

На правах рукописи

Зайцев Алексей Викторович

**МАЛОМОЩНЫЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ  
КМОП СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ  
СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРОВ**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2012 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент  
Кондратенко Сергей Владимирович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Крупкина Татьяна Юрьевна, МИЭТ;

кандидат технических наук,  
Панфилов Аркадий Павлович, НТЦ «Модуль».

Ведущая организация:

ОАО «Ангстрем».

Защита состоится «17» декабря 2012 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «    » ноября 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



П.К. Скоробогатов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ**

**Диссертация посвящена** решению важной научно-технической задачи разработки маломощных прецизионных сложно-функциональных (СФ) блоков сигма-дельта модуляторов (СДМ), изготавливаемых по объемной КМОП технологии и предназначенных для построения СБИС типа «система на кристалле» (СнК).

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время существует потребность пополнения отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), обеспечивающими эффективную разрядность 14 и более бит в диапазоне рабочих частот до 100 кГц. Такие преобразователи находят широкое применение в составе СБИС типа СнК для прецизионной обработки звуковых и низкочастотных сигналов в аудио-устройствах, медицинской электронике, измерительной технике и во многих других прикладных устройствах в системах сбора, обработки данных и управления, а также в системах специального назначения. Для многоканальных устройств и мобильных устройств данного типа с автономным питанием помимо указанных требований актуально также снижение потребляемой мощности (не более 100 мВт на АЦП в каждом канале). Дискретные сигма-дельта преобразователи (СД АЦП), ключевым блоком в составе которых является сигма-дельта модулятор (СДМ), используют сильную передискретизацию входных сигналов и позволяют при надлежащем проектировании обеспечить достижение требуемой совокупности характеристик с использованием доступной, в том числе в нашей стране, стандартной объемной КМОП-технологии. Требуемая высокая разрядность достигается за счет вытеснения шумов квантования во внерабочую полосу частот, а также их компенсации внутри модулятора и последующей фильтрации в цифровой части преобразователя. Однако многие выпускаемые серийно и специализированные прецизионные

дискретные СДМ и СД АЦП имеют узкий диапазон рабочих частот (не более десятков кГц) и значительную потребляемую мощность (более 100 мВт), что затрудняет их использование в интегрированных системах и ограничивает возможные варианты применения в целом. Принципиальные особенности реализации наилучших по совокупности характеристик СДМ и СД АЦП данного класса, а также методы и средства их проектирования обычно не публикуются в открытой печати и отсутствуют в свободном доступе, даже если они не относятся формально к объектам интеллектуальной собственности. Поэтому актуальной задачей является развитие теории и разработка на ее основе модифицированной методики и маршрута проектирования прецизионных дискретных СДМ, отличающихся пониженной потребляемой мощностью (желательно ниже 100 мВт) и работающих в диапазоне частот до 100 кГц.

Об актуальности работ в данном направлении свидетельствует также рост числа соответствующих патентов в крупнейшей базе данных США в последние годы.

### **Состояние исследований по проблеме**

В области моделирования и проектирования сигма-дельта модуляторов в последние годы наиболее продуктивно работают такие зарубежные авторы, как Р. Шреер (Richard Schreier), Г. Темез (Gabor C. Temes), С.Р. Носворти (Steven R. Nosworthy), Ф. Медейро (Fernando Medeiro) и Я. Мартила (Jaakko Marttila). В рамках работ по созданию и развитию методов и средств проектирования аналоговых и смешанных КМОП-устройств эта же проблематика является предметом исследований в целом ряде подразделений университетов, компаний по разработке САПР для сквозного проектирования электронных устройств и ведущих компаний – разработчиков интегральных схем и систем по всему миру.

В последние годы заметно растет число научных работ и публикаций по интересующей тематике отдельных авторов и коллективов из развивающихся стран (Индия, Китай и др.).

Анализ показал, что в зарубежной научной литературе в настоящее время проблеме снижения потребляемой мощности СДМ и СД АЦП уделяется повышенное внимание. Для этого применяются как известные методы снижения потребляемой мощности отдельных аналоговых блоков, так и новые структурные решения сигма-дельта модуляторов, позволяющие ослабить требования к характеристикам этих блоков. Так, например, возрастает внимание к SMASH (Sturdy Multi-stAge noise SHaping) структуре, которая позволяет снизить требования к коэффициенту усиления операционного усилителя (ОУ) в составе интеграторов, необходимые для достижения высоких показателей подавления шума квантования, с использованием дополнительных межканальных и межкаскадных связей, а также многоразрядных квантователей. Нельзя не отметить, однако, что использование многоразрядных квантователей вместо одноразрядных порождает дополнительные проблемы при проектировании, связанные с необходимостью контроля и снижения уровня нелинейных искажений сигналов в таких квантователях. В результате повышаются требования к технологии изготовления, вплоть до необходимости использования дополнительных аналоговых опций. Подобные замечания справедливы и для многих других известных частных вариантов построения дискретных СДМ, при проектировании которых могут не учитываться в полной мере простота практической реализации модулятора с учетом возможностей и ограничений доступной технологии, чувствительность к разбросу технологических параметров и воздействию факторов внешней среды, простота реализации последующей цифровой части в составе СД АЦП и другие аспекты практической реализации. Для того чтобы

спроектированный СДМ, обладающий по результатам моделирования высокими техническими характеристиками, демонстрировал их на практике и имел приемлемый процент выхода годных при производстве, необходим комплексный учет перечисленных факторов и, соответственно, разработка новых методик и маршрутов проектирования дискретных СДМ.

Известны несколько специализированных пакетов высокоуровневого анализа характеристик и схмотехнического синтеза СДМ, реализованных на основе САПР математического моделирования или написанных на языках высокого уровня. Большинство из них, как отмечено выше, недоступны для сторонних пользователей. Исключением является пакет Delsig, реализованный в среде MatLab и предназначенный для высокоуровневого моделирования СДМ с различными структурами. Однако опыт практического применения этого пакета показал, что не все интересующие параметры СДМ контролируются при расчетах. В связи с этим актуальна разработка собственных средств высокоуровневого анализа, и, по возможности, структурного синтеза СДМ, лишенных отмеченных недостатков и реализованных с использованием свободно распространяемой САПР математического моделирования и доступных для дальнейшей модификации пользователем.

Опубликованные работы отечественных авторов в данной области немногочисленны. Наибольший практический интерес представляют диссертации, защищенные в последние годы. Методам математического моделирования и структурного синтеза сигма-дельта модуляторов посвящена работа Самонова А.А. (НИЯУ МИФИ). Автор уделяет в ней большое внимание разработке математических моделей сигма-дельта модуляторов в средах математических САПР. В работе рассматривается методика синтеза структуры СДМ на основе требований технического задания, однако недостаточное внимание уделяется

снижению потребляемой мощности, учет влияния нелинейностей блоков производится только на уровне анализа математических моделей (без интеграции в них результатов характеристики блоков на схемотехническом уровне) и основное внимание уделяется СДМ звукового диапазона. Работа Лаврентьева М.В. (МИЭТ) посвящена методикам расчета коэффициентов передачи сигнала в структурах сигма-дельта модуляторов. Автор описывает классическую методику расчета коэффициентов передачи в интеграторах с использованием z-преобразования, а также рассматривает возможность использования известных алгоритмов синтеза фильтров для расчета коэффициентов СДМ. При этом такая важная в практическом отношении задача, как переход от модельного представления к конечным структурным и схемотехническим решениям, спроектированным с учетом сложности их реализации в рамках доступной технологии, остаются до конца нерешенной. В работе Теленкова М.В. (СПб ПУ) основное внимание уделяется численному анализу влияния нелинейных искажений в сигма-дельта модуляторах. В работе приводится анализ влияния неидеальностей, связанных с многоуровневыми квантователями и нелинейными искажениями в ОУ. Несмотря на глубокий анализ нелинейностей, в работе не уделяется достаточного внимания учету особенностей реальных схемотехнических реализаций отдельных блоков модулятора и обеспечению возможности их характеристики в процессе проектирования. Поэтому результаты этой работы применимы скорее для итеративного расчета граничных показателей, чем для практического проектирования устройств рассматриваемого типа.

В целом анализ публикаций зарубежных и отечественных авторов показал, что во многих из них отмечена актуальность снижения потребляемой мощности сигма-дельта модуляторов при сохранении высоких динамических характеристик, однако часто эта проблема не

рассматривается как первоочередная и для ее разрешения применяется ограниченный набор методов и средств. Недостаточное внимание уделяется анализу и реализации возможностей перераспределения сложности проектирования блоков СДМ за счет изменения внутрискруктурных решений без трудоемкого перехода к другой структуре или даже к другой технологии. Такие решения обладают значительными возможностями с точки зрения построения маломощных прецизионных сигма-дельта преобразователей при условии корректного учета связи конкретного структурного решения с требованиями к характеристикам составных блоков и возможностями доступной технологии.

**Целью диссертации** является развитие теории, а также разработка методов и средств проектирования маломощных прецизионных КМОП сигма-дельта модуляторов, направленных на снижение их потребляемой мощности за счет применения структурных решений и связанных с ними конкретных схмотехнических и топологических решений отдельных блоков, а также на уменьшение времени, затрачиваемого на разработку.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Сравнительный анализ различных структурных и схмотехнических вариантов построения КМОП СФ-блоков сигма-дельта модуляторов и обоснование наиболее перспективных из них с точки зрения обеспечения высокой точности проектируемых модуляторов при пониженной потребляемой мощности.
2. Построение высокоуровневых моделей сигма-дельта модуляторов во временной, частотной и z-областях, предназначенных для расчета основных характеристик модуляторов и снижения трудоемкости этих расчетов. Модели должны позволять сравнивать и синтезировать



структуры модуляторов с требуемыми техническими характеристиками.

3. Разработка методики обоснованного выбора структурных и схемотехнических решений, позволяющих на начальных этапах проектирования перераспределять имеющиеся технические ресурсы между блоками, входящими в состав сигма-дельта модуляторов.
4. Разработка программных средств проведения автоматизированных испытаний исследуемых микросхем и блоков на основе аппаратно-программного измерительного комплекса, включающего измерительные приборы фирм Agilent, Tektronix и управляемую измерительную оснастку.
5. Применение и проверка разработанных моделей, методик и средств при проектировании прецизионных маломощных КМОП СФ-блоков сигма-дельта модуляторов. Проведение исследований изготовленных СФ-блоков с целью подтверждения выполнения требований технического задания и характеристики СФ-блоков для различных конечных применений.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработаны методы и средства высокоуровневого моделирования сигма-дельта модуляторов во временной, частотной и z-областях, отличающиеся от известных расширенными возможностями учета влияния неидеальностей составных блоков, в том числе за счет использования макромоделей этих блоков, построенных по результатам расчетов их схемотехнических реализаций.
2. Сформулирован и реализован подход к построению частных технических заданий на разработку критичных динамических блоков на основе смешанного моделирования сигма-дельта модулятора с использованием высокоуровневых и схемотехнических моделей этих блоков. Данный подход позволяет также существенно снизить

временные затраты при сравнении вариантов реализации модулятора (до 10-ти раз в зависимости от доли высокоуровневого моделирования).

3. Сформулирована и реализована методика достижения компромиссных по совокупности характеристик схемотехнических решений отдельных блоков, позволяющая, в частности, снизить потребляемую мощность проектируемого сигма-дельта модулятора. Данная методика предполагает изменение ряда схемотехнических и структурных решений, существенно влияющих на сложность проектирования этих блоков и не приводящих к сколько-нибудь заметному (выходящему за установленные техническим заданием на устройство) ухудшению характеристик модулятора в целом.
4. Разработана пошаговая методика и маршрут проектирования сигма-дельта модуляторов, максимально использующая возможности современных САПР и собственные наработки для реализации сквозного проектирования отдельных блоков и модулятора в целом.

#### **Практическая ценность:**

1. Разработан ряд динамических блоков сигма-дельта модулятора на базе КМОП технологии XFAB 0,18 мкм, реализованных в виде готовых к повторному использованию сложно-функциональных блоков.
2. На основе сформулированной методики и маршрута проектирования разработаны и изготовлены опытные образцы сигма-дельта модулятора, не уступающие по совокупности характеристик зарубежным аналогам.
3. Разработан набор программных средств для САПР Cadence и Octave и методика их применения, позволяющие осуществлять сквозную характеризацию отдельных блоков и модулятора в целом в процессе проектирования.

4. Разработана автоматизированная система характеристики исследуемых микросхем в процессе измерений и обработки результатов в реальном времени. Данная система реализована на основе аппаратно-программного измерительного комплекса и использует интерфейс GPIB, стандартные и специализированные средства считывания, обработки данных и управления.

**Результаты, выносимые на защиту:**

1. Оригинальная методика формирования технических заданий на составляющие блоки сигма-дельта модулятора, отличающаяся тем, что основные требуемые характеристики блоков определяются по результатам анализа влияния отдельных неидеальностей этих блоков на характеристики модулятора в целом в процессе высокоуровневого и смешанного моделирования.
2. Новая методика целенаправленного перераспределения сложности проектирования составляющих блоков за счет изменения ряда согласованных структурных и схемотехнических решений, позволяющая исключить необходимость выполнения повышенных или неразрешимых в рамках выбранной технологии требований.
3. Новый комплекс специализированных программных средств для характеристики сигма-дельта модуляторов и их отдельных блоков, а также методика его применения, позволяющие повысить эффективность использования современных математических и схемотехнических САПР (Cadence и Octave) в процессе проектирования и качество проектируемых сложно-функциональных блоков, в том числе повысить точность обработки сигналов и снизить потребляемую мощность.
4. Первый в своем классе отечественный маломощный прецизионный сложно-функциональный блок сигма-дельта модулятора специального назначения, изготовленный по стандартной КМОП-

технологии с нормами 0,18 мкм и имеющий, по результатам измерений, полосу входных частот 96,7 кГц, потребление не более 67 мВт при напряжении питания 3,3 В и отношение сигнал-шум 78 дБ при использовании коэффициента передискретизации 128.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах «Электроника, микро- и нанoeлектроника», проходивших в Суздале в 2010 и 2011 году, конференциях «Курчатовская молодежная научная школа» с 2009 по 2011 год, а также на конференциях «Научная сессия МИФИ», проведенных с 2010 по 2012 год.

Результаты диссертации опубликованы в 7-и печатных работах, в том числе в 4-х работах в реферируемых журналах из перечня ВАК.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 164 страницы, включая список литературы и приложение, 82 рисунка, 17 таблиц. Список литературы включает 102 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена цель диссертации. Приведена постановка задач и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Сформулированы научная новизна и практическая ценность диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору современного технического уровня развития СФ-блоков сигма-дельта модуляторов и аналого-цифровых преобразователей на их основе. Рассмотрены различные типы аналого-цифровых преобразователей, используемых в высокочастотных приложениях. Сигма-дельта преобразователи являются одним из перспективных классов устройств, работающих в относительно низкочастотных системах и развивающихся, однако, в сторону

увеличения разрядности и расширения полосы входных сигналов. Приведено сравнительное описание различных структур аналоговой части сигма-дельта преобразователей (модуляторов). Показаны основные преимущества и недостатки используемых архитектур и выбрана MASH архитектура как перспективная с точки зрения минимизации потребляемой мощности. Раскрыты современные тенденции развития сигма-дельта модуляторов с точки зрения изменения основных характеристик, в том числе за счет появления новых структур. На основе анализа характеристик выпускаемых микросхем и специализированных сложно-функциональных блоков сигма-дельта модуляторов и АЦП выявлена тенденция снижения потребляемой мощности с незначительной деградацией показателей качества этих устройств. В сигма-дельта АЦП велика роль цифровой части, что создает преимущества при проектировании и улучшает повторяемость характеристик. Однако требования на характеристики блоков аналоговой части достаточно жесткие и могут целенаправленно перераспределяться за счет выбора архитектуры модулятора. В целом для достижения характеристик, близких к теоретическим, для выбранной архитектуры модулятора с идеализированными блоками, требуется максимально использовать достижения аналоговой электроники, возможности доступной технологии, а также возможности средств проектирования. Растущий интерес к разработкам систем на кристалле, взаимодействующих с аналоговыми сигналами, делает актуальной задачу развития методов и средств проектирования составных блоков и сигма-дельта модуляторов в целом с улучшенными основными техническими характеристиками и в частности с пониженной потребляемой мощностью.

**Во второй главе** рассмотрены источники ошибок и искажений сигналов в сигма-дельта модуляторах. Выполнен подробный анализ характеристик составных блоков, оказывающих непосредственное

влияние на динамические характеристики СДМ в целом, а также приведены способы по поддержанию этих характеристик на высоком уровне за счет компенсации возникающих искажений. Представлены методы моделирования неидеальностей ключевых составных блоков сигма-дельта модулятора на этапах математического и схемотехнического проектирования. Предложен итерационный метод, использующий при моделировании устройства в целом результаты проведения сценарной характеристики отдельных составных блоков устройства. Рассмотрена диаграмма перераспределения сложности реализации отдельных составных блоков модулятора. Показаны возможности по применению системных решений, оказывающих влияние на устройство в целом и позволяющих снизить сложность проектирования проблемных блоков, отчасти перенеся ее на более простые блоки. На основе анализа диаграммы сложности рассмотрен комплекс мер по целенаправленному снижению потребляемой мощности СДМ. Проведена оценка деградации ключевых динамических характеристик сигма-дельта модулятора при использовании указанных мер снижения потребляемой мощности.

**Третья глава** посвящена формированию и обоснованию общей методики и маршрута проектирования для разработки маломощных СДМ с высокими техническими характеристиками. Для достижения этой цели автор рассматривает и предлагает методы и средства, позволяющие осуществлять сквозную характеристику проектируемых блоков и модулятора в целом. Это, в свою очередь, позволяет в реальном времени отслеживать и анализировать деградацию характеристик, связанную с переходом от идеальных моделей составных блоков к их транзисторным (схемотехническим и топологическим) реализациям. Автором предлагаются способы интеграции результатов моделирования схемотехнических САПР в средства расчета и анализа характеристик математических САПР, что позволяет сократить время, затрачиваемое

на расчеты в разы. Предлагается также введение прототипирования топологии аналоговых блоков на ранних этапах проектирования при выборе схемотехнических решений для их оперативного анализа и, как следствие, дополнительного сокращения времени на разработку в связи со снижением числа или устранением избыточных итераций из-за влияния паразитных параметров топологии, анализ которых обычно производится на поздних этапах проектирования. В завершение приводится оригинальная методика проектирования, включающая три предложенных новшества: перераспределение сложности реализации на системном уровне, сквозную характеристику с возможностью использования результатов моделирования отдельных блоков при расчетах с использованием математических САПР, а также ранний учет параметров топологии.

**В четвертой главе** приводятся результаты апробации диссертационной работы при разработке маломощного прецизионного отечественного специализированного СДМ для специальных применений. Подробно рассмотрена реализация всех этапов предложенной методики проектирования применительно к поставленной задаче разработки модулятора с потребляемой мощностью менее 300 мВт и отношением сигнал-шум более 80 дБ в полосе частот 96,7 кГц. Рассматриваются частные способы и системные решения, принятые для упрощения реализации и сокращения потребляемой мощности сигма-дельта модулятора. Описан процесс и приведены результаты сквозной характеристики. Подробно рассмотрены реализации на структурном и схемотехническом уровне аналоговых составных блоков с указанием способов и решений, использованных при проектировании для достижения наилучших результатов. В завершение приводятся сравнительные результаты, показывающие степень деградации характеристик модулятора на различных этапах проектирования.

Приводится также сравнение разработанного сигма-дельта модулятора с зарубежными аналогами и результаты экспериментальных исследований нескольких образцов микросхем с тестовым кристаллом, изготовленных по технологии 0,18 мкм и содержащих два варианта сигма-дельта модулятора, а также его основные составные блоки.

**Заключение** обобщает основные теоретические и практические результаты.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Современные аналого-цифровые преобразователи в области прецизионной обработки сигналов, как правило, строятся на основе сигма-дельта модуляторов высоких порядков, которые позволяют обеспечить высокие технические характеристики в узкой полосе обрабатываемых сигналов (в большинстве случаев до нескольких десятков килогерц) и имеют значительную потребляемую мощность (до нескольких Ватт).

### **Анализ источников ошибок и потребляемой мощности отдельных блоков сигма-дельта модулятора**

Проведенный в работе анализ различных структур сигма-дельта модуляторов позволил выделить ряд источников ошибок, часть из которых обычно компенсируются повышенной потребляемой мощностью. Независимо от выбранной структуры сигма-дельта модулятора наибольшей потребляемой мощностью обладают блоки интеграторов (в особенности первого каскада) и блоки ЦАП (рис.1).

Потребляемая интегратором мощность обусловлена необходимостью обеспечения большого коэффициента усиления (зачастую более 100 дБ) во всей рабочей полосе частот и выходного тока, достаточного для заряда конденсаторов в цепях обратной связи.



Потребляемая мощность ЦАП, представляющего собой управляемый многоуровневый источник опорных напряжений (ИОН), связана с аналогичной потребностью в установлении выходного напряжения на конденсаторах с заданной точностью за ограниченный интервал времени.

В работе проводится анализ источников ошибок в составляющих модулятор блока и приводится основанный на обзоре литературы вариант их учета при моделировании. При этом отмечено, что вопрос формирования технических заданий на отдельные составляющие блоки обычно не учитывает возможности применения общесистемных решений, что часто приводит к завышенным требованиям и, как следствие, росту потребляемой мощности.

Автором предложена методика формирования технических заданий на отдельные составляющие блоки, основанная на возможности перераспределения сложности реализации с заведомо требовательных блоков на менее критичные и чувствительные. Основой методики является диаграмма, составляемая на стадии структурного синтеза и отражающая возможные изменения и их последствия для требований к внутренним блокам (рис. 2).

Каждое вносимое разработчиком изменение, такое, например, как изменение емкости используемых конденсаторов или изменение отношения длительностей фаз предзаряда и интегрирования, переносит сложность реализации с одного блока на другой или несколько.

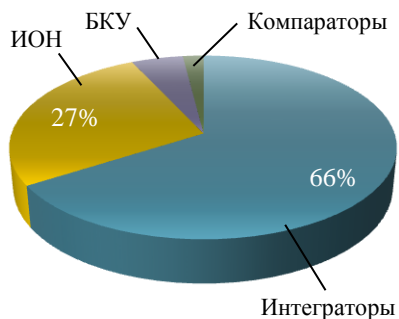


Рис. 1. Распределение потребляемой модулятором мощности между основными внутренними блоками (пример).

В конечном счете, это позволяет снизить потребляемую мощность модулятора в целом, так как снижает экстремальные требования к некоторым блокам до умеренных.

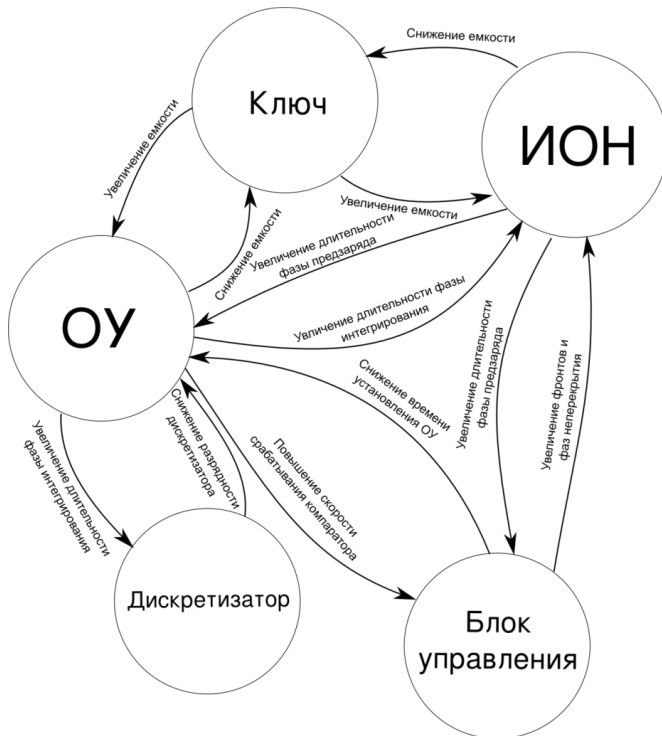


Рис.2. Пример диаграммы перераспределения сложности реализации.

Для составления и использования такой диаграммы необходимо количественно определить влияние как общесистемных, так и частных параметров составляющих блоков на конечные характеристики сигма-дельта модулятора. Такая задача потребовала проведения характеристики СДМ на различных этапах проектирования (от математической модели до анализа тестовых образцов). Для решения этой задачи в ходе диссертационной работы был разработан ряд средств

характеризации и проведения испытаний микросхем, описанный в главе 3.

### **Комплекс средств для проведения характеризации сигма-дельта модуляторов на различных этапах проектирования**

В работе обоснован и реализован комплекс средств для проведения характеризации и моделирования сигма-дельта модуляторов с различной структурой как в полностью математической среде (на основе пакета САПР Octave), так и в среде схемотехнического проектирования Cadence.

Математическая модель СДМ позволяет провести быстрый анализ характеристик устройства, построенного из идеальных или идеализированных блоков, путем расчета выходной выборки и анализа ее спектра.

Модель в среде схемотехнического САПР Cadence позволяет интегрировать один или несколько транзисторных блоков в идеальную структуру СДМ и произвести оценку их влияния на конечные характеристики блоков. Однако чем больше реальных транзисторных блоков используется в исследуемой структуре, тем медленнее производится расчет выборки достаточной длины.

Для решения этой проблемы автором предложена и реализована идея проведения подробной характеризации используемых транзисторных блоков в среде схемотехнического САПР и последующий учет ее результатов путем введения неидеальностей в математические модели.

Таким образом, возможно проведение быстрых оценочных расчетов характеристик сигма-дельта модулятора, а также, при необходимости, их верификации в схемотехнической среде. Это позволяет сократить время, затрачиваемое на моделирование, а также выявить составляющие блоки, в которых возможно снижение

потребляемой мощности за счет контролируемого снижения отдельных технических показателей.

### **Универсальный аппаратно-программный комплекс для проведения автоматизированных испытаний микросхем различного назначения**

Важным этапом в производстве интегральных микросхем является получение и анализ результатов измерения параметров готовой микросхемы. Для проведения автоматизированных испытаний микросхем сигма-дельта модулятора и сопоставления результатов с расчетными параметрами был разработан аппаратно-программный измерительный комплекс. Структурная схема данного комплекса представлена на рис. 3.

Для получения основных характеристик СДМ требуется обеспечить регистрацию выборки выходных сигналов АЦП достаточной длины для проведения быстрого преобразования Фурье. Для этих целей в комплексе используется двойная регистрация состояний выходов с запуском по тактовому сигналу СДМ – логическим анализатором и программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) с большим по объему блоком памяти. Измерение потребляемой мощности производится мультиметром.

Компьютер осуществляет управление измерительными приборами по шине GPIB, а ПЛИС - с помощью интерфейса USB, что позволяет проводить полностью автоматизированное тестирование микросхем. В аппаратно-программном измерительном комплексе используются современные измерительные приборы ведущих зарубежных фирм (Agilent Technologies, Tektronix и др.). Автором доработаны штатные низкоуровневые средства управления режимами работы и сбора данных для некоторых из этих приборов с целью расширения доступных опций. Разработаны также средства высокоуровневой обработки результатов измерений с целью полноценной характеристики исследуемых устройств.

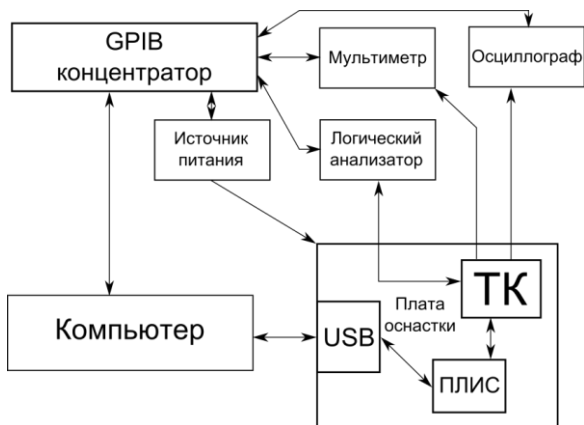


Рис.3. Структурная схема аппаратно-программного измерительного комплекса.

### **Сложно-функциональный блок модулятора для высокоразрядного сигма-дельта АЦП с пониженным энергопотреблением**

Исследование эффективности практического применения представленных автором методик и средств проектирования было выполнено в рамках разработки тестовых микросхем сложно-функционального блока сигма дельта модулятора. Техническое задание на проектирование предусматривало ряд жестких требований к точности, рабочей полосе частот и потребляемой мощности разрабатываемого блока. Результаты разработки приведены в табл. 1, а на рис. 4 показаны временная диаграмма и спектр сигнала с выхода тестовой микросхемы сигма-дельта модулятора.

Для снижения общей потребляемой мощности при незначительной деградации характеристик (менее 10 дБ суммарно) использованы следующие представленные в теоретической части работы решения:

1. Базовый номинал используемых в интеграторах конденсаторов выбран исходя из снижения требований к ОУ и ИОН при сохранении

достаточной точности интегрирования. Данное решение основано на анализе допустимых отклонений значений коэффициентов в интеграторах в математической модели.

2. В результате оптимизации характеристик модулятора фазы предзаряда и интегрирования установлены равной длины. Это позволило создать равные условия для работы выходных буферов ИОН и усилителей в составе интегратора.

Табл. 1. Сравнение результатов разработки с зарубежными аналогами.

Обозначение	$TЗ$	Собственная разработка (результаты измерений)	AD7764	ADS1605	AD7400 Modulator
$f_{in}$ , кГц	96,7	96,7	150	312,5	-
SNR, дБ	$> 80$	78	109	84	80
$P_c$ , мВт	$< 100$	67	371	352	65

Разработанные средства проведения характеристики отдельных блоков и модулятора в целом на различных этапах проектирования позволили осуществить контроль показателей качества в процессе внедрения мер по снижению потребляемой мощности.

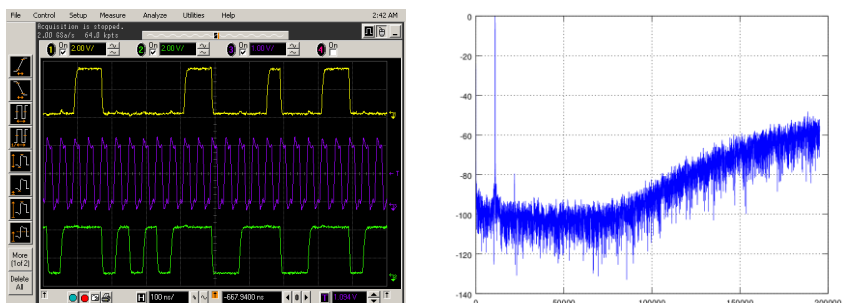


Рис. 4. Временная диаграмма и спектр сигнала с выхода тестовой микросхемы сигма-дельта модулятора.

Таким образом, проведена апробация представленной в диссертационной работе методики проектирования маломощных

сигма-дельта модуляторов, а также комплекса средств по проведению характеристики сигма-дельта модулятора на всех этапах разработки. Получены тестовые микросхемы СФ блока СДМ, спроектированные с учетом представленных автором рекомендаций по снижению потребляемой мощности и показавшие по результатам испытаний близкие к расчетным характеристики.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Основной результат** диссертации заключается в развитии теории и создании оригинальной методики проектирования маломощных прецизионных КМОП сигма-дельта модуляторов и в разработке на этой основе конкурентоспособного сложно-функционального блока сигма-дельта модулятора, изготовленного по объемной КМОП технологии с проектными нормами 0,18 мкм и удовлетворяющего требованиям современной электронной компонентной базы.

### **Основной научный результат**

В диссертации разработаны методики и модели, предназначенные для проектирования маломощных сигма-дельта модуляторов и позволяющие осуществлять контроль и снижение потребляемой мощности без существенной деградации характеристик, а также существенно (до 10-ти раз) сократить время разработки модуляторов для достижения требуемых характеристик.

### **Частные научные результаты**

1. Сформулирован принцип формирования частных технических заданий на отдельные составные блоки сигма-дельта модулятора, основанный на результатах высокоуровневого моделирования с использованием математических САПР или симуляторов САПР электронных устройств и систем.

2. Разработаны варианты учета результатов характеристики отдельных блоков в общей математической модели, позволяющие осуществлять оперативный расчет динамических характеристик модулятора на любом этапе проектирования.

3. Сформулирована методика достижения компромиссных характеристик при формировании технических заданий на составные блоки, в которой особое внимание уделено проблеме снижения потребляемой мощности составных блоков и проектируемого сигма-дельта модулятора в целом.

4. С использованием вышеуказанных результатов разработана оригинальная методика проектирования, направленная на снижение потребляемой мощности при сохранении высоких динамических характеристик модулятора и отличающаяся от известных подходов существенным (до 10-ти раз) снижением времени расчетов.

### **Основной практический результат**

С использованием предложенных методик и средств характеристики разработан и изготовлен первый в своем классе отечественный сигма-дельта модулятор с полосой входных частот 96,7 кГц, потребляемой мощностью не более 67 мВт и отношением сигнал-шум до 78 дБ по объемной КМОП технологии с проектными нормами 0,18 мкм. Разработанные СФ-блоки сигма-дельта модулятора и отдельные составные блоки могут быть интегрированы в СБИС типа «система на кристалле». СФ-блоки СДМ использованы в ОАО НПЦ «ЭЛВИС» при разработке СБИС СД АЦП для специальных применений, что подтверждается актом о внедрении.

### **Частные практические результаты**

1. В среде САПР Cadence создан набор библиотечных элементов, представляющих собой готовые к повторному использованию аналоговые блоки и содержащий следующие блоки: операционные усилители,



интеграторы на их основе, быстродействующий компаратор, источник опорного напряжения.

2. С использованием предложенной автором оригинальной методики разработана схема и топология четырехкаскадного двухканального сигма-дельта модулятора, потребляемую мощность которого удалось снизить до 67 мВт при удовлетворении требований технического задания по динамическим характеристикам.

3. Проведено экспериментальное исследование разработанных СФ-блоков СДМ и подтверждены их основные технические характеристики, полученные по результатам моделирования. Разработанные устройства не уступают по совокупности характеристик современным мировым аналогам, произведенным по объемной КМОП технологии.

4. Разработан набор автоматизированных средств, позволяющих осуществлять в среде САПР характеризацию как отдельных блоков, так и модулятора в целом на всех этапах проектирования, что позволяет реализовать сквозную характеризацию, контроль и снижение деградации характеристик модулятора при переходе от идеализированных моделей составных блоков к их транзисторным и топологическим реализациям.

5. Разработана высокоуровневая математическая модель СДМ, пригодная для моделирования во временной и частотной областях с учетом результатов характеризации, полученных при моделировании в схемотехнических САПР, что позволяет существенно (до 10-ти раз) сократить время, затрачиваемое на моделирование СДМ в целом.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно развита методика проектирования маломощных прецизионных КМОП сигма-дельта модуляторов, разработана оригинальная методика проектирования, направленная на снижение потребляемой мощности за счет применения системных решений

без существенной деградации характеристик. Разработаны и произведены отечественные специализированные микросхемы СДМ с потребляемой мощностью не более 67 мВт и отношением сигнал шум до 78 дБ в полосе частот 96,7 кГц.

#### **Список основных работ, опубликованных по теме диссертации**

- 1. Зайцев А.В., Кондратенко С.В., Молочков В.Н., Скок, Д.В., Гусев В.В., Дубинский А.В. Проектирование критичных динамических блоков сигма-дельта модулятора // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. Выпуск 1. – М.: ЦНИИ «Электроника», – 2011. – С. 58-76.**
- 2. Зайцев А.В., Кондратенко С.В., Молочков В.Н. Контроль и снижение разброса характеристик аналоговых и смешанных КМОП-блоков на начальных этапах их проектирования // Естественные и технические науки №3(59). – М.: ООО «Издательство «Спутник+», – 2012. – С. 416-420.**
- 3. Зайцев А.В. Методика и маршрут проектирования сигма-дельта модулятора // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. Выпуск 2. – М.: ЦНИИ «Электроника», – 2012. – С. 66-73.**
- 4. Зайцев А.В., Кондратенко С.В. Снижение потребляемой мощности в прецизионных сигма-дельта модуляторах // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. Выпуск 2. – М.: ЦНИИ «Электроника», – 2012. – С. 82-87.**
- 5. Зайцев А.В., Кондратенко С.В., Молочков В.Н. Оценка качества проектируемых ОУ // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов 13-й российской научно-технической конференции. – М.: НИЯУ МИФИ, – 2011. – С.235-241.**
- 6. Зайцев А.В. Анализ влияния ключевых элементов в прецизионных интеграторах на основе коммутируемых конденсаторов // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр. – М.: НИЯУ МИФИ, – 2010. – С. 173-177.**
- 7. Зайцев А.В., Кондратенко С.В., Молочков В.Н. Характеризация свойств КМОП-транзисторов для аналоговых и смешанных применений // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. В 6 т. – М.: НИЯУ МИФИ, – 2010. – Т.1. – С. 169-172.**