

На правах рукописи

Шумихин Виталий Вячеславович

**МАЛОМОЩНЫЕ АМПЛИТУДНЫЕ ТРАКТЫ КМОП  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ  
МИКРОПОЛОСКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2013 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

кандидат технических наук  
Аткин Эдуард Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Басиладзе Сергей Геннадьевич,  
заведующий лабораторией НИИЯФ МГУ

кандидат технических наук  
Хохлов Михаил Валентинович,  
генеральный директор ОАО «НИИТАП»

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований  
(ОИЯИ)

Защита диссертации состоится 18 марта 2013 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

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

Автореферат разослан «14» февраля 2013 г.

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

 П.К. Скоробогатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертация посвящена** решению важной научно-технической задачи разработки маломощных аналоговых амплитудных трактов многоканальных КМОП микросхем съема информации детекторов физических экспериментов.

### **Актуальность проблемы**

В современных физических экспериментах наблюдается тенденция к значительному увеличению числа каналов получения информации. В крупных международных экспериментах таких, как ATLAS, ALICE, LHCb, CMS на ускорителе LHC (CERN, Швейцария), CBM, PANDA на ускорителе FAIR (г. Дармштадт, Германия) число каналов достигает нескольких сотен тысяч и миллионов. Это приводит к усложнению физической аппаратуры и как следствие – к повышению требований к детекторной электронике по уровню интеграции, потребляемой мощности и массогабаритным показателям. Для удовлетворения этим требованиям необходимо использование специализированной элементной базы.

Электроника считывания аппаратуры физического эксперимента, как правило, применяется в условиях ограниченного пространства, при высокой плотности размещения элементов. При этом потребляемая мощность электроники ограничена для предотвращения перегрева аппаратуры. Для повышения степени функциональной интеграции, удовлетворения требованиям по массогабаритным показателям необходимо уменьшать потребляемую мощность электронных узлов микросхем считывания. Таким образом, одной из самых важных проблем при проектировании микросхем считывания сигналов детекторов физических экспериментов является проблема снижения потребляемой мощности. Решение этой проблемы является также актуальным в связи с общей тенденцией снижения потребляемой мощности электронной компонентной базы. Анализ характеристик выпускаемых микросхем считывания и первичной обработки сигналов с детекторов показал, что имеется возможность дальнейшего снижения потребляемой ими мощности без существенного ухудшения остальных параметров, включая характеристики передачи полезных сигналов и шумовые характеристики, за счет использования новых методик и маршрутов проектирования в рамках доступной технологии.

Совершенствование технологии, появление мощных программных средств требуют применения новых маршрутов проектирования микросхем считывания. Данная работа посвящена решению актуальных задач по созданию методики проектирования аналоговых трактов с минимальной потребляемой мощностью и удовлетворяющих требованиям технического

задания по комплексу остальных параметров, развитию маршрута проектирования многоканальных микросхем считывания, а также разработке и изготовлению многоканальных интегральных КМОП микросхем считывания, не уступающих по совокупности характеристик известным зарубежным аналогам.

Диссертация связана с проектированием специализированной электронной аппаратуры для эксперимента Роскосмоса «Нуклон», направленного на исследование космических лучей, и для международного эксперимента CBM, посвященного исследованию сжатой барионной материи на новом ускорительном комплексе FAIR.

Актуальность данного направления исследований подтверждается также недостаточным развитием отечественной элементной базы физического эксперимента.

### **Состояние исследований по теме**

Созданием элементной базы для физических экспериментов традиционно занимаются специалисты как российских организаций и физических центров, таких как НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, НИИСИ РАН, ФГУП НПП «Пульсар», так и зарубежных: CERN (Швейцария), DESY (Германия), GSI (Германия), BNL (США).

Большой вклад в развитие теории и практики проектирования электроники для аппаратуры физического эксперимента внесли такие специалисты, как Агаханян Т.М., Базиладзе С.Г., Волков Ю.А., Мелешко Е.Б., Сенько В.А., Цитович А.П., Яковлев Г.В. и др., но их исследования опирались на использование преимущественно дискретной компонентной базы. Требования к современной аппаратуре физического эксперимента предполагают использование специализированной интегральной элементной базы и развитие новых подходов ее проектирования.

Среди зарубежных специалистов, занимающихся разработкой современной элементной базы физического эксперимента, можно выделить G. De Geronimo, P. O'Connor (BNL, США), M. Idzik, P. Grybos, W. Dabrowski, R. Szczygiel (AGH, Польша), J. Kaplon, S. Marchioro, P. Jarron (CERN, Швейцария). В работах этих авторов решены многие проблемы проектирования микросхем считывающей электроники, однако в них не описывается в полном объеме методика проектирования аналоговых амплитудных трактов и недостаточное внимание уделяется проблеме снижения потребляемой мощности. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается и применяется новая методика проектирования амплитудных трактов многоканальных микросхем считывания.

Для изготовления многоканальных микросхем считывания наиболее широко применяется КМОП технология. Как правило, аналоговый амплитудный тракт содержит зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) для усиления сигналов детектора, усилитель-формирователь для фильтрации шума и устройство хранения амплитуды сигнала (устройство выборки-хранения или пиковый детектор). Потребляемая мощность аналогового тракта определяется параметрами ЗЧУ, и оптимизация его характеристик является наиболее обсуждаемой задачей. Для снижения потребляемой мощности предусилителя в аналоговом амплитудном тракте обоснованным является обеспечение условий работы входного транзистора в области слабой или умеренной инверсии, что позволяет достичь высокой эффективности использования режимного тока предусилителя и таким образом оптимизировать потребляемую мощность аналогового тракта в целом.

В ряде публикаций авторов G. De Geronimo, P. O'Connor, M. Idzik, P. Grybos, W. Dabrowski, R. Szczygiel освещен вопрос анализа и минимизации шума предусилителя. Проводится сравнение шумовых характеристик предусилителя в зависимости от типа проводимости, режимного тока и геометрии входного транзистора. Анализируется вклад различных составляющих шума, но не исследуется возможность нахождения оптимальных характеристик аналогового тракта и достижения минимальной потребляемой мощности предусилителя.

Отечественные публикации в данной области весьма немногочисленны. Наибольший практический интерес представляют диссертации, защищенные в последние годы. Диссертация Силаева А.С. (НИЯУ МИФИ) посвящена аналого-цифровым микроэлектронным устройствам амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов. В работе особое внимание уделяется построению аналоговых трактов для систем с широким динамическим диапазоном, но не исследованы вопросы оптимизации комплекса параметров таких электронных узлов, в том числе и по потребляемой мощности. В работе Дьячкова И.А. (НИЯУ МИФИ) «Зарядо-чувствительные усилители сигналов детекторов ионизирующих излучений» подробно описываются типы предусилителей, критерии оценки качества ЗЧУ, но не исследован вопрос снижения потребляемой мощности ЗЧУ. Также в рассмотренной работе использована биполярная технология, в то время как современная элементная база физического эксперимента в основном разрабатывается по КМОП технологии. В диссертации Клюева А.Д. (НИЯУ МИФИ) предлагаются структурные решения, направленные на снижение потребляемой мощности многоканальных микросхем считывания за счет применения системы дерандомизации данных и сокращения числа каналов обработки информации, но не рассматривается вопрос снижения

потребляемой мощности аналогового амплитудного тракта многоканальных микросхем считывания.

В целом анализ литературных данных показал, что задача снижения потребляемой мощности аналогового тракта является важной и актуальной, но до конца не решенной. Отсутствуют, в частности, доступные обобщенные методики проектирования аналогового амплитудного тракта, рассчитанные не только на минимизацию шума предусилителя, но и на достижение компромисса между сигнальными, шумовыми характеристиками и потребляемой мощностью.

**Целью диссертации** является создание маломощных аналоговых амплитудных трактов многоканальных КМОП интегральных микросхем считывания сигналов микрополосковых детекторов на основе разработанной методики проектирования, нацеленной на снижение потребляемой мощности аналогового тракта.

Для достижения этой цели был использован комплексный подход, включающий решение следующих взаимосвязанных теоретических и экспериментальных **задач**:

1. Анализ принципов построения микросхем считывания, выявление современных тенденций в проектировании таких устройств, анализ схемотехнических решений, используемых в амплитудных аналоговых трактах.
2. Усовершенствование модели аналогового амплитудного тракта с учетом специфики субмикронных КМОП технологий и особенностей схемотехнических решений, применяемых в электронных узлах амплитудных трактов.
3. Разработка методики проектирования амплитудных аналоговых трактов микросхем считывания, нацеленной на снижение потребляемой мощности аналогового тракта.
4. Создание специализированного маршрута проектирования многоканальных микросхем считывания сигналов микрополосковых детекторов с использованием современных средств микроэлектронных САПР, позволяющего сократить время, затрачиваемое на проектирование микросхемы.
5. Апробация разработанных методики и маршрута при проектировании микросхем считывания для детекторов эксперимента Роскосмоса «Ну-клон» и международного эксперимента СВМ.

### **Научная новизна работы:**

1. Уточнена модель маломощного амплитудного тракта для микрополосковых детекторов, в частности, учитывающая влияние коэффициента усиления без обратной связи зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) на шумовые характеристики аналогового тракта.
2. Предложена целевая функция для оптимизации параметров аналогового тракта по энергопотреблению.
3. Разработана методика проектирования аналоговых амплитудных трактов микросхем считывания, нацеленная на достижение компромиссных по совокупности характеристик электронных узлов, позволяющая, в частности, снизить потребляемую мощность проектируемого аналогового тракта.
4. Разработан маршрут проектирования специализированных микросхем, позволяющий провести структурное моделирование микросхемы на ранней стадии проектирования, существенно сократить время, затрачиваемое на моделирование многоканальной структуры за счет использования разработанной высокоуровневой модели аналогового тракта, а также учесть взаимное влияние аналоговых каналов многоканальной микросхемы друг на друга.

### **Практическая ценность:**

1. С использованием разработанной методики и маршрута разработана и изготовлена 32-х канальная специализированная микросхема съема и обработки сигналов микрополосковых детекторов с динамическим диапазоном от единиц фКл до 100 пКл для эксперимента «Нуклон» агентства «Роскосмос». Получено свидетельство о регистрации топологии № 2010630090. Получен акт о внедрении.
2. На основе разработанной методики и маршрута разработаны и изготовлены две специализированные многоканальные микросхемы для считывания сигналов трековой системы и мюонной камеры международного эксперимента СВМ, проектируемого на ускорителе FAIR (г. Дармштадт, Германия).
3. Разработана и изготовлена специализированная микросхема для интеллектуального датчика давления. Получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2012630037. Получен акт о внедрении.
4. Проведена модернизация инфраструктуры лаборатории микроэлектронных САПР кафедры Электроники НИЯУ МИФИ и

разработаны новые лабораторные работы по курсу «Теоретические основы специальности» специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок», выпущено учебное пособие: Основы проектирования узлов аналоговых интегральных микросхем: Лабораторный практикум / Э. В. Аткин, В. В. Шумихин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 84 с.

### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Методика проектирования аналогового амплитудного тракта микросхем считывания, основанная на предложенной целевой функции.
2. Маршрут проектирования микросхем считывания, позволяющий снизить время проектирования многоканальных микросхем считывания, за счет использования высокоуровневой модели аналогового тракта, описанной на языке VerilogA.
3. Электронные узлы амплитудных аналоговых трактов, реализованные в составе специализированных микросхем для крупного физического международного эксперимента CBM (FAIR, Германия) и космического эксперимента «Нуклон».
4. Результаты тестирования опытных микросхем, подтверждающие целесообразность и эффективность использования примененных при проектировании решений.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: IEEE East-West Design & Test Symposium, Russia, 2009, 2010; 7-я Курчатовская молодежная научная школа, Москва, 2009; Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и Наука» 2009, 2010; III Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», Серпухов, 2009; XXIII International Symposium on Nuclear Electronics & Computing, Варна, 2011; Научные сессии НИЯУ МИФИ, Москва, 2009, 2010, 2013.

Результаты диссертации опубликованы в 10-и печатных работах, 3 из которых в изданиях из перечня ВАК.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 120 страниц, включая 77 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 83 наименования.



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

**Первая глава** посвящена обзору современного технического уровня развития многоканальных микросхем считывания, принципам построения амплитудных трактов и анализу их основных характеристик. Современные крупные физические эксперименты имеют сотни тысяч и даже десятки миллионов каналов. Основными тенденциями в развитии электроники физического эксперимента являются увеличение функциональной интеграции и снижение потребляемой мощности. Удовлетворение этих требований возможно при использовании современных технологий, а также методик и маршрутов проектирования. При проектировании микросхем для физического эксперимента наиболее широко применяется КМОП технология. КМОП технология имеет ряд преимуществ перед биполярной и Би-КМОП технологией, таких как более низкая стоимость и высокое сопротивление затвора МОП транзистора, но развитие КМОП технологии в основном определяется потребностью цифровых схем – увеличивается быстродействие, снижается энергопотребление. В тоже время такие параметры, важные при проектировании аналоговых схем, как шум, качество пассивных элементов, отношение порогового напряжения транзистора к напряжению питания и другие, неизменно ухудшаются. Применение современной КМОП технологии делает необходимым применение новых методик, новых схемотехнических и структурных решений, а также маршрутов проектирования, для достижения предельных характеристик аналоговых электронных узлов. Проведенный анализ структур микросхем считывания сигналов микрополосковых детекторов показал, что типичная структура аналогового канала содержит предусилитель для усиления сигнала детектора и усилитель-формирователь для фильтрации сигнала и сокращения длительности импульса. Большинство используемых на практике предусилителей представляют собой зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ). В работе определены основные схемотехнические особенности ЗЧУ, выполнен анализ системы параметров ЗЧУ, определена связь параметров ЗЧУ между собой. ЗЧУ является основным потребителем мощности аналогового тракта. Показано, что для решения задачи построения маломощного аналогового тракта необходимо оптимизировать комплекс параметров предусилителя и усилителя-формирователя.

**Во второй главе** рассмотрены проблемы проектирования ЗЧУ с оптимальными характеристиками. Предложена модель аналогового тракта, учитывающая влияние постоянной времени фильтра и его типа на шум аналогового тракта, влияние конечной величины коэффициента усиления по напряжению без обратной связи ЗЧУ на шум аналогового тракта, а также зависи-

мость шума от эквивалентной ширины канала входного транзистора и его режимного тока. Предложена целевая функция для нахождения минимального режимного тока входного каскада предусилителя при условии обеспечения комплекса допустимых параметров аналогового тракта. На основе разработанной модели было выполнено описание аналогового тракта на языке VerilogA, использование которого позволяет значительно сократить время моделирования аналогового амплитудного тракта.

**Третья глава** посвящена разработке аналоговых трактов микросхем считывания. Предложена методика проектирования аналоговых трактов, нацеленная на снижение потребляемой мощности. Методика апробирована при проектировании аналоговых амплитудных трактов. Описываются основные этапы проектирования схем и топологий электронных узлов аналогового тракта. Приведены разработанные электронные узлы микросхем считывания и результаты их моделирования. Описаны разработанные топологии электронных узлов и этапы их верификации. Приведены результаты моделирования с учетом влияния паразитных элементов, экстрактированных из топологии.

**В четвертой главе** описан предложенный маршрут проектирования аналого-цифровых микросхем считывания. Особенностью маршрута является возможность моделирования полной функциональной схемы микросхемы на ранних этапах проектирования, что позволяет избежать принципиальных ошибок и тем самым сократить время, затрачиваемое на разработку микросхемы, а также возможность моделирования экстрактированной топологии многоканальной структуры, что позволяет повысить достоверность результатов. Приведены выполненные автором разработки интегральных микросхем считывания для микрополосковых детекторов с использованием предложенного маршрута проектирования аналого-цифровых микросхем. Описана специализированная интегральная микросхема съема и обработки информации микрополосковых детекторов, спроектированная для задач эксперимента Роскосмоса «Нуклон». Приведена структура разработанной микросхемы, ее основные характеристики и результаты тестирования. Приведено описание разработанных микросхем для детекторов трековой системы и мюонной камеры международного эксперимента СВМ. Дано описание разработанной специализированной микросхемы для съема сигналов датчика давления. Приведено сравнение разработанных микросхем с близкими по своим характеристикам разработками последних лет.

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

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Современные микросхемы считывания сигналов микрополосковых детекторов физического эксперимента содержат десятки каналов съема и предварительной обработки сигналов. При этом в амплитудном тракте расходуется значительная часть потребляемой мощности микросхемы.

### Анализ принципов построения амплитудных трактов микросхем считывания

Проведенный в работе анализ структур аналоговых амплитудных трактов КМОП интегральных микросхем считывания показал, что амплитудный тракт, как правило, состоит из маломощного предусилителя, усилителя-формирователя (УФ), построенного по схеме активного фильтра и предназначенного для сокращения длительности импульса с предусилителя, повышения частоты загрузки канала и фильтрации шума, и устройства выборки-хранения или пикового детектора для фиксирования амплитуды.

Наиболее широко в качестве предусилителя используется схема зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ). Для получения оптимального соотношения сигнал/шум входной транзистор ЗЧУ целесообразно делать достаточно большим (эквивалентная ширина канала транзистора достигает нескольких миллиметров) с большим режимным током. Поэтому основным потребителем мощности аналогового тракта является предусилитель (он расходует до 90% мощности тракта).

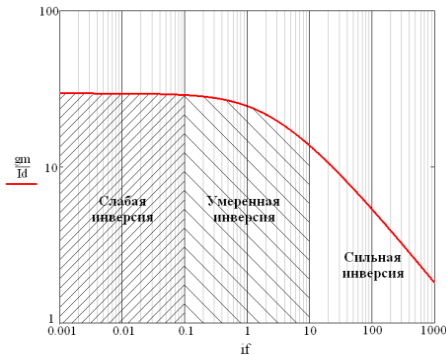


Рис. 1. Зависимость отношения крутизны к току стока от нормированного тока

Для достижения оптимальной потребляемой мощности предусилителя необходимо, чтобы крутизна входного транзистора была максимальной при заданном потребляемом токе. Это достигается при работе транзистора в области слабой инверсии. На рис. 1 показано, что отношение крутизны транзистора к току стока максимально в области слабой инверсии. Таким образом, для построения маломощного аналогового тракта необходимо, чтобы входной тран-

зистор ЗЧУ работал в области слабой инверсии.

Одним из параметров, ограничивающих снижение потребляемой мощности, является шум аналогового тракта. Усилитель-формирователь повыша-

ет отношение сигнал/шум, поэтому для расчетов параметров тракта необходимо учитывать взаимное влияние параметров усилителя-формирователя и предусилителя.

Построение амплитудного аналогового тракта в составе КМОП интегральных многоканальных микросхем считывания сигналов микрополосковых детекторов с минимальной потребляемой мощностью требует решения задачи оптимизации комплекса параметров электронных узлов, входящих в состав тракта, направленной на снижение потребляемой мощности. Для решения этой задачи была предложена усовершенствованная модель аналогового амплитудного тракта.

### **Модель амплитудного тракта**

Для поиска оптимального соотношения параметров узлов аналогового тракта была разработана математическая модель, которая учитывает:

1) влияние постоянной времени фильтра и его типа на шум аналогового тракта, что позволяет выбрать оптимальные параметры фильтра для минимизации шума.

2) Влияние конечного коэффициента усиления по напряжению без обратной связи ЗЧУ на шум аналогового тракта. Влияние конечного коэффициента усиления проявляется, когда емкость в обратной связи ЗЧУ намного меньше емкости детектора. Для увеличения коэффициента усиления, емкость конденсатора в обратной связи делают порядка десятков фФ, а емкость детектора может достигать 100 пФ. Отношение номиналов этих емкостей достигает 3-4 порядков. Для того, чтобы влиянием коэффициента усиления без обратной связи можно было пренебречь, он должен на порядок превосходить отношение емкостей, т.е. иметь значение  $10^4$ - $10^5$ . Вследствие особенностей принятой схемотехники ЗЧУ такое значение фактически не достижимо и корректный учет конечного коэффициента усиления ЗЧУ без обратной связи становится необходимостью.

3) Зависимость эквивалентного шумового заряда (ENC) от геометрии входного транзистора и его режимного тока, что позволяет определить оптимальную ширину канала входного транзистора ЗЧУ и минимизировать потребляемую мощность аналогового тракта за счет выбора минимально допустимого режимного тока входного транзистора ЗЧУ.

В качестве УФ, как правило, используют полугауссиановский фильтр, с разными порядками интегрирования. На рис. 2. показана зависимость эквивалентного шумового заряда от постоянной времени фильтра для различных типов фильтра: ENC1 – (CR)-(RC); ENC2 – (CR)-(RC)<sup>2</sup>; ENC3 – (CR)-(RC)<sup>3</sup>; ENC4 – (CR)-(RC)<sup>5</sup>; ENC5 – (CR)-(RC)<sup>7</sup>. Тип фильтра определяется исходя из

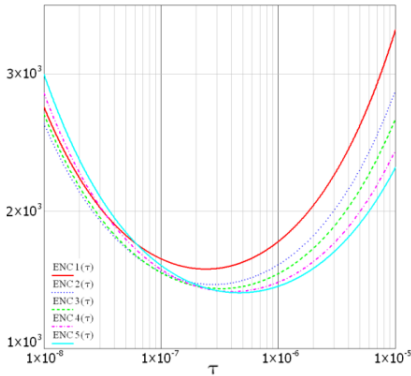


Рис. 2. Зависимость ENC от постоянной времени фильтра

На рис. 4 показан график зависимости ENC от емкости детектора при различных коэффициентах усиления. Наклон этой характеристики уменьшается при увеличении коэффициента усиления без обратной связи. При максимальной емкости детектора и усилении  $10^3$  ENC на 30 % больше, чем при усилении  $10^4$ . Таким образом, уточнение модели, позволяет с существенно большей точностью оценить шум аналогового тракта.

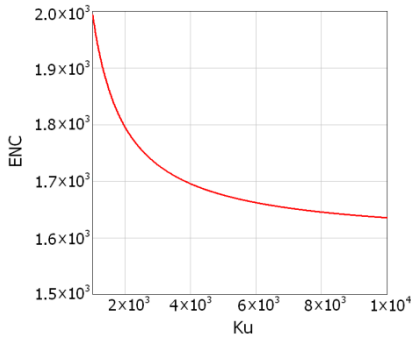


Рис. 3. Зависимость ENC от коэффициента усиления

возможности достижения требуемого уровня шума и быстродействия, а также исходя из площади, занимаемой на кристалле пассивными элементами фильтра.

На рис. 3. показан график зависимости эквивалентного шумового заряда от коэффициента усиления по напряжению без обратной связи ЗЧУ. Из графика видно, что эквивалентный шумовой заряд увеличивается при снижении коэффициента усиления до реально достижимых значений (1000-2000) на 10-20 %.

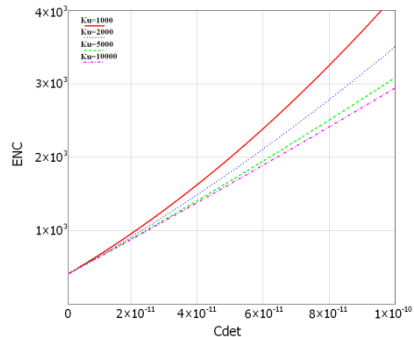


Рис. 4. Зависимость ENC от емкости детектора для различных коэффициентов усиления

Эквивалентный шумовой заряд можно представить в виде функции, зависящей от ширины канала входного транзистора ЗЧУ и от режимного тока (см. рис. 5). Пересечение поверхности зависимости эквивалентного шумового заряда от режимного тока и ширины канала входного транзистора с плоскостью допустимого эквивалентного шумового заряда дает кривую зависимости тока от ширины канала входного транзистора.

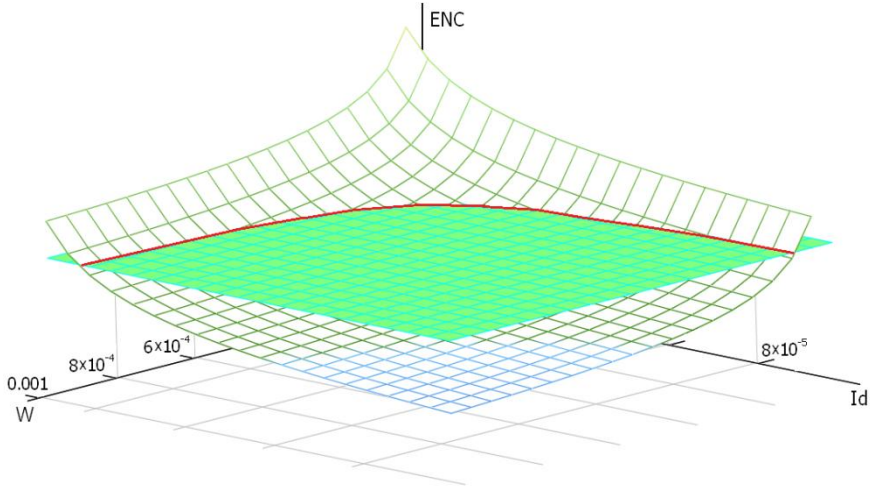


Рис. 5. Зависимость ENC от ширины канала транзистора и режимного тока

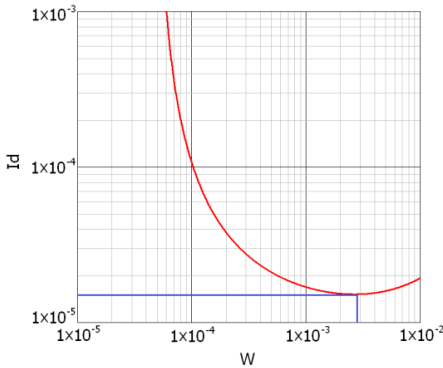


Рис. 6. Зависимость тока стока от ширины канала входного транзистора

Полученная зависимость определяется следующими соотношениями:

$$I_d = \frac{1}{K_{IW}} + \frac{1}{n_s \mu C_{OX} \frac{W}{L} \varphi_T^2 K_{IW}^2},$$

$$K_{IW} = \frac{2(ENC - ENC_i - ENC_f)^2 e^2 \tau}{F2(C_{fb} + C_{det} + C_{in})^2 (2kT \gamma n_s \varphi_T)},$$

где  $ENC$  – эквивалентный шумовой заряд,  $ENC_i$  – вклад токовой компоненты;  $ENC_f$  – вклад фликкер шума;  $W$  – ширина канала входного транзистора;  $L$  – длина канала входного

транзистора;  $\mu$ ,  $n_s$ ,  $\gamma$ ,  $C_{ox}$  – технологические параметры;  $C_{fb}$  – емкость обратной связи ЗЧУ;  $C_{det}$  – емкость детектора;  $C_{in}$  – входная емкость транзистора;  $\tau$  – постоянная времени усилителя-формирователя;  $e$  – заряд электрона;  $T$  – температура;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\varphi_T$  – тепловой потенциал.

Предложенная целевая функция имеет минимум, обусловленный увеличением емкости входного МОП транзистора при увеличении его размеров (см. рис. 6), который определяет оптимальное значение ширины канала вход-

ного транзистора для достижения минимального режимного тока и снижения энергопотребления аналогового тракта.

### Методика проектирования аналогового тракта

На основе разработанной модели аналогового тракта и целевой функции оптимизации тока входного транзистора предложена методика проектирования аналогового тракта с минимальной потребляемой мощностью.

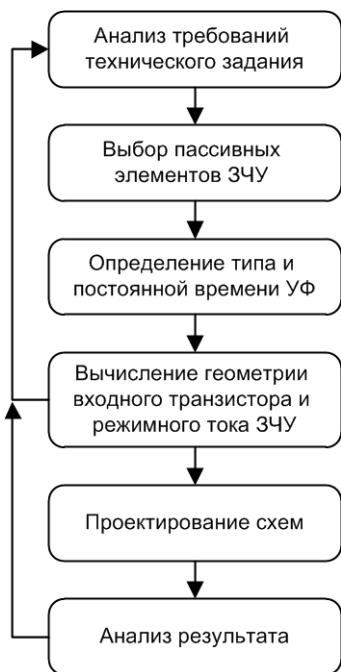


Рис. 7. Методика проектирования аналоговых трактов

Методика состоит из последовательных этапов (см. рис. 7). Исходя из анализа требований технического задания определяются пассивные элементы ЗЧУ – емкость и сопротивление обратной связи. Емкость обратной связи определяет коэффициент усиления ЗЧУ и выбирается исходя из требований к динамическому диапазону обрабатываемых сигналов. Сопротивление обратной связи определяется исходя из максимальной частоты загрузки канала. На следующем этапе, исходя из допустимого эквивалентного шумового заряда, выбирается схема активного фильтра и его постоянная времени. Далее находится целевая функция и вычисляется минимальный ток при оптимальной геометрии входного транзистора. При удовлетворении полученных характеристик требованиям технического задания проводится проектирование схем и их анализ. Методика была апробирована при проектировании аналогового амплитудного тракта для детекторов международного эксперимента СВМ.

### Маршрут проектирования многоканальных микросхем считывания

Для сокращения времени проектирования при разработке аналого-цифровых многоканальных микросхем считывания, а также с целью моделирования микросхемы на структурном уровне, на основе предложенной модели аналогового тракта была разработана модель, описанная на языке VerilogA. Использование этой модели позволило усовершенствовать маршрут проектирования многоканальных интегральных микросхем считывания. Основные этапы разработанного маршрута показаны на рис. 8.



Рис. 8. Маршрут проектирования многоканальных микросхем считывания

затруднено как в силу большой сложности микросхемы и соответственно большого времени необходимого на моделирование, так и в силу того, что при использовании заказных IP блоков и стандартных цифровых библиотек, их топологическое представление, как правило, не предоставляется производителем.

Отличием данного маршрута проектирования от известных, является использование разработанной автором модели аналогового тракта на этапе структурного проектирования, а также для замены части каналов при моделировании полномасштабной многоканальной структуры на этапе схемотехнического проектирования. Моделирование на структурном уровне позволяет избежать возможных ошибок на ранних этапах проектирования микросхемы. Моделирование многоканальной структуры с заменой схемотехнического описания аналогового тракта на описание, выполненное на VerilogA, позволяет существенно сократить время моделирования (не менее чем в 8 раз).

Обычно моделирование экстрактированной схемы проводится только для одного аналогового канала, что не дает достаточного представления о работе многоканальной структуры. В работе приведены результаты сравнения моделирования многоканальной экстрактированной топологии с многоканальным схемотехническим представлением и экстрактированной топологией одного канала. Полученные результаты подтверждают необходимость проведения этого этапа при проектировании многоканальных микросхем считывания. Моделирование экстрактированной схемы полного чипа зачастую



## Реализация микросхем считывания информации с детекторов

С использованием предложенных методики и маршрута был разработан и изготовлен ряд микросхем для считывания сигналов детекторов физических экспериментов.

Для задач эксперимента Роскосмоса «Нуклон» была разработана специализированная интегральная микросхема съема и обработки информации микрополосковых детекторов. Микросхема была разработана по 0,35 мкм КМОП технологии компании AMIS (OnSemi), занимаемая площадь на кристалле составляет  $4,0 \times 4,0 \text{ мм}^2$  (см. рис. 9).

Микросхема имеет аналоговую и цифровую части. Аналоговая часть состоит из 32-х рабочих каналов считывания сигналов и двух тестовых, расположенных у краев кристалла для снижения технологического разброса параметров основных каналов и имеющих идентичную основным каналам структуру. Микросхема отличается широким динамическим диапазоном – от единиц фКл до 100 пКл. Указанный динамический диапазон был достигнут разделением динамического диапазона предусилителя на два поддиапазона. Точка перелома передаточной характеристики находится при значении входного заряда около 3 пКл. Это, с одной стороны, позволяет в области малых амплитуд обеспечить более высокий наклон передаточной характеристики и достичь лучшего отношения сигнал/шум, а с другой – в области больших сигналов обеспечить меньший наклон и тем самым расширить динамический диапазон «сверху» до 100 пКл. Экспериментальная передаточная характеристика предусилителя показана на рис. 10.

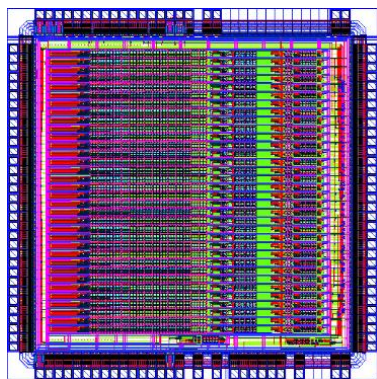


Рис. 9. Топология интегральной микросхемы Нуклон

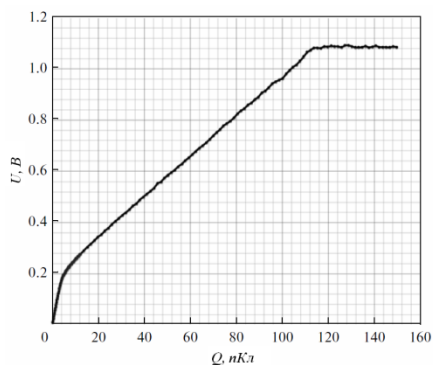


Рис. 10. Передаточная характеристика 32У микросхемы Нуклон

Для эксперимента СВМ, были разработаны и изготовлены две микросхемы считывания сигналов трековой системы и мюонной камеры, с исполь-

зованием КМОП технологии компании UMC с проектными нормами 0,18 мкм.

Кремниевая трековая система является одной из ключевых в эксперименте СВМ. Степень интеграции трековой системы весьма высока (детекторы содержат 1,5 млн. каналов), что диктует жесткие требования по потребляемой мощности – не более 1-2 мВт на один канал. Для решения задач съема информации с кремниевых микрополосковых детекторов, ее предварительной обработки и формирования временной привязки данных к глобальному времени сбора был разработан прототип 128-канальной микросхемы.

Разработанная микросхема содержит 24 аналоговых канала съема информации, систему дерандомизации (упорядочивания потока данных) с архитектурой  $128 \rightarrow 16$  (128 входов и 16 выходов), массив 16 пиковых детекторов и АЦП. Топология микросхемы приведена на рис.11.

Для детекторов мюонной системы (MUCH) эксперимента СВМ была разработана многоканальная интегральная микросхема, содержащая в себе 10 каналов съема и предварительной обработки информации. Топология микросхемы показана на рис. 12.

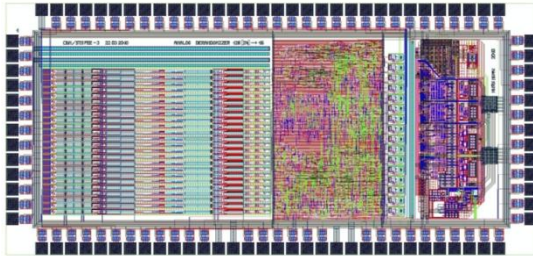


Рис. 11. Топология микросхемы для трековой системы эксперимента СВМ

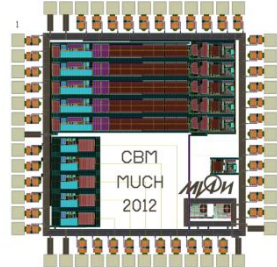


Рис. 12. Топология микросхемы для СВМ MUCH

В рамках работ по созданию электроники для интеллектуального датчика давления была разработана и изготовлена специализированная интегральная микросхема. В рамках этой работы были разработаны и апробированы электронные узлы, которые могут быть применены при построении считывающей электроники физического эксперимента, в том числе аналогового амплитудного тракта (фильтры). Микросхема была разработана и изготовлена по Би-КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм, австрийской компании AMS.

В таблице 1 приведено сравнение разработанных микросхем с известными аналогами по ряду ключевых параметров. Из таблицы видно, что раз-

работанные микросхемы не уступают по совокупности характеристик зарубежным аналогам, и в первую очередь по потребляемой мощности.

Таблица 1

Наименование	VA32HDR14	Нуклон	SVX4	Beetle	СВМ MUCH
Число каналов	32	32	128	128	10
Технология	КМОП 0,35 мкм	КМОП 0,35 мкм	КМОП 0,25 мкм	КМОП 0,25 мкм	КМОП 0,18 мкм
Коэффициент усиления, не менее мВ/фКл	0,05	0,14 – для малых сигналов 0,02 – для больших сигналов	5	5	5
Динамический диапазон, не менее пКл	25	100	0,2	2	0,1
Эквивалентный шумовой заряд, электрон, не более	3700	8500	2000	1400	1000
Потребляемая мощность, не более мВт/канал	2,0	2,0	3,0	6,0	2,0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основной результат** диссертации заключается в решении актуальной задачи развития теории и создании методики проектирования аналоговых амплитудных трактов, нацеленной на снижение потребляемой мощности многоканальных микросхем считывания сигналов микрополосковых детекторов, и разработку на этой основе ряда интегральных микросхем считывания, удовлетворяющих современным требованиям к электронной компонентной базе физического эксперимента.

### Основной научный результат

Предложена методика проектирования аналоговых амплитудных трактов считывающих микросхем, нацеленная на минимизацию потребляемой мощности микросхем считывания и учитывающая требования современного физического эксперимента. Методика направлена на оптимизацию параметров аналогового тракта по шуму, потребляемой мощности, коэффициенту усиления и другим важным параметрам.

Использование данной методики наряду с разработанным маршрутом проектирования интегральных микросхем считывания позволяет существенно сократить время на проектирование интегральных микросхем и улучшить их качество.

### **Частные научные результаты**

1. Разработана модель аналогового амплитудного тракта, учитывающая комплекс параметров предусилителя и усилителя-формирователя. Получены аналитические выражения, связывающие наиболее важные характеристики аналогового тракта между собой и с параметрами ТЗ.

2. Предложена целевая функции для оптимизации параметров аналогового тракта по энергопотреблению.

3. Разработана высокоуровневая модель аналогового тракта, описанная на языке VerilogA, позволяющая сократить время моделирования аналогового тракта не менее чем в 8 раз.

4. Разработана методика проектирования аналоговых амплитудных трактов микросхем считывания, нацеленная на достижение компромиссных по совокупности характеристик электронных узлов и позволяющая, в частности, снизить потребляемую мощность проектируемого аналогового тракта.

5. Разработан маршрут проектирования специализированных микросхем, позволяющий снизить время, затрачиваемое на моделирование многоканальной структуры, за счет использования разработанной высокоуровневой модели аналогового тракта и учитывающий особенности проектирования многоканальных микросхем считывания.

### **Основной практический результат**

На основе предложенной методики и маршрута проектирования разработаны и изготовлены, по современным КМОП технологиям с проектными нормами 0,18 мкм и 0,35 мкм, специализированные многоканальные микросхемы для считывания сигналов микрополосковых кремниевых детекторов. Разработанные микросхемы являются уникальными в своем классе отечественными разработками и не уступают по совокупности характеристик зарубежным аналогам.

### **Частные практические результаты**

1. Разработана схемотехническая библиотека электронных узлов, использованная при проектировании многоканальных микросхем считывания для международного эксперимента СВМ.

2. Разработаны схемотехнические решения и выполнено топологическое проектирование 12-разрядного и 14-разрядного цифро-аналоговых преобразователей, по технологии компании AMS (Австрия) с проектными нормами 0,35 мкм. Данные решения были использованы при проектировании специализированной микросхемы для датчика давления, что подтверждено актом о внедрении.

3. Разработанный маршрут проектирования и методика оптимизации параметров аналогового канала применены при создании 32-канальной специализированной микросхемы считывания сигналов микрополосковых детекторов эксперимента «Нуклон» агентства «Роскосмос», что подтверждено актом о внедрении. Получено свидетельство о регистрации топологии № 2010630090.

4. В рамках работы по диссертации произведена модернизация инфраструктуры лаборатории микроэлектронных САПР кафедры Электроники НИЯУ МИФИ и разработаны новые лабораторные работы по курсу «Теоретические основы специальности» специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок».

5. Подготовлен и издан сборник лабораторных работ: Основы проектирования узлов аналоговых интегральных микросхем: Лабораторный практикум / Э. В. Аткин, В. В. Шумихин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 84 с.

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

- 1. Аткин Э.В., Клюев А.Д., Силаев А.С., Шумихин В.В. и др. Специализированная интегральная микросхема съема и обработки информации микрополосковых детекторов // Микроэлектроника – 2011, №1, С. 57-63**
- 2. Аткин Э.В., Семенов Д.Ю., Шумихин В.В. Цифро-аналоговый преобразователь в интегральном исполнении // Естественные и технические науки – 2010, №4, С. 300-303**
- 3. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г., Шумихин В.В. и др. Испытание 32-канальной интегральной микросхемы для регистрации сигналов кремниевых детекторов // Приборы и техника эксперимента – 2012, №4, С. 43-48**
4. Шумихин В.В. Развитие методологии проектирования сложно-функциональных узлов многоканальных микросхем для съема и обработки информации с микрополосковых детекторов // 7-я Курчатовская молодежная научная школа. Сборник аннотаций работ. С. 167

5. Шумихин В.В. Развитие методики проектирования аналого-цифровых СБИС с учетом паразитных элементов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1. Ядерная физика и энергетика. М.: НИЯУ МИФИ, 2010, С. 155
6. Аткин Э.В., Гармаш А.А., Ключев А.Д., Семенов Д.Ю., Шумихин В.В. Развитие вычислительной сети университета по проектированию интегральных микросхем для задач атомной отрасли // Научная сессия МИФИ – 2009. Сб. научн. трудов. Т.2.- М.: НИЯУ МИФИ, 2009, С. 115
7. Atkin E., Volkov Yu., Garmash A., Semenov D., Shumikhin V. Development of the university computing network for integrated circuit design // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium 2009. Moscow, Russia. P. 221
8. Atkin E., Volkov Yu., Klyuev A., Shumikhin V. Development of the data-driven readout ASIC for microstrip detectors // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium 2010. St. Petersburg, Russia. P. 374
9. Atkin E., Klyuev A., Shumikhin V. Data-driven ASIC for Multichannel Sensors // World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, P.176-179
10. Аткин Э.В., Шумихин В.В. Основы проектирования узлов аналоговых интегральных микросхем: Лабораторный практикум. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 84 с.

#### **Свидетельства о государственной регистрации топологии ИМС**

1. Аткин Э.В., Бочаров Ю.Б., Бутузов В.А., Шумихин В.В. и др. Специализированная интегральная микросхема для датчика давления // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС №2012630037 от 7 марта 2012 г.
2. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г., Шумихин В.В. и др. Тридцати двух канальная специализированная интегральная микросхема для проекта «Нуклон» федерального космического агентства Роскосмос // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС №2010630090 от 8 сентября 2010 г.