На правах рукописи

Осипов Дмитрий Леонидович

Применение поведенческих моделей для проектирования сложно-функциональных блоков аналого-цифровых преобразователей

05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва
2013

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент **Бочаров Юрий Иванович**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической радиотехники и радиофизики МГТУ МИРЭА **Битюков Владимир Ксенофонтович**
	кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГУП «НИИ КВАНТ» **Ротнов Сергей Васильевич**
Ведущая организация:	Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) г. Москва

Защита диссертации состоится 18 марта 2013 г. в 15:00 в конференц зале К-608 на заседании совета Д212.130.02 НИЯУ МИФИ по адресу: 11409,г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан 15 февраля 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать один экземпляр отзыва, заверенного печатью огранизации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н.,профессор П.К. Скоробогатов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы диссертации

Обработка информации в современных электронных системах осуществляется в основном цифровыми средствами с использованием интегральных микросхем (ИМС) высокой и сверхвысокой степени интеграции – БИС и СБИС, в том числе БИС типа система на кристалле (СнК). Вместе с тем, физические процессы, которые являются источниками сигналов, имеют аналоговую природу. Поэтому важными элементами многих электронных систем являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Многие СнК содержат сложнофункциональные блоки (СФ-блоки, IP-блоки) АЦП. В аналого-цифровых системах точность и быстродействие АЦП во многом определяют предельную величину динамического диапазона обрабатываемых сигналов и максимальную пропускную способность. Улучшение качественных показателей АЦП требует разнообразных средств и методов их автоматизированной разработки. Актуальным, в частности, является развитие методов проектирования АЦП по сокращению времени и увеличению точности анализа, выполняемого с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) заказных ИМС.

Каждый крупный фрагмент (СФ-блок) современной СБИС может содержать десятки или даже сотни тысяч транзисторов. Моделирование таких схем на транзисторном уровне требует очень больших временных затрат и может занимать от нескольких часов до нескольких дней или даже недель. Низкоуровневое моделирование всей схемы СБИС по этой причине часто невозможно.

Одной из тенденций развития методов проектирования СБИС является отказ от полного моделирования всего кристалла на транзисторном уровне. Маршрут проектирования теперь обычно включает этапы создания множества моделей, начиная с общего поведенческого описания устройства, последовательно переходя к более детальному описанию структуры и функционирования блоков, и заканчивая созданием моделей транзисторного уровня, включающих данные о паразитных параметрах схем, полученных экстракцией из топологии. Такая методология получила название «проектирование «сверху-вниз».

Проектирование «сверху-вниз» сопровождается параллельным процессом верификации «снизу-вверх», когда полученная при экспериментальном тестировании и моделировании отдельных блоков информация последовательно передаётся на более высокие уровни иерархии моделей. То есть, после разработки блока на основании данных о текущих версиях схемы и топологии осуществляется уточнение ряда мо-

делей, описывающих этот блок на разных уровнях иерархии. Это дает возможность увеличить точность моделирования на более высоких уровнях абстракции, приближая ее к точности моделирования системы на транзисторном уровне без значительного увеличения времени расчета.

Такой подход требует наличия различных моделей аналого-цифровых устройств. Некоторые из таких моделей доступны в качестве свободно распространяемых продуктов, в составе коммерческих пакетов средств разработки БИС, проектных библиотек или поставляются вместе с СФ-блоками. Вместе с тем, набор моделей пока ограничен. Даже при использовании готовых СФ-блоков может потребоваться разработка некоторых моделей, включая поведенческие модели физического уровня, которые содержат данные, полученные при экстракции паразитных топологических параметров схемы. Если конечными продуктами разработки являются СФ-блоки АЦП, то необходимо создание моделей отдельных элементов, функциональных ячеек АЦП, таких, например, как устройства выборки-хранения (УВХ) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) с переключаемыми конденсаторами.

Кроме того, недостаточно развиты методы характеризации поведенческих моделей аналоговых и аналого-цифровых блоков, то есть, методы идентификации их параметров, основанные на экспериментальном исследовании тестовых структур и симуляции с параметрической оптимизацией для минимизации расхождения между результатами эксперимента и поведенческого моделирования. При разработке аналого-цифровых устройств на этапе поведенческого моделирования важно знать частотные характеристики составляющих их блоков. Для линейных схем эта задача решается типовыми средствами САПР путем выполнения моделирования в режиме малосигнального анализа.

Подобные им средства определения частотных характеристик нелинейных схем с переключаемыми элементами пока недостаточно развиты. Есть лишь ряд специализированных программ, не обеспечивающих в общем случае необходимой точности. Вместе с тем, имеется потребность в интегрированных в типовые САПР средствах частотного анализа схем на переключаемых конденсаторах, таких как УВХ.

Таким образом, развитие методов создания, исследования и использования поведенческих моделей АЦП и составляющих их аналоговых и аналого-цифровых блоков является актуальным.

Цель и задачи диссертации

Цель диссертации: Повышение эффективности проектирования АЦП на основе развития методов создания и использования поведенческих моделей аналого-цифровых блоков.

Критерий эффективности в данном случае – сокращение сроков проектирования СФ-блока или микросхемы АЦП. Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи:**

1. Разработка поведенческой модели, учитывающей параметры физического уровня, для блока ЦАП на переключаемых конденсаторах, позволяющей сократить время проектирования топологии блока;

2. Создание метода характеризации универсальных поведенческих моделей блоков АЦП и УВХ, что дает возможность сократить время верификации устройств, содержащих эти блоки;

3. Создание метода определения частотных характеристик схем с переключаемыми элементами, который позволяет повысить точность характеризации поведенческих моделей.

Научная новизна

1. Впервые предложена модель ЦАП на переключаемых конденсаторах, которая позволяет учесть влияние паразитных емкостей матриц старших и младших разрядов, а также двоичновзвешенной составляющей погрешности величины емкости единичного конденсатора.

2. Разработан метод определения частотных характеристик тактируемых аналоговых и аналого-цифровых схем на переключаемых элементах. Проведенный эксперимент подтверждает достоверность результатов, получаемых с помощью разработанного метода

3. Разработан метод идентификации параметров универсальной поведенческой модели АЦП и УВХ.

Практическая значимость работы

1. Уменьшение времени проектирования конденсаторных матриц для ЦАП на переключаемых конденсаторах, благодаря использованию предложенной поведенческой модели физического уровня

для ЦАП на переключаемых конденсаторах (сокращение времени моделирования при указанных в работе условиях - более чем на порядок).

2. Уменьшение времени моделирования СнК, содержащих СФ-блоки АЦП и УВХ благодаря использованию поведенческих моделей этих блоков. В работе показано, что замена модели транзисторного уровня на поведенческую модель УВХ позволила сократить время моделирования устройства в 10-12 раз.

3. Разработанный метод определения частотных параметров переключаемых схем интегрирован в САПР Cadence. В двух рассмотренных в диссертации случаях результаты исследования с использованием предложенного метода дали лучшее совпадение с экспериментальными данными, чем метод используемый Cadence SpectreRF.

4. Предложенная модификация методологии проектирования «сверху-вниз» с верификацией «снизу-вверх» позволяет при создании СФ-блока отразить в его поведенческой модели данные, связанные с особенностями технологического процесса предприятия-изготовителя.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Поведенческая модель ЦАП на переключаемых конденсаторах на основе математическай модели влияния паразитных ёмкостей, позволившая при проектировании 14-битного ЦАП, сократить время исследования влияния паразитных ёмкостей на характеристики ЦАП с 48 часов до 12 минут.

2. Метод идентификации параметров поведенических моделей АЦП и УВХ, позволяющий сократить время верификации устройств, содержащих эти блоки за счет использованию созданных поведенческих моделей моделей.

3. Метод определения частотных характеристик схем с переключаемыми элементами, позволяющий, в частности, провести идентификацю параметров поведенческих моделей АЦП и УВХ, а более общем случае - исследовать частотные характеристики схем, для которых невозможно проведение малосигнального анализа.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при создании БИС считывания сигналов детекторов для международного физического эксперимента CBM в центре GSI по изучению тяжёлых ионов имени Г. Гельмгольца (Дармштадт, Германия). Разработанная модель УВХ использована при проектировании СФ-блока 9-битного конвейерного АЦП по стандартной технологии КМОП с проектной нормой 0,18 мкм на фабрике UMC, Тайвань. В соавторстве получено свидетельство №2010630091 о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы .

Результаты диссертации использованы в НИР по созданию интегральной микросхемы ASIC для интеллектуального датчика давления, выполненной совместно с ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва. Использование результатов диссертационной работы ускорило процесс проектирования матрицы переключаемых конденсаторов для 14-битного АЦП последовательных приближений, входящего в состав ИМС. Блок АЦП был изготовлен по технологии БиКМОП с проектной нормой 0,35 мкм на фабрике AMS, Австрия. В соавторстве получено свидетельство №2012630037 о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы . Получен акт о внедрении.

Предложенная модель ЦАП использована при проектировании топологии матрицы переключаемых конденсаторов для СФ-блока 10-битного АЦП в составе ИМС для обработки сигналов кремниевых фотоумножителей, разрабатываемой в настоящее время фирмой SARAD GmBh, Дрезден, Германия. Получен акт о внедрении.

Предложенный метод определения частотных характеристик аналого-дискретных схем использован при проектировании опытно-промышленного образца портативного прибора для обнаружения альфа-радиоактивных загрязнений в НТЦ по аварийно-техническим работам на АЭС корпорации Росэнергоатом. Получен акт о внедрении.

Результаты диссертационной работы использованы при модернизации курсов «САПР в микроэлектронике» и «Программно-аппаратное обеспечение ПЭВМ», а также лабораторного практикума по этим курсам. В соавторстве подготовлены и изданы 2 учебных пособия.

Достоверность

Достоверность предложенных моделей подтверждается результатами измерений изготовленных образцов блока 14-битного АЦП после-

довательных приближений и субблока УВХ для 9-битного конвейрного АЦП.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на Научных сессиях МИФИ (2010-2012); Всероссийских научно-технических конференциях «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (Москва, 2010, 2012); Международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2010, 2012), в 2010 г. доклад отмечен грамотой Оргкомитета; Международном симпозиуме «International Symposium on Nuclear Electronics & Computing» (Болгария, Варна, 2011); Международной конференции «European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC)» (Финляндия, Хельсинки, 2011); Международной конференции «8th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics & Electronics» (Германия, Ахен, 2012); Международной конференции «International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)» (Испания, Севилья, 2012)

Опубликованные результаты

По теме диссертационной работы опубликовано 10 статей в российских научно-технических журналах, рекомендованных ВАК; 7 статей в российских научно-технических журналах, входящих в российский индекс научного цитирования РИНЦ; 10 докладов в сборниках российских и международных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит 138 страниц, в том числе 43 рисунка, 4 таблицы, и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 85 наименований.

Содержание диссертации

Введение

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертации. Поставлены задачи исследования и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

1 Место поведенческих моделей аналоговых и аналого-цифровых блоков в процессе проектирования СБИС

Для успешного применения методологии «сверху-вниз» с верификацией «снизу-вверх» необходимы универсальные поведенческие модели блоков, которые применяются для передачи информации на системный уровень.

Для ускорения разработки топологии блока применяются поведенческие модели физического уровня. Для оценки влияния топологии на характеристики схемы необходимо моделирование схемы с учётом топологических параметров (рисунок 1), которое для сложных блоков может занимать от нескольких часов до нескольких дней машинного времени. Создание поведенческой модели, учитывающей параметры топологии, позволяет сократить это время до нескольких минут.

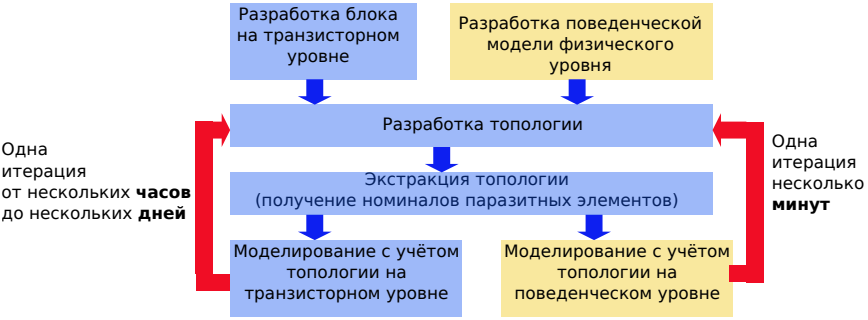

Рисунок 1 – Применение поведенческих моделей физического уровня для ускорения проектирования топологии блока

Предложенная в работе модификация методологии проектирования «сверху-вниз» с верификацией «снизу-вверх», включает в себя дополнительный этап уточнения универсальной поведенческой модели блока после запуска тестового образца ИМС. Уточнённая универсальная поведенческая модель позволяет учесть влияние технологии изготовления на характеристики всей системы, использующей блок.

2 Поведенческая модель физического уровня ЦАП на переключаемых конденсаторах

На рисунке 2 показан ЦАП на основе матрицы переключаемых конденсаторов в составе АЦП последовательных приближений.

Получены аналитические выражения для описания передаточной характеристики ЦАП, в которых в отличие от предшествующих ра-

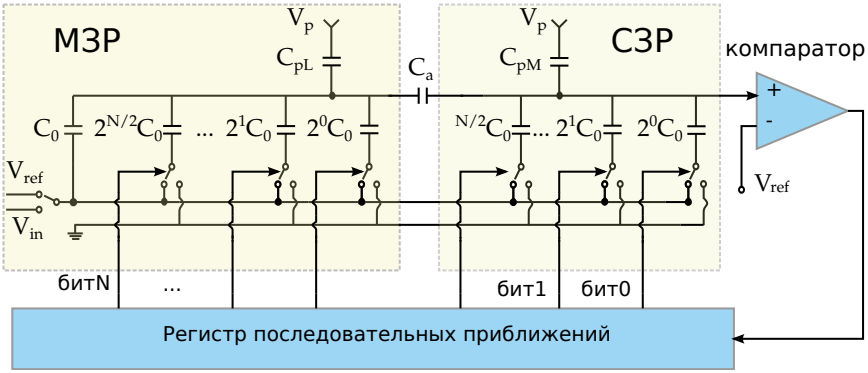

Рисунок 2 – Структурная схема АЦП последовательного приближения с ЦАП на переключаемых конденсаторах

бот учитывается влияние паразитных топологических элементов матрицы: конденсаторов, обозначенных на рисунке 2, как C_{pL} и C_{pM}, а также двоично-взвешенной составляющей погрешности величины ёмкости единичного конденсатора C_0. На основе полученных соотношений разработана поведенческая модель ЦАП физического уровня на языке Verilog-A. Сравнение результатов расчета с использованием разработанной модели и модели транзисторного уровня с экстракцией паразитных параметров для 14-битного ЦАП, выполненного по технологии КМОП с проектной нормой 0,35 мкм фабрики AMS, приведено в таблице 1.

Параметр	Verilog-A модель	Полная модель с учётом паразитных параметров
Максимальное значение дифференциальной нелинейности, бит	6.9	7.3
Ошибка усиления, %	0.359	0.361
Время моделирования полной передаточной характеристики	12 мин.	>48 часов

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования Verilog-A модели и модели транзисторного уровня с экстракцией паразитных параметров топологии

Основные преимущества предложенной модели:

- Сокращение времени моделирования с учетом данных экстракции паразитных элементов топологии с нескольких суток до нескольких минут

- Проверка в реальном масштабе времени влияния исследуемого варианта топологической реализации блока ЦАП на характеристики всей микросхемы или системы на кристалле.

3 Универсальные поведенческие модели УВХ и АЦП на основе модели Хаммерштайна

Для моделирования АЦП и УВХ была использована модель Хаммерштайна, дополненная блоком идеального дискретизатора – АЦП или УВХ (рисунок 3).

Предложенный процесс идентификации параметров моделей Хаммерштайна для АЦП и УВХ состоит из двух основных этапов:

- Идентификация параметров линейного блока с памятью. Блок АЦП или УВХ исследуется с помощью предложенного метода частотного анализа переключаемых схем.

- Идентификация параметров нелинейного блока без памяти с помощью предложенного программного Verilog-A модуля.

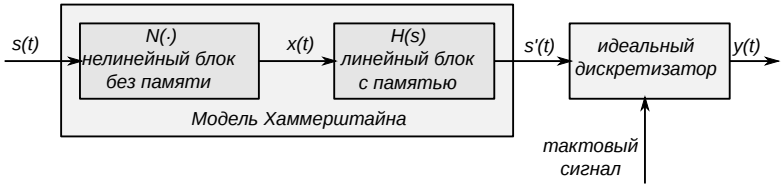

Рисунок 3 – Схема модифицированной модели Хаммерштайна УВХ и АЦП

Основные преимущества предложенной модели:

- Учёт как статических, так и динамических параметров УВХ и АЦП

- Экстракция параметров модели встроена в стандартный маршрут проектирования с использованием САПР Cadence

Новый метод частотного анализа схем с переключаемыми элементами

Для иллюстрации предложенного метода дан анализ простейшей схемы – функционального ядра УВХ (рисунок 4). Однако метод имеет достаточно общий характер и может быть использован для моделирования других устройств, содержащих переключаемые элементы.

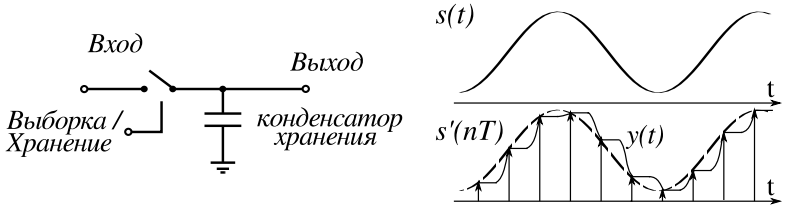

Рисунок 4 – Функциональная схема УВХ и формы сигналов на его входе и выходе

Если $s(t)$ – входной сигнал УВХ, то на выходе УВХ будет последовательность отсчётов $s'(nT)$, где $n = 0, 1, 2, \ldots$, T – период дискретизации. Восстановление аналогового сигнала $y(t)$ по последовательности не подвергшихся квантованию отсчётов $s'(nT)$ позволяет рассматривать схему с переключаемыми элементами как линейную систему с входом $s(t)$ и выходом $y(t)$. На основе данных о параметрах восстановленного сигнала определяются коэффициенты передачи и значения фазового сдвига относительно входного сигнала на заданном множестве частот, то есть, АЧХ и ФЧХ системы.

Последовательность основных действий предложенного метода моделирования иллюстрирует рисунок 5. В практической реализации предложенного метода управление моделированием и обработка результатов осуществляется с помощью программного модуля на языке Verilog-A.

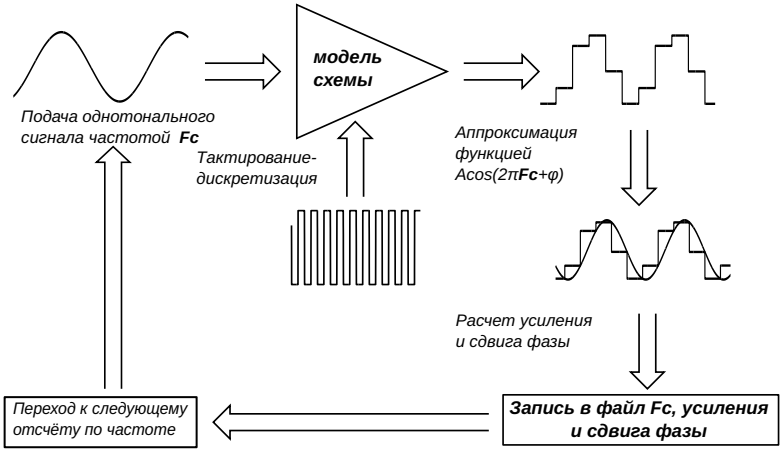

Рисунок 5 – Алгоритм анализа частотных свойств переключаемой схемы

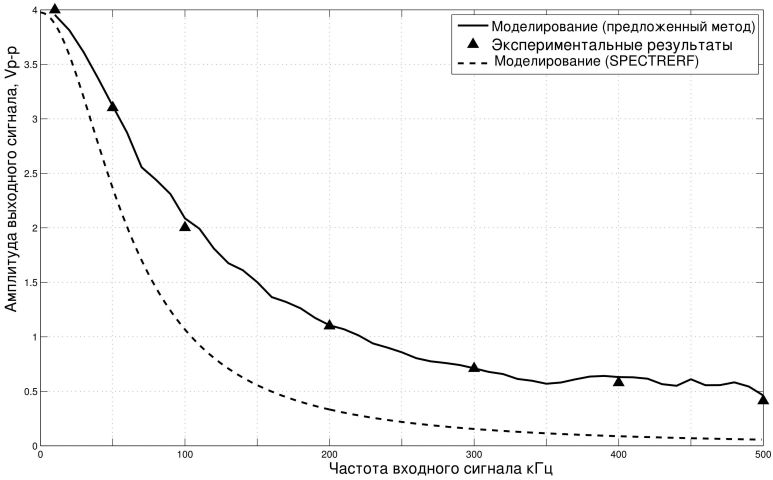

Рисунок 6 – Результаты моделирования и эксперимента для тестовой схемы

Для сравнения предложенного метода частотного анализа с методом, основанным на использовании симулятора SpectreRF, который рекомендован компанией Cadence для расчёта переключаемых схем, были проведены экспериментальные измерения амплитудно-частотной характеристики тестовой схемы УВХ при частоте тактового сигнала 3 МГц. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования с использованием обоих методов (рисунок 6) показывает, что предложенный метод обеспечивает более высокую точность.

Основные преимущества предложенного метода:

-Точность частотного анализа тождественна точности анализа переходных процессов и существенно превышает точность стандартного метода, используемого в SpectreRF.

-Произвольный выбор моментов времени при проведении аппроксимации выходного сигнала позволяет учесть влияние характеристик УВХ на параметры АЦП.

4 Характеризация универсальной поведенческой модели блока на основе измерений параметров изготовленных образцов

Повторное использование или передача разработанных аналого-цифровых СФ-блоков предполагает наличие их поведенческих моделей, параметры которых уточнены на основе данных, полученных при испытаниях изготовленных тестовых образцов. Такие модели позволя-

ют учесть особенности конкретного технологического процесса. Наличие библиотеки таких блоков, позволяет создавать новые системы за минимальное время.

Создана поведенческая модель СФ-блока УВХ. Блок изготовлен по технологии КМОП с проектной нормой 0,18 мкм на фабрике UMC, Тайвань. Для полного учёта характеристик изготовленного тестового образца в структуру модели добавлены блоки, моделирующие входной и выходной интерфейсы, а также паразитное прохождение входного сигнала.

Блок УВХ использован при разработке 9-битного конвейерного АЦП для электронных систем готовящегося международного физического эксперимента CBM в Дармштадте, Германия.

Заключение

Основным научным результатом диссертации является решение актуальной задачи разработки методов создания и использования поведенческих моделей аналого-цифровых блоков для повышения эффективности проектирования АЦП.

Теоретические результаты

1. Разработана модель цифро-аналогового преобразователя на основе матриц переключаемых конденсаторов, учитывающая влияние паразитных емкостей топологических элементов матриц и разброс номиналов конденсаторов. Применение предложенной модели сократило более чем на порядок время исследования по сравнению с моделью транзисторного уровня, дополненной данными экстракции паразитных параметров.

2. Впервые предложен метод определения частотных свойств аналого-дискретных схем. Для тестовой схемы УВХ результаты исследования с использованием предложенного метода дали лучшее совпадение с экспериментальными точками, чем Cadence SpectreRF.

3. Предложена модификация маршрута проектирования аналого-цифровых БИС и систем на кристалле, основанная на методологии разработки «сверху-вниз» с верификацией «снизу-вверх», в которой учитываются особенности технологического процесса изготовления блоков путем коррекции параметров их поведенческих моделей по результатам испытаний тестовых образцов.

Практические результаты

1. Создан программный модуль на языке Verilog-A для экстракции параметров разработанных универсальных поведенческих моделей устройств выборки-хранения и АЦП.

2. Выполнена характеризация разработанной универсальной поведенческой модели блока устройства выборки-хранения, реализованного по технологии КМОП с проектной нормой 0,18 мкм фабрики UMC.

3. Создан автоматизированный измерительный комплекс для измерения характеристик АЦП и ЦАП и экстракции параметров моделей аналого-цифровых блоков.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бочаров Ю.И., Гуменюк А.С., Лапшинский В.А., Осипов Д.Л., Симаков А.Б. Архитектура специализированной БИС считывания сигналов многоканальных датчиков //Датчики и Системы, 2008, №10, с. 47 - 50.

2. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А. и др. Создание компактных поведенческих моделей аналого-цифровых блоков на основе результатов испытаний тестовых образцов микросхем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сб. трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010, С. 150 - 153.

3. Бутузов В.А., Бочаров Ю.И., Гуменюк А.С., Осипов Д.Л. и др. СФ-блок быстродействующего микромощного АЦП для многоканальной системы на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сб. трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010, С. 517 —520.

4. Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Гуменюк А.С., Осипов Д.Л., Симаков А.Б. Новый способ автокалибровки для конвейерных КМОП АЦП // Датчики и системы, 2010, №5, С. 71 - 74.

5. Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Осипов Д.Л. Микромощный быстродействующий АЦП для многоканальных систем //Датчики и системы, 2011, №5, С. 48 - 50.

6. Бутузов В.А., Бочаров Ю.И., Осипов Д.Л., Симаков А.Б. Способ повышения линейности АЦП последовательного приближения с матрицей переключаемых конденсаторов // Радиопромышленность, 2012, №3, С. 14-23.

7. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Симаков А.Б. Метод моделирования частотных свойств схем на переключаемых конденсаторах // Радиопромышленность, 2012, №3, С. 23-33.

8. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А. Автоматизированный измеритель статических параметров аналого-цифровых преобразователей // Приборы и техника эксперимента, 2012, №5, С. 107-108.

9. Осипов Д.Л. Модель ЦАП на основе матрицы конденсаторов с разделителем в составе АЦП последовательных приближений // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012. Сб. трудов. – М.: ИППМ РАН, 2012, С. 517 - 520.

10. Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Осипов Д.Л., и др. Блок АЦП специализированной ИМС для датчиков давления // Датчики и системы, 2012, №11, С.48 - 50.

Статьи и материалы конференций

1. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А и др. Способ построения компактных поведенческих моделей аналоговых и аналого-цифровых блоков на основе результатов испытаний тестовых образцов // Труды Российского научн.-техн. общества им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск: XII. – Москва, 2010, С. 272 - 275.

2. Бутузов В.А., Бочаров Ю.И., Гуменюк А.С., Осипов Д.Л. Быстродействующий АЦП с низким энергопотреблением для многоканальных систем обработки сигналов // Труды Российского научн.-техн. общества им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск: XII – Москва, 2010, С. 275 - 279.

3. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Симаков А.Б. Создание высокоуровневых моделей аналого-цифровых блоков по результатам испытаний тестовых образцов // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. В 6 томах. Том II. Физика плазмы и плазменные технологии. Нетрадиционная энергетика. Ускорительная

техника и и электрофизика. Конструкционныеп материалы для ядерной энергетики. – М.:НИЯУ МИФИ, 2010. С. 250 - 253.

4. Atkin E., Bocharov Yu., Gumenyuk A., Osipov D., Polyakov A., Simakov A., Simakov M., Shunkov V. and Voronin A. Low Power Pipelined ADC IP-blocks. // CBM Progress Report 2007. GSI Report 2008-4. DSI Darmstadt. 2008. P. 50. ISSN:0171-4546, ISBN: 978-3-9811298-5-4. http://www.gsi.de/documents/DOC-2008-May-3-1.pdf

5. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И. Пакет средств проектирования электронных устройств gEDA // Технологии в электронной промышленности, №3, 2011, С. 24-27.

6. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А. Автоматизация измерений с помощью программных средств Expect/Tcl на примере тестирования АЦП // Компоненты и технологии, №8, 2011, С.196 – 199.

7. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И. Универсальная квазилинейная поведенческая модель устройства выборки-хранения // Компоненты и технологии, №11, 2011, С.173-176.

8. Бутузов В. А., Бочаров Ю. И., Осипов Д. Л., Симаков А. Б. Прецизионный БИКМОП АЦП последовательного приближения с низким энергопотреблением // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Том 1, №1, 2012, С.84-89.

9. Осипов Д. Л., Бочаров Ю. И., Бутузов В. А. Современные подходы к проектированию аналого-цифровых бис, основанные на использовании методов многоуровневого моделирования // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Том 1, №1, 2012, С.89-92.

10. Осипов Д.Л., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А. Метод выполнения частотного анализа при моделировании схем с переключаемыми конденсаторами // 14-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2012». Доклады. – Москва, 2012, С. 393 – 396.

11. Osipov D., Bocharov Yu. Behavioral model of split capacitor array DAC for use in SAR ADC design // IEEE Proceedings on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2012 8th Conference on , P. 1-4.

12. Bocharov Yu, Butuzov V., Osipov D., et. al. A Low-Power 9-bit Pipelined CMOS ADC for the front-end electronics of the Silicon Tracking System. // XXIII International Symposium on Nuclear Electronics & Computing. (NEC 2011) Proceedings. 2011. pp.77-85

13. Osipov D., Bocharov Yu. Frequency analysis of switched capacitor circuits // IEEE proceedings on International Conference on Synthesis, Modelling, Analysis and Simulation Methods and Application to Circuit Design (SMACD), 2012, P. 209-212.

Свидетельства о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы

1. Специализированная интегральная микросхема для датчика давления. / Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2012630037. / Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Клюев А.Д., Осипов Д.Л., Шумихин В.В., Самосадный А.В. / Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 7 марта 2012 г.

2. Четырёхканальная специализированная микросхема для считывания сигналов микрополосковых кремниевых детекторов. / Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2010630091. / Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Волков Ю.А., Клюев А.Д., Осипов Д.Л., Силаев А.С., Симаков А.Б. / Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 17 сентября 2010 г.

Учебно-методические работы

1. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Осипов Д.Л. и др. Основы работы с пакетами САПР интегральных микросхем на платформе Cadence Virtuoso: Сб. лабораторных работ. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 92 с.

2. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Осипов Д.Л. и др. Проектирование элементов аналого-цифровых интегральных микросхем: Лаб. практикум. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 56 с.