеличения потребляемого тока в статическом режиме обеспечивается за счет применения цепей нелинейной коррекции, причем, как и в первом случае, рост числа транзисторов незначителен и в пересчете на активный элемент (например, операционный усилитель) не превышает 10 %. Теоретически показано, что отмеченные выше принципы являются единственными для создания широкополосных каскадов и усилителей. Именно поэтому они могут явиться основой построения комплекта принципиальных схем активных элементов для аналоговых портов ввода-вывода и ориентироваться на различный базис и технологию их производства. Указанная задача является одной из наиболее трудоемких и важных в обсуждаемой проблеме. Такое утверждение базируется на естественном для микроэлектроники факте принятия решения только после получения топологии узла или изделия, его послойной совместимости, а также возможности контроля. Только библиотека таких элементов позволит автоматизировать процедуру проектирования и принятия решения о целесообразности развития той или иной архитектуры системы на кристалле.

Очередным важным этапом решения задачи является разработка схемотехники широкополосных экономичных и адаптированных под конкретную технологию функционально завершенных узлов, являющихся важ-ной составной частью портов и аналоговых СФ блоков. Комплекты разнообразных операционных усилителей, компараторов и источников опорного напряжения позволяют в сочетании с новыми конфигурациями функционально завершенных устройств, полученных, в частности, методом структурного синтеза, достаточно точно определить предельные для решаемой задачи реализационные возможности различных структур аналоговых портов, возможность построения не мультиплексированных архитектур или, в крайнем случае, обоснование целесообразности создания мини-системы. Не менее важной в практическом отношении является возможность совмещения различных функционально неоднородных узлов аналогового интерфейса. Такой подход может обеспечить решение ряда важных задач из многих сложных ситуаций. Например, создание схемотехники мультидифференциальных операционных усилителей, теоретического базиса для построения на их основе линейных аналоговых устройств позволило разработать на одном активном элементе схему экономичного аналогового порта ввода, совмещающего функции инструментального усилителя и фильтра.

Четвертая задача общей проблемы аналоговой электроники, ориентированной на СБИС типа «система на кристалле», связана с развитием схемотехники прецизионных функционально завершенных устройств как с фиксированными, так и с управляемыми параметрами. Методы их структурного синтеза позволяют создать принципиальные схемы с расширенными частотным и динамическим диапазонами, что достигается как структурной, так и параметрической оптимизацией влияния частоты единичного усиления активных элементов на их основные характеристики и параметры. В рамках выполненных исследований, в частности, показано, что при построении инициализируемых двоичным кодом устройств необходимо увеличивать число активных элементов (усилителей), которые совместно с цифроуправляемыми проводимостями позволяют создать на базе принципа собственной компенсации устройства с низкой суммарной чувствительностью к частоте единичного усиления и другим параметрам операционных усилителей. Указанное обстоятельство позволяет перевести в практическую плоскость вопрос конкурентоспособности аналоговых портов с фиксированными и управляемыми параметрами. Несмотря на относительную сложность последних их эффективность в СБИС может оказаться решающим фактором в процедуре принятия решения. По крайней мере, существующие алгоритмы цифровой обработки сигналов показывают, что за счет более полного использования разрядной сетки и исключения этапа частотной фильтрации можно не только повысить быстродействие системы, но и достоверность конечных результатов.

Наконец, и это самое важное на начальном этапе развития проблемно-ориентированных систем на кристалле, сложные в аппаратной (компонентной) реализации инициализируемые, но эффективные аналоговые интерфейсы могут изменить стратегию построения мини-систем. Двух- и трехкристалльные мини-системы будут состоять из принципиально асимметричных решений – первая СБИС решает задачу аналого-цифрового преобразования на базе сложных портов ввода данных, их предварительную обработку, включая и оценку производных, сортировку входных масссивов, арбитраж прерываний и т.п. Что касается второй СБИС, то по своему функциональному назначению это может быть центральный процессорный элемент системы. Возможны и другие, более сложные варианты их взаимодействия, но в любом случае существенное упрощение процедуры синхронизации не только повысит производительность системы в целом, но и снимет ряд проблем на пути повышения их предельной сложности.

Однако, как и ранее, возможность технологической реализации такого подхода будет непосредственно зависеть от глубины проработки схемотехнической реализации инициализируемых аналоговых устройств и создания соответствующей библиотеки IP модулей.

Следует также выделить задачи аналоговой микросхемотехники, ориентированные на СБИС аппаратуры связи. Здесь ввод данных (сигналов) в SoC-контроллер решается относительно простыми аппаратными ресурсами. Сравнительно небольшой динамический диапазон, отсутствие необходимости усиливать медленно меняющиеся (близкие к постоянному току) аналоговые сигналы существенно упрощают схемотехнические решения соответствующих узлов и модулей. Однако одновременно с этим обеспечение высокой скорости передачи обрабатываемых данных может заметно усложнить схемотехнику портов вывода, что связано с передачей в линию связи, включая и радиотракт, относительно большой мощности в диапазоне высоких частот. Именно здесь использование принципа собственной компенсации влияния проходных емкостей транзисторов может дать хороший результат.

Сравнение существующих мини- и микроконтроллерных систем показывает, что этот переход заметно сократил число функциональных и математических операций, выполняемых аналоговыми узлами. Несомненно, это сместило «центр тяжести» и негативным образом повлияло на предельные реализационные возможности СБИС в радиоэлектронной аппаратуре. В этой связи с определенной уверенностью можно утверждать, что создание экономичных широкодиапазонных элементов и устройств, образующих функциональный базис современных IP модулей, позволит в SoC-контроллерах, пусть и частично, сохранить преимущества гибридных мини-систем обработки аналоговых сигналов. Рассмотренные выше задачи сведены в таблицу, показанную на рис. 1.

Приведенные выше соображения в области аналоговой микросхемотехники требуют дополнительных комментариев. По данным ведущих зарубежных фирм, занимающихся проектированием и изготовлением СБИС «система на кристалле», в настоящее время сдерживающим фактором, влияющим на появление на рынке новых поколений этих изделий, является время разработки IP блоков и соответствующих чипов. И если для решения указанных проблем Texas Instruments и Burr-Brown объединили свои усилия в единой корпорации, то другие фирмы создали открытые ассоциации, в рамках которых осуществляется обмен этим интеллектуальным продуктом, формирование портфеля заказов как на изготовление, так и на сопровождение СБИС. Основу таких ассоциаций составляют центры проектирования, занимающиеся системным, схемотехническим и конструкторско-технологическим уровнями проектирования под определенные производства – кремниевые мастерские.

Рис. 1. Задачи аналоговой микросхемотехники СФ блоков

Указанные и во многом сложившиеся подходы диктуют ряд требований к глубине проработки аналоговых узлов, блоков, портов и подсистем. В основе лежит принцип завершенности конечного продукта – принципиальная схема должна выполнять необходимые для «системы на кристалле» функции, удовлетворять гамме ограничений технологического характера и, что особенно важно, сопровождаться соответствующей топологией. Не только принятие окончательного решения, но формулирование конкретных задач на схемотехническую модернизацию любого функционального блока возможно только при условиях как сопоставительного анализа качественных показателей альтернативных вариантов, так и особенностей их размещения в конкретном слое СБИС, возможности совмещения с другими узлами портов или вспомогательных устройств микросистемы.

Сказанное выдвигает следующие основные внутренние этапы развития аналоговой микросхемотехники. Во-первых, теория построения экономичных широкодиапазонных каскадов и блоков должна сопровождаться оценкой предельных возможностей и качественных преимуществ любой конфигурации для существующих технологий (КМОП, БиМОП, Si/Ge ….). Здесь в качестве доминирующего критерия должна выступать площадь кристалла и ее процентное соотношение к традиционным схемным решениям. Во-вторых, на базе существующих принципов компенсации необходимо ответить на вопрос о возможности использования полевых транзисторов, используемых в цифровой электронике в их различных комбинациях для построения качественных усилительных каскадов. Только сопоставление площадей подложек и потребляемой мощности позволит правильно ориентировать схемотехнику не только узлов, но и СФ блоков. Однако практика применения РЭА требует создания ИС и БИС, функционирующих в условиях сильных дестабилизирующих факторов. Решение этой задачи чаще всего целесообразно в рамках микронных технологий. Именно здесь наиболее ярко проявляются принципы как собственной, так и взаимной компенсации. При этом сочетание этих подходов на компонентном уровне и на уровне функциональных устройств позволяет реализовать аналоговые и аналогоцифровые ИС с качественными показателями, не соответствующими субмикронным аналогам.

В-третьих, все альтернативные варианты необходимо апробировать на принципиальных схемах базовых активных элементов, которые могут при определенных сочетаниях технических и технологических параметров получить самостоятельное для решения конечной задачи значение. Наконец, развитие микросхемотехники на функциональном уровне должно в полной мере учитывать не только выявленные ранее ограничения на параметры активных элементов, но, что особенно важно, ограничения на номиналы и класс точности пассивных элементов или их части. Здесь уместно отметить следующее. При построении активных фильтров аналоговых портов для эффективного использования как активных, так и пассивных компонентов приходится использовать достаточно прецизионные внекристалльные конденсаторы, поэтому внешние выводы их подключения должны характеризоваться небольшим внутренним сопротивлением, и их суммарная емкость должна удовлетворять вполне определенному неравенству. Однако всегда необходимо провести анализ альтернативного варианта с низкой эффективностью использования полосы пропускания и порядка такого устройства. В классе развития функционального уровня аналоговой микросхемотехники необходимо продолжать поиск новых типов активных элементов, интегрально вписывающихся в функциональное назначение СФ блока и позволяющих уменьшить число активных и пассивных компонентов цепи. Примером сказанного являются мультидифференциальные операционные усилители и соответствующие им устройства.

Конечно, приведенные соображения о месте аналоговой микросхемотехники в решении задач создания СБИС типа «система на кристалле» не являются исчерпывающими, но динамика развития этого важного направления микроэлектроники показывает, что без их детального анализа и поиска альтернативных направлений сложно надеяться на эффективное использование достижений субмикронной технологии.

Библиографический список

1. Айзерман, М.А. О некоторых структурных условиях устойчивости систем автоматического регулирования [Текст] / М.А. Айзерман // Автоматика и телемеханика. – 2008. – Т. 9, № 2.
2. Айзинов, М.М. Избранные вопросы теории сигналов и теории цепей [Текст] / М.М. Айзинов. – М. : Связь, 2010. – 348 с.
3. Анисимов, В.И. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов [Текст] / В.И. Анисимов, М.В. Капитонов, Н.Н. Прокопенко, Ю.М. Соколов. – Л. : Энергия, 2009. – 148 с.
4. Балабанян, Н. Синтез электрических цепей [Текст] / Н. Балабанян ; под ред. Г.И. Атабекова. – М. : Госэнергоиздат, 2008. – 416 с.
5. Блажкевич, Б.И. Использование алгебры логики совместно с методом направленных графов для синтеза трехполюсных подсхем [Текст] / Б.И. Блажкевич, А.Ю. Воробкевич, Е.Д. Михайлова // Теоретическая электротехника. – 2010. – Вып. 10. – С. 56–68.
6. Блажкевич, Б.И. Топологический метод поиска минимальных структур RLC-цепей [Текст] / Б.И. Блажкевич, Е.Д. Михайлова // Теоретическая электротехника. – 2006. – Вып. 14. – С. 14–19.
7. Блажкевич, Б.И. Физические основы алгоритмов анализа электронных цепей [Текст] / Б.И. Блажкевич. – Киев : Наукова думка, 2009. – 240 с.
8. Богатырев, В.Н. Проектирование и разработка ОУ на основе КМОП КНИ технологии [Текст] / В.Н. Богатырев [и др.] // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Подмосковье, 2007. – С. 290–297.
9. Бунза, Дж. Основные направления развития автоматизации проектирования в 1990-х годах [Текст] / Дж. Бунза, Г. Хоффман, Эд. Томсон // Электроника. – 2010. – № 2. – С. 39–47.
10. Виляев, Л.Ю. Аналого-цифровой БМК «Рапира» и библиотека функциональных элементов на его основе [Текст] / Л.Ю. Виляев, Ю.Н. Владимиров, В.В. Полевиков, И.Н. Шагурин // Актуальные проблемы микроэлектроники и твердотельной электроники : труды IV Всерос. НТК с междунар. участием. – 2007. – С. 123–124.
11. Гадахабадзе, Н.Г. Оптимальное проектирование электронных схем методом -преобразований [Текст] / Н.Г. Гадахабадзе, Н.К. Джибладзе, В.К. Чичинадзе // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 4. – С. 86–94.

1. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц [Текст] / Ф.Р. Гантмахер. – М. : Наука, 2006. – 576 с.
2. Гехер, К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей [Текст] / К. Гехер. – М. : Сов. радио, 2008. – 315 с.