

На правах рукописи



**Глухов Александр Викторович**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МИКРОСХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(промышленность)

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированного проектирования» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ)

Научный руководитель – **Сединин Валерий Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» СибГУТИ, г. Новосибирск

Официальные оппоненты – **Жигалов Илья Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и программная инженерия» ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир

**Янишевская Анна Генриховна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ФГБОУ ВПО Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2013 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.025.01 при ВлГУ по адресу: г. Владимир, ул. Горького, 87, ауд. 335-1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу университета: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.025.01

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., доцент



Н. Н. Давыдов

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.**

Сложность решения схемотехнических, конструкторских и технологических задач подготовки производства интегральных микросхем (ИМС) заключается в том, что при бурном развитии микро- и наноэлектроники значительно возросла плотность компоновки элементов на кристалле. При этом возрастает влияние помех за счёт ёмкостных связей, сопротивлений шин питания (земли) и индуктивностей проводов на физические процессы в ИМС. Итерационные процессы проектирования, связанные с варьированием электрических характеристик компонентов ИМС на схемотехническом уровне и анализом проектных решений на заключительном этапе верификации с учётом названных эффектов, значительно увеличивает время проектирования и, следовательно, стоимость изделий. Возникает необходимость в создании новой методологии автоматизированного проектирования с интеграцией системного, логического, схемотехнического и топологического уровней, которая позволит существенно сократить временные и финансовые затраты на разработку большинства ИМС, повышая точность расчётов и сокращая объём экспериментальных исследований. Продуктивное использование современного прикладного программного обеспечения позволяет быстро и адекватно моделировать физические процессы, протекающие в ИМС, оптимизировать схемотехнические и топологические решения, проверять их работоспособность при внешних воздействиях и вариациях технологических параметров на нижних уровнях проектирования.

Процесс проектирования ИМС является многоуровневым и каждый уровень требует своего математического аппарата для моделирования и анализа. Эти функции обеспечиваются соответствующими программными продуктами, такими как OrCAD, MAX+PLUS II, MATLAB, TCAD и т.д. Однако, при использовании названных программных средств возникают проблемы, связанные с отсутствием достоверных SPICE-моделей отечественных полупроводниковых приборов и ограниченности средств тестирования полученных ИМС. Для решения этих проблем необходима разработка моделей отечественных полупроводниковых компонентов, тестирующих алгоритмов и программ для создания систем автоматизации проектирования и технологической подготовки производства (САПР и АСТПП), что служит основой производства современных ИМС.

Большой вклад в формирование и развитие САПР ИМС внесли отечественные учёные: И.П. Норенков, В.А. Трапезников, В.Н. Ланцов, А.В. Костров, И.Е. Жигалов и др. Вместе с тем, ряд вопросов связанных с оценкой эксплуатационных характеристик, отладкой производственных цепочек и прогнозированием скрытых дефектов ИМС не достаточно глубоко исследованы и являются предметом постоянного внимания схемотехников, конструкторов, технологов. Требуется интеграция уровней проектирования (логического, схемотехнического и топологического), создание АСТПП с расширением числа контролируемых параметров. Это особенно важно для ИМС, работающих в условиях специальных воздействий. Поэтому разработка маршрута проектирования ИМС (на примере микросхемы двухполярного преобразователя напряжения постоянного тока) предусматривает создание совокупности математических и

имитационных моделей для исследования динамических характеристик ИМС при вариации параметров КМОП- транзисторов, включая топологию.

Снижение энергоёмкости, обеспечение надёжности и бездефектности функциональных узлов ИМС являются сложными задачами, а процесс их производства требует постоянного совершенствования. Из-за высокой функциональной сложности решение этих задач возможно только посредством использования САПР и АСТПП на основе мощной вычислительной базы. Таким образом, рациональное сочетание математического, имитационного и приборно-технологического моделирования позволит максимально достоверно оценить технико-экономические характеристики и надёжность ИМС для решения производственной проблемы – сохранение высокого процента выхода годной продукции при уменьшении топологических размеров и повышении сложности изделий, а также сократить время на запуск в производство посредством предварительной оптимизации топологии и отладки технологических процессов.

**Объектом исследования** являются проектные и технологические процессы подготовки к серийному производству интегральных микросхем преобразователей напряжения постоянного тока.

**Предметом исследования** являются модели и алгоритмы автоматизации проектирования интегральных микросхем преобразователей напряжения постоянного тока.

**Цели и задачи.** Основной целью настоящей работы является разработка моделей и алгоритмов автоматизированного проектирования микросхем двухполярных преобразователей напряжения постоянного тока, обеспечивающих повышение энергетических, технико-экономических показателей и надёжности.

В соответствие с поставленной целью в диссертационном исследовании были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современных программных средств автоматизированного проектирования ИМС и сделан вывод о необходимости разработки САПР и АСТПП.

2. Созданы математические модели для функционального описания структур преобразователей напряжения постоянного тока (ППН).

3. Разработаны имитационные модели для анализа динамических процессов в ППН при внешних воздействиях на схемотехническом уровне с учётом топологии и особенностей технологии.

4. Разработана подсистема моделирования характеристик функциональных блоков ИМС и алгоритм структурно – параметрического синтеза для повышения энергетических, технико-экономических показателей и надёжности.

5. Разработана АСТПП, включающая алгоритм автоматизированного проектирования топологии микросхем ППН в среде TCAD с применением новой технологии формирования КМОП транзисторов «карман в кармане» и методику проведения испытаний с оптимальным набором контролируемых

параметров для выявления скрытых дефектов в процессе производства посредством приборно-технологического моделирования.

**Научная новизна.** На основании выполненных соискателем исследований: *разработаны* имитационные, приборно-технологические модели, алгоритмы автоматизированного схемотехнического, конструкторско-технологического проектирования и программно-технические средства, позволяющие повысить технико-экономические показатели и надёжность микросхем;

*предложен* новый метод автоматизированного проектирования топологии микросхем преобразователей в среде TCAD с применением новой технологии формирования КМОП транзисторов «карман в кармане»; новый метод конструкторско-технологического проектирования с применением программно-технических средства, позволяющий прогнозировать возможные скрытые дефекты на верхних уровнях проектирования микросхем;

*доказана* возможность применения разработанной САПР при проектировании преобразователей напряжения постоянного тока и других устройств функциональной микроэлектроники при серийном производстве;

*введён* учёт физических характеристик микросхем на более раннем, системном уровне в маршруте проектирования и тесты для диагностики скрытых дефектов на уровне топологического проектирования.

**Теоретическая и практическая значимость работы** обоснована тем, что:

*доказана* перспективность развития и внедрения автоматизированного проектирования на основе схемотехнического, конструкторско-технологического проектирования и программно-технические средства интегральных микросхем с учётом статических и динамических режимов работы и расширенным числом контролируемых параметров;

*применительно к проблематике диссертации результативно использованы* современные достижения в области автоматизированного проектирования электронных устройств, математическое программирование и компьютерные технологии, методология системного подхода с использованием теории нелинейных электрических цепей, теории автоматического регулирования, методов системного анализа и структурно-параметрической оптимизации, имитационное схемотехническое моделирование и приборно-технологическое с использованием современных программных продуктов;

*изложен* маршрут изготовления интегральных микросхем преобразователей напряжения постоянного тока; последовательность проектных процедур структурно-параметрического синтеза и анализа динамических характеристик микросхем; последовательность проведения граничных испытаний микросхем; раскрыты особенности решения проблемы снижения энергоёмкости, обеспечения надёжности и бездефектности функциональных узлов интегральных схем в процессе автоматизированного проектирования;

*изучены* подходы и методы создания имитационных моделей, тестирования посредством экспериментальных измерений, создания сценариев проведе-

ния анализа с учётом особенностей предложенного метода автоматизированного проектирования;

*проведена модернизация SPICE-моделей для производства отечественных полупроводниковых приборов, алгоритмов анализа в динамических режимах работы и тестов для контроля скрытых дефектов.*

**Методология и методы исследования.** В работе использованы современные достижения в области САПР устройств микроэлектроники, математическое программирование и компьютерные технологии. Общей методологической основой является системный подход с использованием теории нелинейных электрических цепей, теории автоматического регулирования, методов системного анализа и структурно-параметрической оптимизации. Схемотехническое моделирование проведено с использованием программных продуктов OrCAD, MATLAB, MULTISIM 10, а приборно-технологическое – посредством пакета TCAD Sentaurus.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ организации технологического маршрута изготовления ИМС преобразователя напряжения постоянного тока, позволяющего совершенствовать параметры и характеристики получаемых интегральных микросхем.
2. Математические и имитационные модели ИМС ППН для анализа физических процессов в переходных, динамических режимах и параметризации преобразователей.
3. Алгоритм автоматизированного технологического проектирования ИМС в среде TCAD Sentaurus, включающий новую технологию «карман в кармане» формирования КМОП транзисторов.
4. Алгоритм проведения граничных испытаний преобразователей напряжения постоянного тока для выявления возможных дефектов на верхних уровнях проектирования и результаты их тестирования посредством САПР.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных положений и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата при проведении исследований и совпадением результатов имитационного моделирования с данными натурных испытаний преобразователей напряжения постоянного тока. Результаты диссертации были использованы в хоздоговорных работах на «Новосибирском заводе полупроводниковых приборов с ОКБ» («НЗПП с ОКБ»): «Разработка базовой технологии создания унифицированных электронных модулей – защитных устройств РЭА от перенапряжений в сетях электропитания» (отчет по ОКР «Защита-ВК», № гос. рег. У90540, 2009 г., «Разработка базовой технологии создания радиационно-стойкого, высоконадежного сверхстабильного, аттестуемого прецизионного стабилизатора» (отчет по ОКР «Союз»), № гос. рег. У91737, 2011 г., «Разработка базовой технологии создания многофункциональных сетевых защитных устройств на основе модулей полупроводниковых ограничителей напряжения высокой импульсной мощности до 150 кВт и специализированных микросхем» (отчет по ОКР «Нож 2»), № гос. рег. У92098, 2011 г., «Разработка базовой технологии создания

серии модулей полупроводниковых ограничителей напряжения для защиты от сетевых помех средств электропитания и преобразователей электроэнергии» (отчет по ОКР «Серия ПОН»), № гос. рег. У920097, 2011 г., «Разработка и освоение производства радиационно-стойкой микросхемы двухполярного DC-DC преобразователя» (отчет по ОКР «Питание 4»), № гос. рег. У92378, 2012 г.

В диссертации приведены акты внедрения результатов работы:

Научно-производственное предприятие «Восток», г. Новосибирск по разработке и освоению производства ИМС регистрового ЗУ на КМДП-структурах;

«Научно - исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск по разработке основ конструкции и базовой технологии КМОП микросхемы интерфейса управления СВЧ модулями, а также интегрального драйвера светодиодов с управлением по среднему току;

«НЗПП с ОКБ», г. Новосибирск по разработке и освоению производства радиационно-стойкой микросхемы двухполярного DC-DC преобразователя, а также по разработке технологии изготовления конструкции квадратурного модулятора-преобразователя.

Результаты, полученные в работе на разных этапах её выполнения, докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-технической конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта», Москва, 2013;

- Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2012;

- Российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 2008, 2011;

- Межотраслевой научно-практической конференции, организованной Ассоциацией «Электропитание», Москва, 2011 и Санкт-Петербург, 2012.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 20 печатных работах (из них 3 патента, 4 заявки на изобретения), 4 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Работа содержит 186 страниц машинописного текста из них 8 страниц приложений, 114 рисунков, 10 таблиц и 150 наименований используемых литературных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна работы и практическая значимость результатов. Приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Средства автоматизации проектирования ИМС ППН» проведён анализ программ схемотехнического моделирования, который показал, что существует проблема их использования, связанная с отсутствием достоверных SPICE-моделей отечественных полупроводниковых приборов и огра-

ниченности средств тестирования ИМС. Для решения этой проблемы необходима разработка моделей современных отечественных компонентов и устройств на их основе для запуска производства современных ИМС ППН. При этом можно использовать зарубежные аналоги, которые включены в библиотеки программ, а также справочные и/или экспериментальные данные с помощью одной из программ Parts (пакет PSPICE), Model (система Micro-CAP), PSPICE Model Editor (система OrCAD 9.x) и т.п. Для повышения технико-экономических показателей и минимизации площади кристалла ИМС ППН необходима разработка технологического маршрута изготовления КМОП-транзисторов с учётом специфики производства. Рациональное сочетание имитационного и приборно-технологического моделирования максимально достоверно определяет технические характеристики ИМС ППН, что позволит решить производственную проблему – сохранение высокого процента выхода готовой продукции при уменьшении геометрических размеров и повышении сложности изделий, а также сократить время на запуск в производство посредством предварительной оптимизации конструкции и отладки технологических процессов.

**Во второй главе** «Автоматизированное проектирование ИМС ППН» сформирована последовательность процедур на маршруте проектирования ИМС ППН, представленном на рисунке 1.

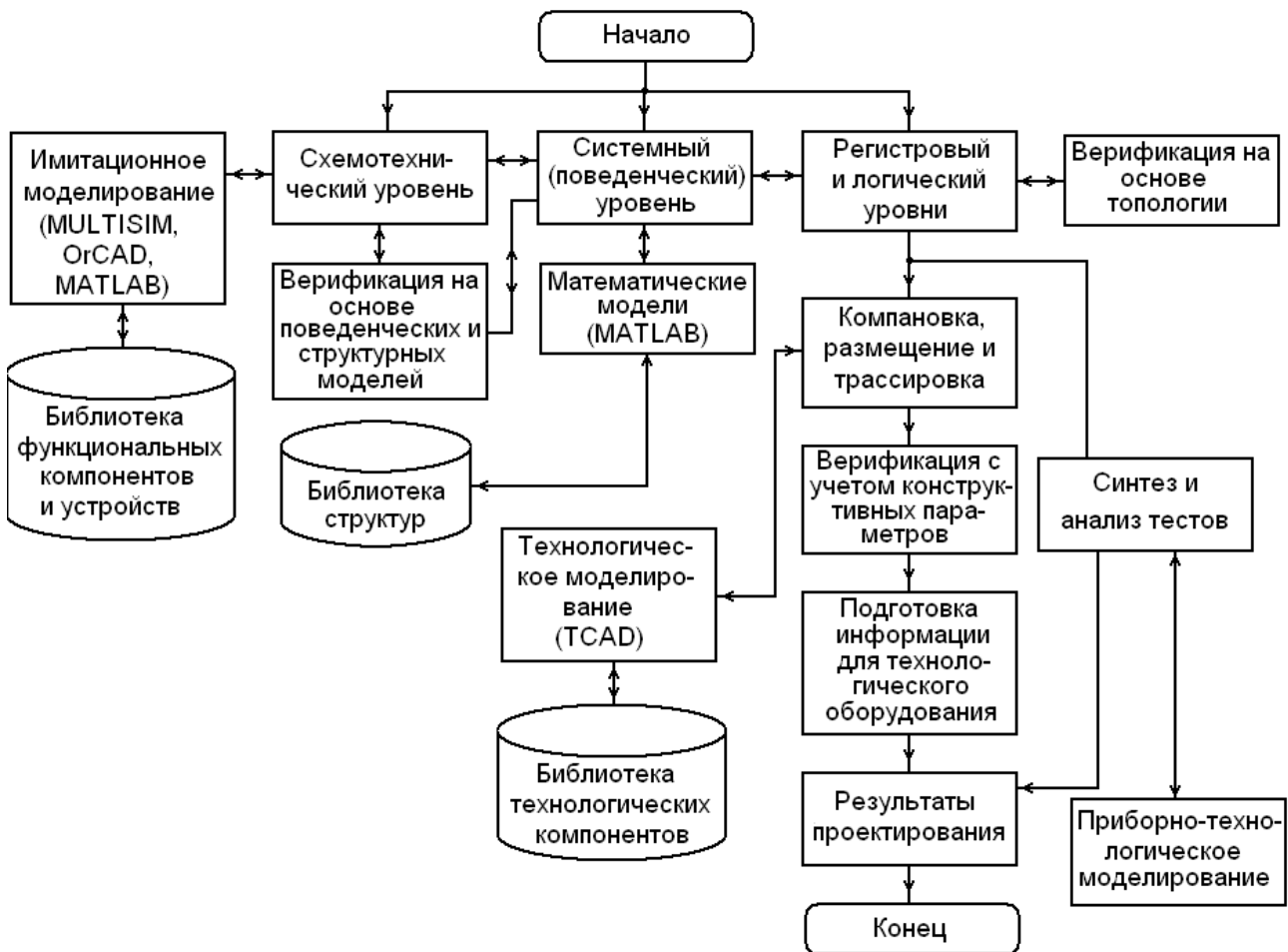
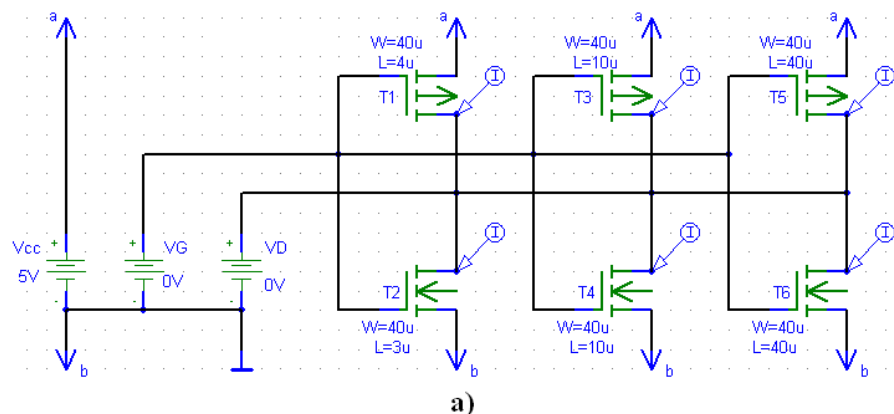


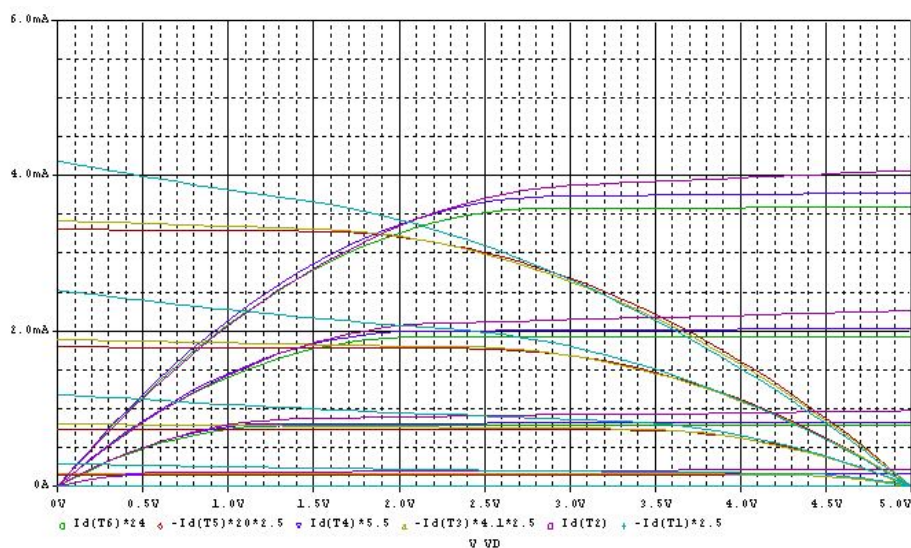
Рисунок 1– Маршрут проектирования ИМС ППН



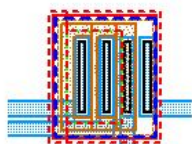
Типовой маршрут проектирования ИМС предусматривает последовательное перемещение по уровням (системный, регистровый, логический, схемотехнический и компонентный), где верификация динамических параметров схемы с учётом задержек в соединениях выбранного проектного решения выполняется на заключительном этапе. Во время циклического процесса проектирования приходится выполнять дополнительные итерации, что значительно удлиняет время разработки в случае, когда быстродействие схемы оказывается неудовлетворительным. Во избежание этого, в предлагаемом маршруте автоматизированного проектирования физические характеристики учитываются на более ранних этапах. На системном уровне ориентировочно определяется взаимное расположение блоков структурной схемы на кристалле и внешних выводов блоков, что позволяет оценивать длины связей и задержки при передаче данных уже на ранних стадиях разработки ИМС ППН.

Таким образом, на логическом уровне структурного синтеза удастся получить не только работоспособное решение, но и достичь оптимального удовлетворения требований к быстродействию, рассеиваемой мощности, площади кристалла и тестируемости схемы. Для эффективности формализации процедур структурного синтеза использовались специализированные программы OrCAD, MATLAB и MULTISIM 10, позволяющие имитировать и динамические режимы работы. Оценка параметров синтезированных схем и проверка их работоспособности выполнялась анализом функциональных и логических схем посредством программ моделирования, которые ориентированы на системный, регистровый или логический уровни. Математическое обеспечение для схемотехнического анализа включает в себя методы формирования математических моделей схем в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и методы численного интегрирования нелинейных уравнений, которые составляются на основе моделей электронных компонентов (рисунок 2 а). Выбор оптимальных моделей транзисторов проводился в соответствии с вольт-амперными характеристиками КМОП-структур (рисунок 2 б) с разными топологиями (ширина канала- $W$ , длина канала- $L$ ). Пределы варьирования размеров транзисторов определялись спецификой технологии производства. На рисунках 2в,г представлены две базовые модели из разработанного ряда: линейная конфигурация затвора  $W=40$  мкм,  $L=3$  мкм и длинно-канальный транзистор с  $W=5$  мкм,  $L=100$  мкм.

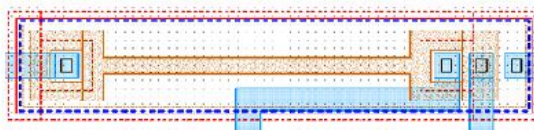




б)



в)



г)

Рисунок 2 – Модели КМОП-транзисторов:

а) схема моделирования КМОП-транзисторов в OrCAD; б) ВАХ р- и n-канальных МОП-транзисторов; в) линейная конфигурация затвора; г) длинно-канальный транзистор линейной конфигурации

Предложенные модели различных конфигураций КМОП-транзисторов позволят провести параметризацию ИМС ППН с целью минимизации площади, занимаемой на кристалле, улучшения технических характеристик и повышения её надежности.

Математические модели функциональных узлов ИМС ППН представлены в виде описаний схем замещения различных структур ППН, на основании которых создана база математических моделей в среде MATLAB, позволяющая рассчитывать динамические и регулировочные характеристики. Для установившегося режима понижающего ППН изменение тока индуктивности  $L1$  определяется выражением (1):

$$\Delta I_{L1} = I_{L1\max} - I_{L1\min} = \frac{(U_{IN} - U_{OUT1})t_{OPEN1}}{L1} = \frac{U_{OUT1}(T - t_{OPEN1})}{L1}, \quad (1)$$

где  $t_{OPEN1}$  – интервал открытого состояния транзисторного ключа VT1,

$I_{L1\max}$  ( $I_{L1\min}$ ) – максимальные и минимальные значения тока  $I_{L1}$ .

Для инвертирующего режима (2):

$$\Delta I_L = \frac{U_{IN}t_{OPEN2}}{L2} = \frac{-U_{OUT2}(T - t_{OPEN2})}{L2}. \quad (2)$$

где  $t_{OPEN2}$  – интервал открытого состояния транзисторного ключа VT2.

Аналогия начальных участков регулировочных характеристик  $\frac{U_{OUTi}}{U_{IN}} = f(\gamma)$  ППН (рисунок 3) понижающего (кривая 1) и инвертирующего (кривая 2), а так же оптимизированных параметров коммутирующих элементов (транзисторов) позволила создать практически одинаковые модели и схемы систем управления (рисунок 4).

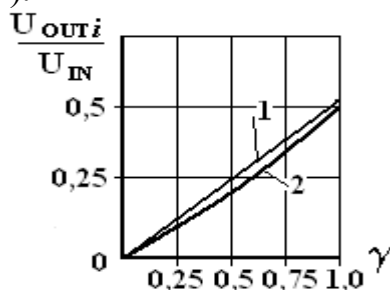
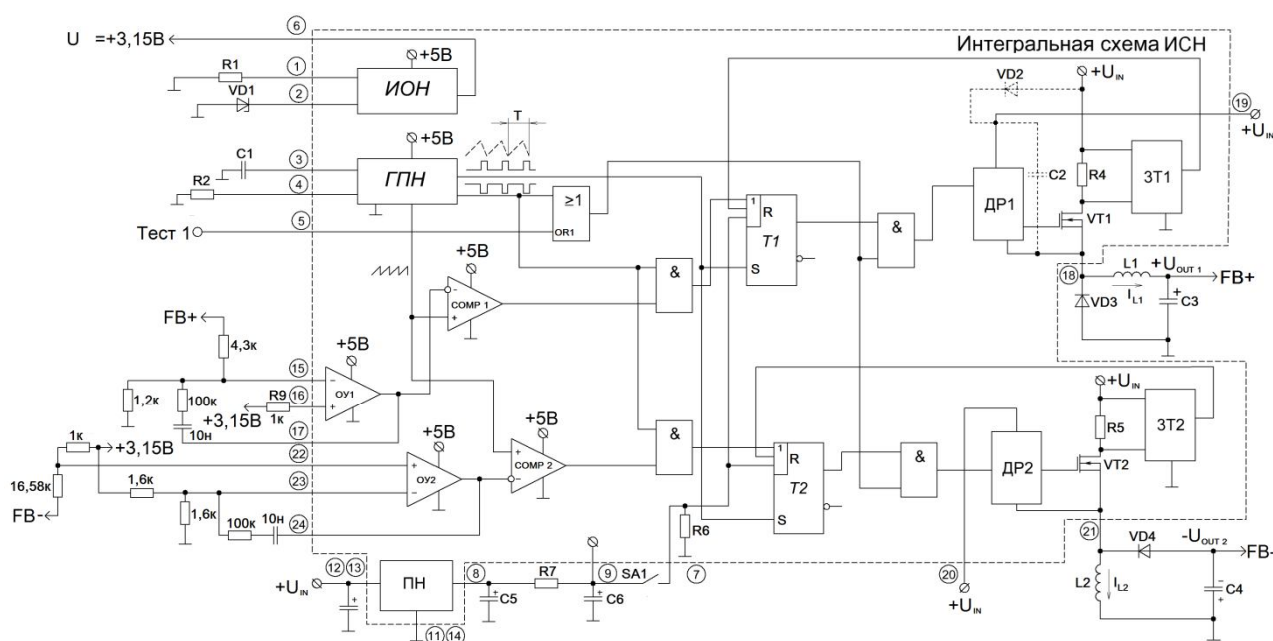


Рисунок 3– Регулировочные характеристики ППН

На основании анализа математических моделей структур ИМС ППН в среде MULTISIM 10 получено оптимальное проектное решение, объединяющее в своём составе два типа схем преобразователей (понижающего и инвертирующего), основанное на сочетании в одном кристалле двух ШИМ-модуляторов, источника опорного напряжения, систем обратной связи по току и напряжению, а также силовых МОП- транзисторов (рисунок 4). Выходы компараторов



ИОН - источник опорного напряжения;

ГПН - генератор пилообразного напряжения;

РМС - регулятор максимальной скважности;

ПН - преобразователь напряжения;

ДР1, ДР2 - драйверы управления силовыми МОП транзисторами;

3Т1, 3Т2 - защита по току;

Т1, Т2 - триггеры;

ОУ1, ОУ2 - операционные усилители;

COMP 1, COMP 2 - компараторы.

Рисунок 4 – Схема разработанного двухканального импульсного преобразователя напряжения постоянного тока

соединены со R-входами триггеров T1 и T2 для формирования автоматического регулирования выходных напряжений. На R-входах триггеров по логической связи ИЛИ объединены сигналы ограничения тока силовых транзисторов, а также логический вход, который обеспечивает перевод ИМС в ждущий режим сигналом +5В(SA1). Это позволило снизить ток потребления ИМС ППН. Питание системы управления обеспечивает микромощный преобразователь напряжения ПН, формирующий напряжение 5В. Так как температурная стабильность рабочего напряжения стабилитрона зависит от тока стабилизации, то опорное напряжение задаётся термокомпенсированным, радиационноустойчивым стабилитроном. В положительном источнике предусмотрена схема вольтодобавки для надёжного отпираания МОП-транзистора при низких напряжениях питания (18 В), которая представлена элементами C2 и VD2.

Таким образом, разработанные математические модели позволили автоматизировать процесс выбора оптимального решения на функциональном уровне, что уменьшает количество итераций в процессе проектирования. Разработанная ИМС ППН не имеет прямых отечественных и зарубежных аналогов и обладает следующими достоинствами – широким диапазоном входных напряжений (18...36 В), пониженным током потребления (18 мкА при входном напряжении 36 В) и, как следствие, более высоким коэффициентом полезного действия.

**В третьей главе** «Параметризация функциональных блоков ИМС на стадии проектирования» предложен способ параметризации элементов ИМС ППН, основанный на использовании базовых моделей пакета OrCAD, варьируемыми параметрами которых являются схемотехнические и конструкторские компоненты, соответствующие реальным тестируемым структурам. Использование базовых моделей позволяет учесть не только электрические, но и тепловые режимы работы, что обеспечит надёжное функционирование ИМС. Для реализации данного способа разработан программный блок, написанный на языке Си, который задаёт маршрут и отвечает за подключение функциональных элементов при проведении анализа, что существенно сокращает временные затраты на создание общей схемы (рисунок 5).

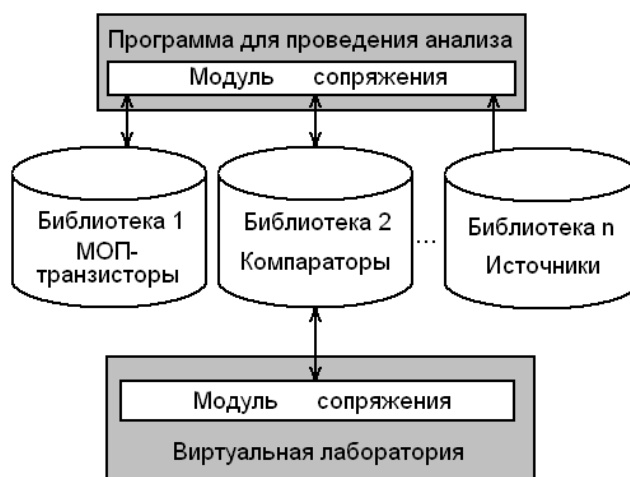


Рисунок 5 – Взаимодействие модулей при выполнении анализа

Перед началом параметризации сценарий, управляющий тестовой схемой, настраивает рабочую среду САПР, подключая необходимую библиотеку и задаёт начальные значения параметров. При подключении библиотеки МОП-транзисторов выполняется минимизация целевой функции (3)

$$F_T(V_{TO}, L, W, M) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $V_{TO}$  – пороговое напряжение,  $L$  ( $W$ ) – длина (ширина) канала,  $M$  – коэффициент лавинного умножения p-n-затворов (рисунок 2в,г). Параметры целевой функции (3) зависят от конфигурации транзистора, определяемые топологией.

Поиск локальных экстремумов целевой функции ИМС ППН при заданных граничных условиях ( $D_j$ ) производится в соответствие с выражением (4):

$$F_T = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{m_1} F_T^1 + \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{m_2} F_T^2 + \dots + \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{m_k} F_T^k \quad (4)$$

где  $n_k$  – число транзисторов  $k$ -ого узла ИМС;  $m_k$  – количество конфигураций транзистора для  $k$ -го узла;  $k$  – число узлов;  $F_T^k$  – составляющие целевой функции (3).

При параметризации функциональных узлов ИМС ППН выполняется минимизация целевой функции (5):

$$F(I_{nom}, \eta^{-1}, U_{mk}, \lambda, T_{cl}^{-1}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

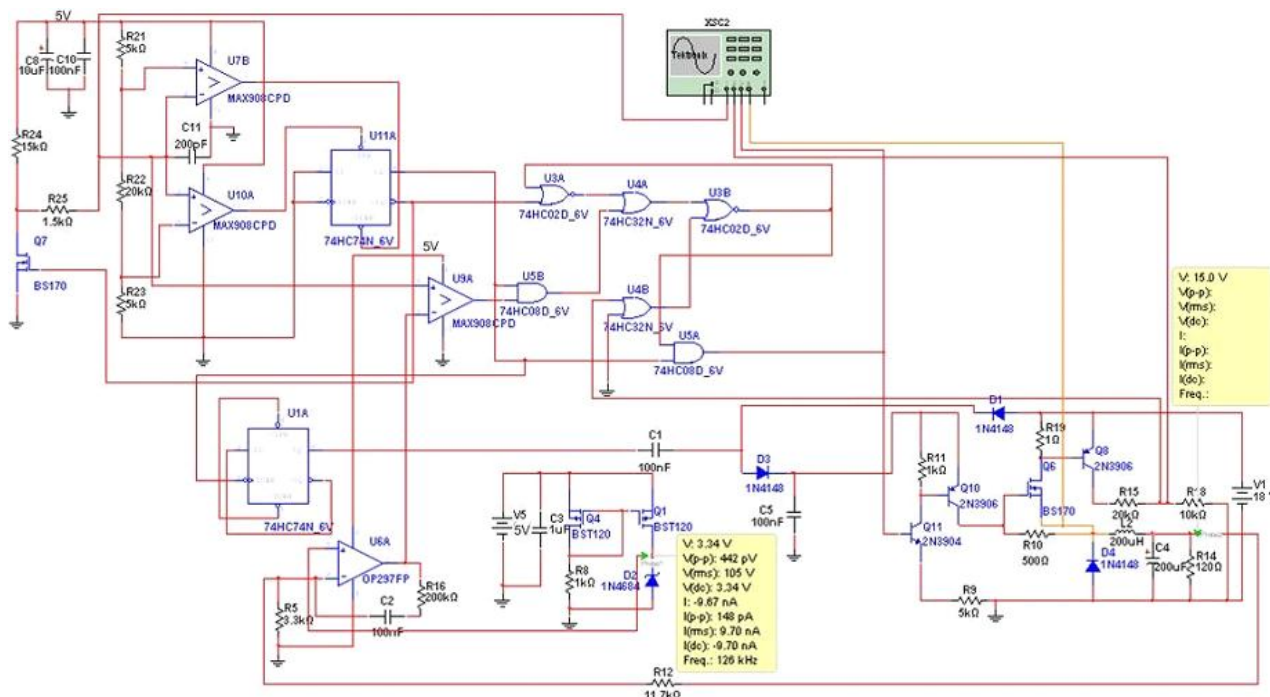
которая включает критерии оценки качества преобразования электрической энергии (потребляемый ток  $I_{nom}$ , коэффициент полезного действия  $\eta$ , действующие значения гармонических составляющих напряжения пульсаций  $U_{mk}$ ) и надёжности (интенсивность отказов  $\lambda$ , срок службы  $T_{cl}$ ). Поиск локальных экстремумов целевой функции (4) при заданных граничных условиях ( $D_j$ ) производится согласно выражению (6):

$$F = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{m_1} F^1 + \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{m_2} F^2 + \dots + \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{m_k} F^k \quad (6)$$

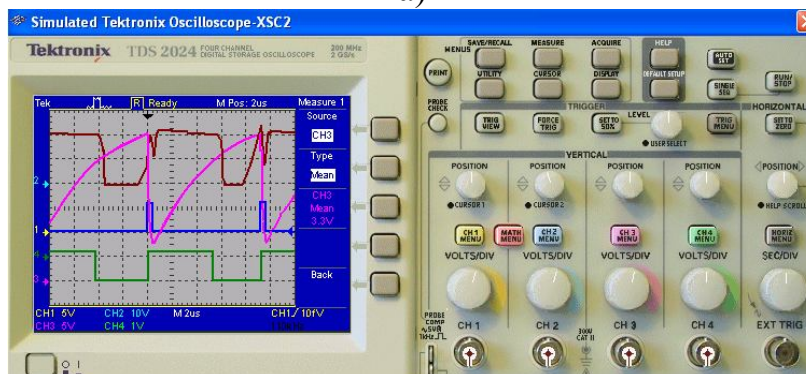
где  $n_k$  – число узлов  $k$ -ого варианта структуры ИМС ППН;  $m_k$  – количество структур для  $k$ -го узла;  $F^k$  – составляющие целевой функции (3).

Рассчитываются характеристики проектируемой ИМС ППН. Сценарий программы предусматривает изменение маршрута прохождения сигнала в схеме для каждой последующей итерации и изменение параметров исследуемого преобразователя или отдельных элементов схемы. По полученным результатам автоматически строятся графические зависимости, где отмечаются характерные точки и значения, что позволяет повысить его информативность. Разработанный алгоритм позволяет всесторонне исследовать отдельные устройства. При этом процесс оптимизации занимает относительно небольшое время, что существенно сокращает общие временные затраты на проектирование. Это позволяет работать с любыми другими аналоговыми блоками после соответствующего изменения сценария.

В результате выполнения автоматизированной структурно – параметрической оптимизации на этапе схемотехнического проектирования получены принципиальные схемы отдельных блоков ИМС. На рисунке 6 представлены электрическая схема (а) и результаты моделирования физических процессов в понижающем ППН (б).



а)



б)

Рисунок 6 –Электрическая схема модели понижающего ППН (а) и временные зависимости в контрольных точках (б)

В процессе выполнения структурно – параметрической оптимизации проводилась минимизация целевой функции (3) по выражению (4) и минимизация целевой функции (5) в соответствии с (6). Результаты представляются в виде трёхмерных гистограмм для относительных значений целевых функций. На рисунке 7 приведены результаты для ИМС ППН, где к рассмотрению приняты 14 вариантов структур, полученных в результате поиска локальных экстремумов по целевым функциям отдельных блоков ППН.

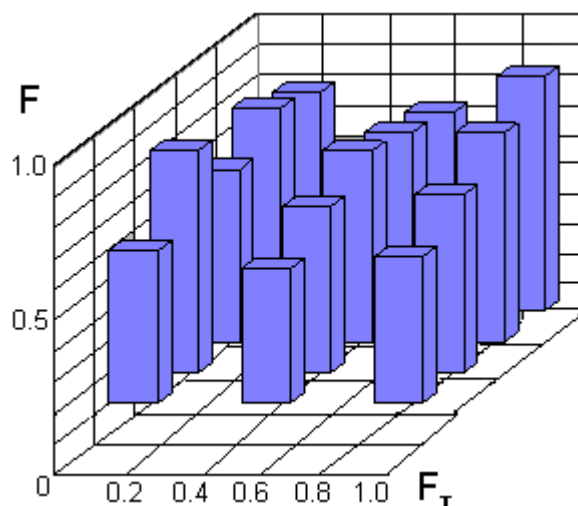


Рисунок 7 – Гистограмма поиска глобального экстремума

Минимизация целевых функций проводилась во всём рабочем диапазоне мощностей с учётом отклонений входного напряжения ( $U_{IN}$ ) для всех отобранных решений ИМС ППН (14 вариантов). В результате поиска глобального экстремума получено оптимальное решение. На рисунке 8 приведены основные зависимости: статического тока потребления  $I_{CC}$  от входного напряжения  $U_{IN}$  и температуры  $T$  (рисунок 8 а); КПД от тока нагрузки  $I_{L1}$  и входного напряжения  $U_{IN}$  (рисунок 8 б).

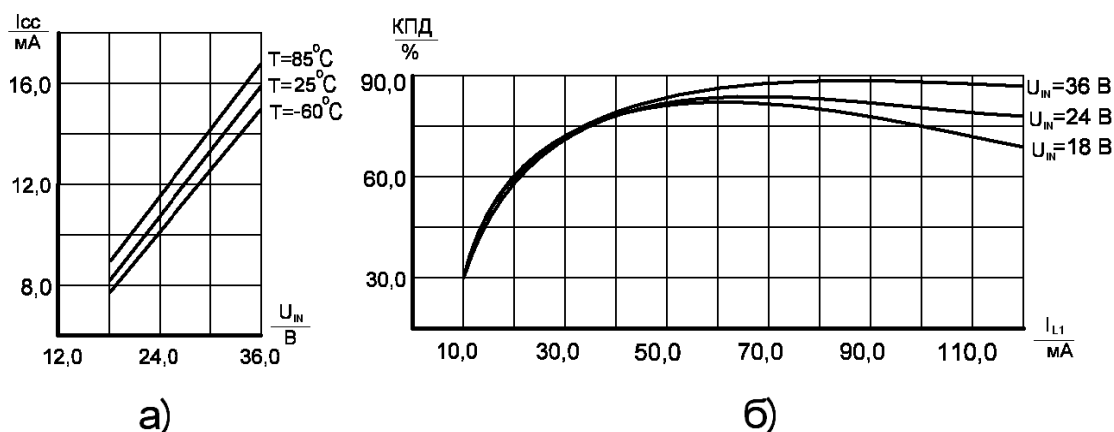


Рисунок 8 – Зависимости: статического тока потребления  $I_{CC}$  от входного напряжения  $U_{IN}$  и температуры  $T$  (а); КПД от тока нагрузки  $I_{L1}$  и входного напряжения  $U_{IN}$

Из представленных графических зависимостей следует, что основным достоинством разработанной ИМС является широкий диапазон входных напряжений, малый потребляемый ток и, как следствие, более высокий КПД.

Для повышения надёжности ИМС ППН необходимо проводить натурные испытания при различных внешних воздействиях. Разработанные имитационные модели позволяют снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации реальных устройств, а автоматизация проектирования – в короткие сроки создавать принципиальные схемы, их топологию и подготов-

ливать к производству. При разработке принципиальных схем в работе использован алгоритм функционального синтеза, приведённый на рисунке 9, где выполняется составление схем на основе существующих и созданных библиотек элементов и устройств в пакетах OrCAD и MATLAB.

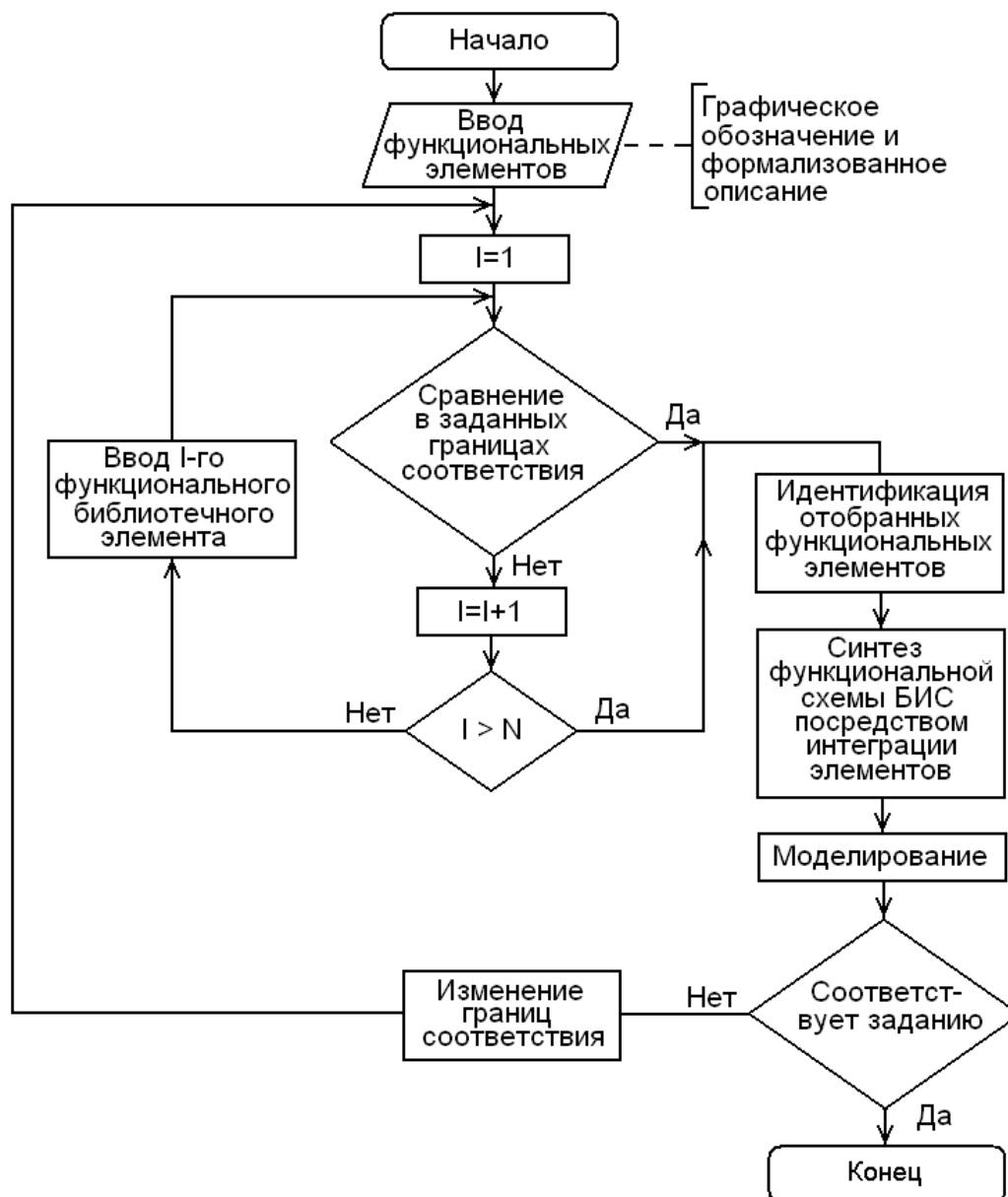


Рисунок 9 – Алгоритм функционального синтеза в среде OrCAD

Интеграция этих программ проводилась посредством интерфейса PSpice SLPS. Алгоритм предполагает локальное добавление функциональных элементов, разработанных под условия конкретной задачи. На базе представленного алгоритма разработан ряд устройств для светотехники.

На рисунке 10 приведена имитационная модель источника вторичного электропитания светодиодов с внешними подключениями.



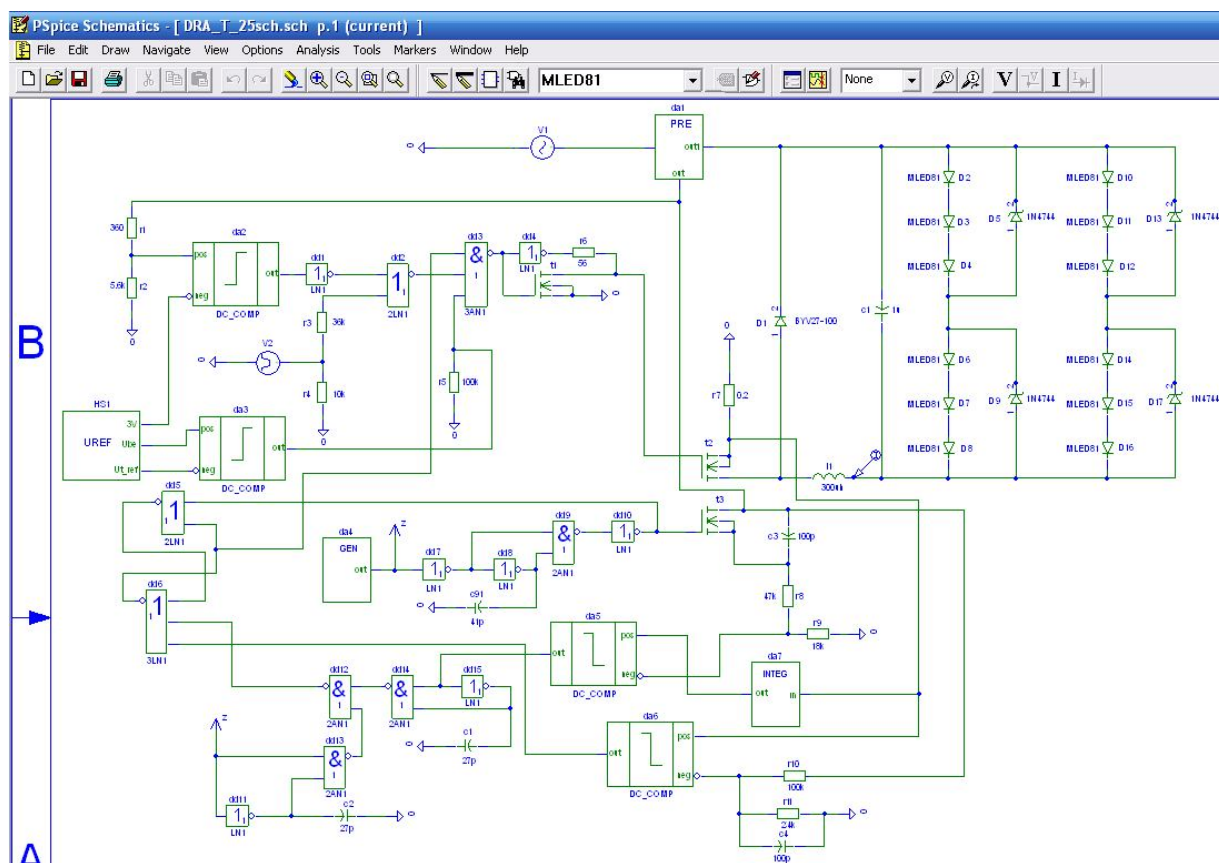


Рисунок 10 – Имитационная модель источника вторичного электропитания светодиодов

Увеличение срока службы светодиодов и повышение точности регулирования тока обеспечивается изменением длительности сигнала управления на затворах транзисторов T1, T2, поступающего с выхода схемы совпадений DD3, на один из входов которой поступают прямоугольные импульсы с выхода RS-триггера, а на другой – сигнал «сброса» или сигнал диммирования. После запуска схемы и окончания интервала задержки, осуществляется ограничение пикового значения тока светодиодов (на уровне 750 мА). Стабилизация тока светодиодов осуществляется методом ШИМ. В компараторе DA5 происходит сравнение выходного напряжения интегратора с пилообразным напряжением и на выходе формируется ШИМ-сигнал сброса RS-триггера. В случае возникновения аномальных режимов срабатывает защита, блокируя затвор транзистора t1 сигналом с выхода DA2. Режим диммирования моделировался путём изменения сигнала источника V2.

Проверка функционирования разработанной схемы проводилась с использованием эквивалента светоизлучающего диода в виде последовательно включенных резистора и источника порогового напряжения, а также моделей светоизлучающих диодов из библиотеки OrCAD согласно алгоритму рисунка 9. На рисунке 11 демонстрируется включение устройства питания на линейную мо-

дель цепочки светодиодов с напряжением смещения 9,45 В и активным сопротивлением 1,8 Ом.

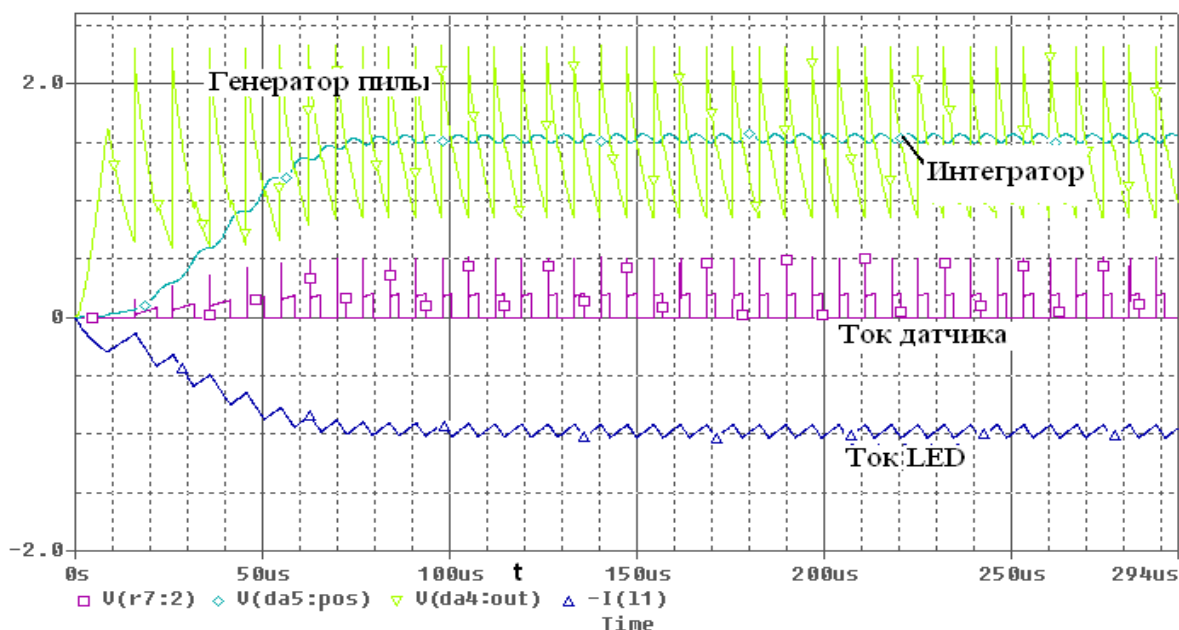


Рисунок 11 – Применение линейной модели при включении

По результатам расчёта переходных процессов в среде OrCAD (рисунок 11) и по аналогичным моделям среде MATLAB драйвера светодиодов проведена параметрическая оптимизация по следующим критериям: максимальное отклонение выходного тока от установившегося значения  $\Delta I$  и длительность переходного процесса  $\Delta t$ . В результате проведённых исследований согласно алгоритму рисунка 9 и минимизации  $F$  получено оптимальное схемотехническое решение по реализации драйвера светодиодов. Результаты проведенных исследований, показали, что ограничение максимального значения коэффициента заполнения на уровне 0,5 обеспечивает плавное нарастание тока при включении источника вторичного электропитания светодиодов, что снижает уровень перенапряжений и бросков тока, уменьшается время переходных процессов и исключается необходимость параллельного подключения ограничителей (резисторов или варисторов). Последнее приводит к повышению надёжности и результирующего КПД. Кроме того, предлагаемое устройство питания имеет высокое быстродействие, так как время срабатывания цифровых устройств исчисляется единицами наносекунд.

**В четвертой главе** «Маршруты технологического процесса изготовления ИМС ППН» разработан перспективный технологический маршрут, особенностью которого является возможность внесения коррекций в базовые операции, что позволяет совершенствовать параметры КМОП-структур и характеристики полученных ИМС. Кристаллы разработанной схемы управления изготовлены по базовой КМОП-технологии с кольцевым самосовмещённым поликремниевым затвором. Последовательность операций маршрута приведена на рисунке

12, где исходным материалом для изготовления элементов управляющей ИМС служат эпитаксиальные структуры типа

$$100 \frac{12\text{КЭФ} - 4.5}{460\text{КЭС} - 0.01(100)}$$

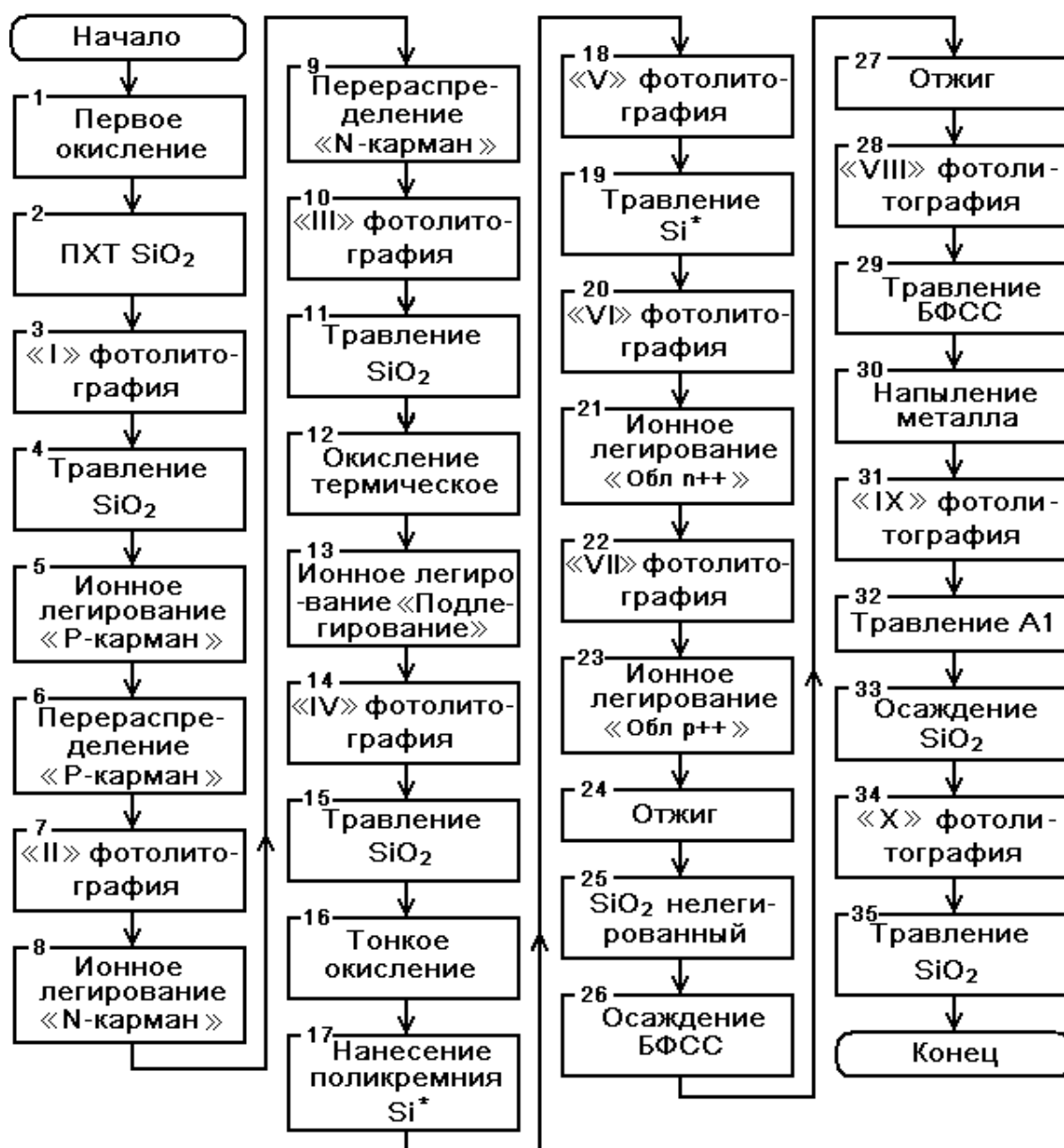


Рисунок 12 – Технологический маршрут

Одной из главнейших задач при проектировании данного технологического маршрута является внедрение технологии формирования «кармана в кармане», никогда ранее не применявшейся на предприятиях России. При разработке САПР для технологического проектирования КМОП транзисторов по новой технологии применялся пакет TCAD Sentaurus. Технологическая модель строилась по алгоритму, приведённому на рисунке 13, где параметры модели

вводятся в подсистеме SProcess. Такой подход к технологическому проектированию позволил определить важнейшие параметры топологии ИМС ППН, такие как глубины залегания  $p$ - $n$ -переходов, поверхностные концентрации активных примесей в различных областях структуры, электрофизические параметры, как отдельных областей, так и готовых элементов, входящих в состав ИМС.

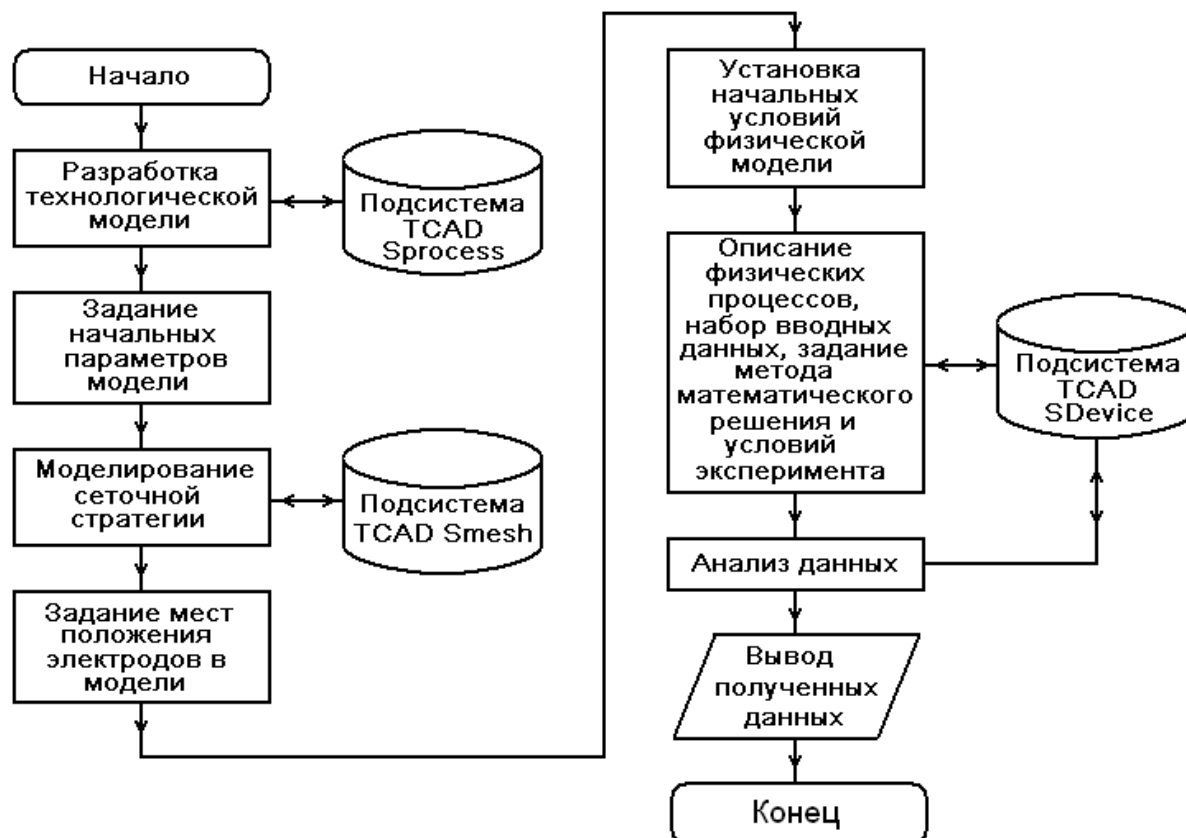


Рисунок 13 – Алгоритм технологического проектирования в среде TCAD Sentaurus

Для формирования  $p$ -канальных транзисторов, с целью обеспечения необходимых параметров схемы и сохранения параметров мощного силового транзистора предусмотрено формирование « $n$ -кармана» в « $p$ -кармане». При этом напряжение пробоя « $p$ -карман» – «подложка» должно быть не менее  $U_{пр} = 60$  В. Необходимо также обеспечить достаточную глубину залегания « $n$ -кармана», но не допустить «прошивания» границ « $p$ -кармана» (см. рисунок 14).

Результаты моделирования показали, что при формировании « $p$ -кармана», использование стандартной для КМОП технологии, дозы ионного легирования бора  $D=1,6$  мкКл/см<sup>2</sup>, при энергии легирования  $E = 40$  кэВ достаточно для обеспечения напряжения пробоя « $p$ -карман» - «подложка» более  $U_{пр} = 60$  В. Режим разгонки примеси разработан на основе стандартного для КМОП технологии режима разгонки « $p$ -кармана»  $n$ -канальных транзисторов с поправкой на время разгонки для обеспечения необходимой глубины залегания кармана. Уточнённое время разгонки составляет 6 ч в инертной атмосфере.

В ходе работы были смоделированы технологические маршруты изготовления р- и n-канальных транзисторов, получены их двумерные геометрические структуры в среде TCAD Sentaurus и исследованы их особенности. Полученные данные были использованы при подготовке итоговых комплектов фотошаблонов для изготовления транзисторов.

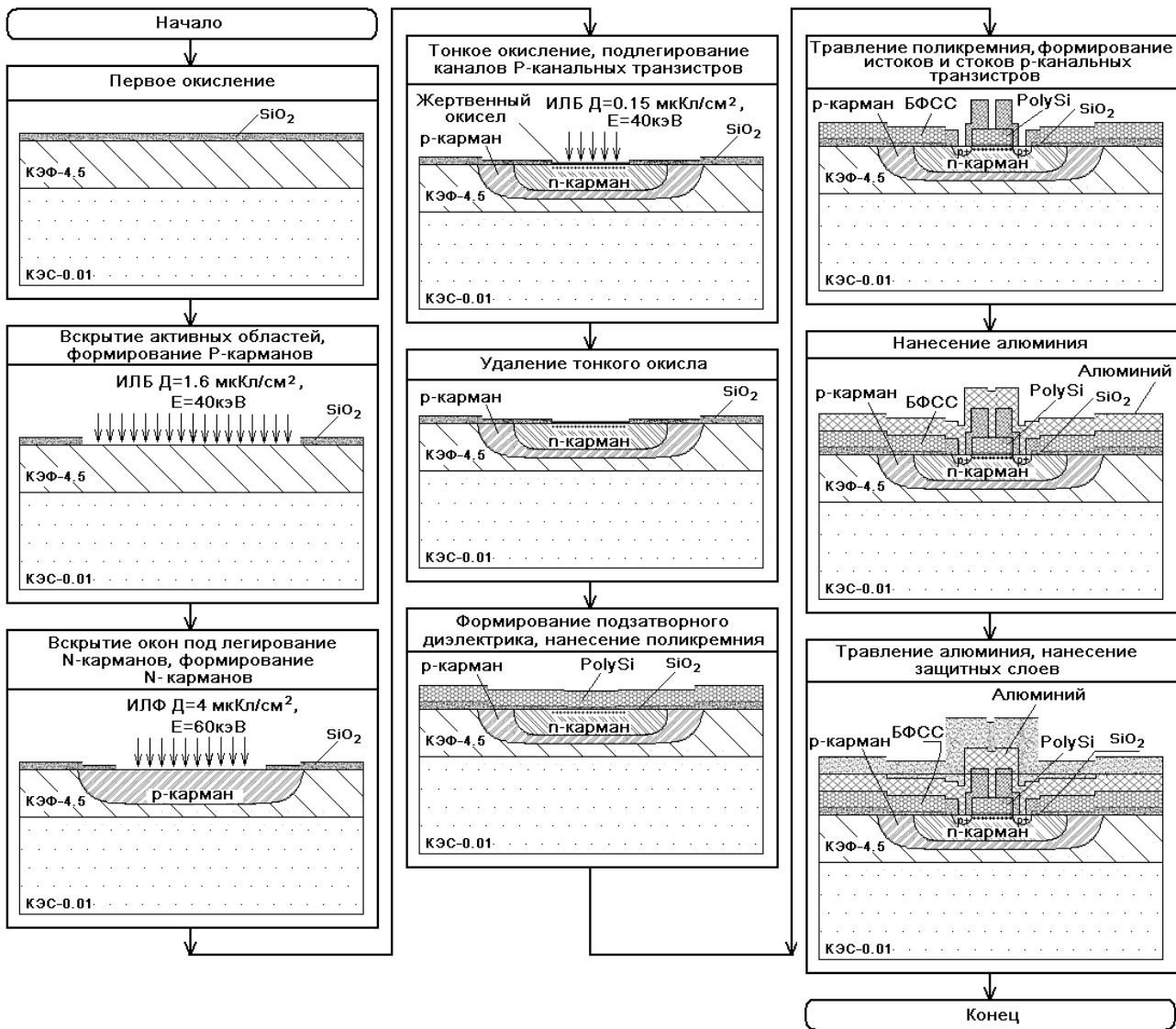


Рисунок 14 – Этапы формирования типового р-канального транзистора

В соответствие с принципиальной электрической схемой ППН разработана топология кристалла микросхемы (рисунок 15). При этом, основной задачей является размещение и трассировка элементов ИМС на кристалле при минимизации длины соединений ( $l_i$ ) и технологическом разбросе ( $\Delta l_j$ ) для  $m$  элементов:

$$\Phi_T = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m \Delta l_j \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $l_1$  – минимальный размер контактного окна,  $l_2$  – минимальная ширина шины металлизации,  $l_3$  – минимальное расстояние между шинами металлизации,  $l_4$  ( $l_5$ ) – минимальная длина каналов транзистора,  $l_6$  – минимальная ширина поликремниевой шины,  $l_7$  – минимальное расстояние между шинами,  $l_8$  – минимальное расстояние от контактного окна до затворов транзисторов,  $l_9$  – минимальное расстояние от контактного окна до края активных областей стоков и истоков и т.д. После оптимизации целевой функции (7) размещения, компоновки и трассировки всех библиотечных элементов, занимаемая площадь составляет около 80 % площади кристалла. Проектирование топологии завершается проверкой на соответствие нормам и «Правилам проектирования топологии», а также верификация топологии на соответствие принципиальной схеме согласно методике проверки топологических схем с использованием редактора LayEd. В результате разработки топологии ППН получена площадь кристалла  $4,6 \times 4,25 \text{ мм}^2$  с размещёнными на ней активными элементами (рисунок 15).

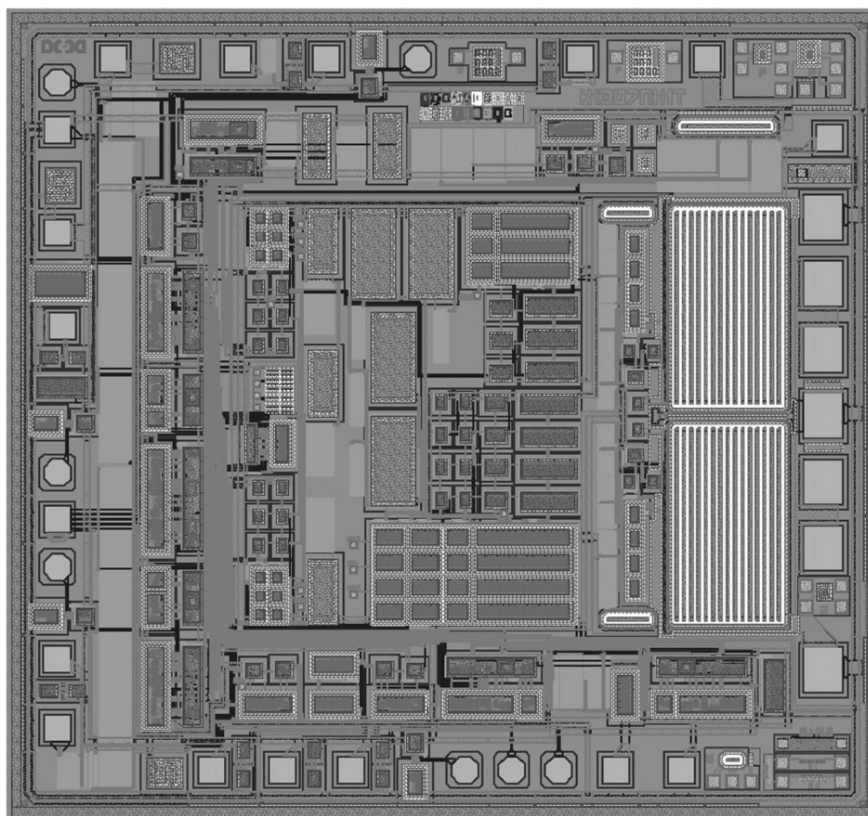


Рисунок 15 – Топология кристалла микросхемы преобразователя напряжения постоянного тока

Расчёт надёжности разработанной ИМС ППН, проводился согласно выражению:

$$\lambda = K_{\Pi} (\lambda_{кэ} + \lambda_{эк} + \lambda_{МС} + \lambda_{ПР}), \quad (8)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент вида приемки, характеризующий систему контрольных испытаний;  $\lambda_{кэ}$  – интенсивность отказов конструктивных элементов (корпус,

установка кристалла в корпус, внутренние соединения);  $\lambda_{ЭК}$  – интенсивность отказов элементов кристалла;  $\lambda_{МС}$  – интенсивность отказов межэлементных соединений;  $\lambda_{ПР}$  – интенсивность отказов прочих элементов кристалла. Согласно модели (6) выполнен расчет показателей надёжности и проведены испытания образца. На рисунке 16 приведены зависимости наработки до отказа ИМС ППН от температуры расчетная (1) и экспериментальная (2).

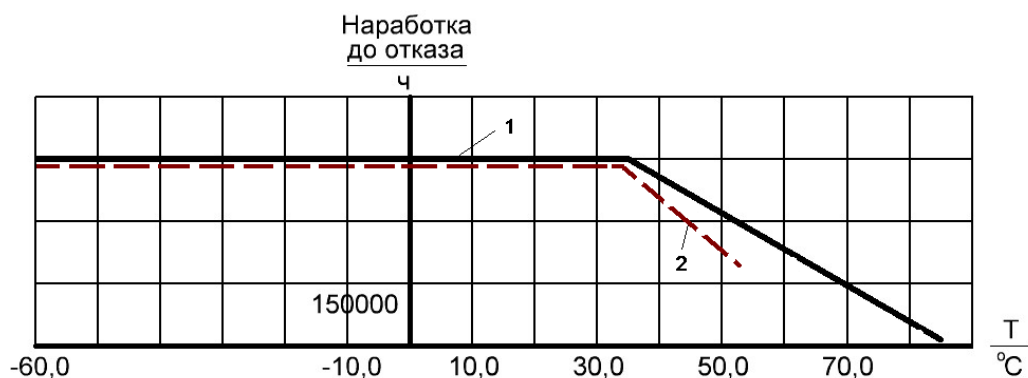


Рисунок 16 – Зависимость наработки до отказа ИМС ППН от температуры

Таким образом, результаты проведённых испытаний ИМС ППН по показателям надёжности показали хорошее совпадение с данными, полученными методом прогнозирования ( $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-8}$  и  $\lambda = 0,75 \cdot 10^{-8}$ ). Следовательно, прогнозирование показателей надёжности на ранних этапах разработки с учётом топологии ИМС ППН и технологического маршрута позволит найти оптимальное решение не только по структуре построения ППН и технико-экономическим показателям, но и надёжности с минимальным количеством скрытых дефектов. По данным проведенных испытаний можно предположить, что для разработанных ИМС ППН наработка до отказа составит не менее 170 000 ч, а гамма-процентный срок сохраняемости – не менее 28 лет. Полученные результаты количественной оценки технологичности ИМС ППН такие как, коэффициент применяемости операций 97,4%, коэффициент применяемости конструкции 67% и коэффициент контролепригодности 17% в соответствие со шкалой Харрингтона следует считать высоким.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны математические и имитационные модели функциональных блоков ИМС для анализа физических процессов в динамических режимах при внешних воздействиях и их параметризации, позволяющие оптимизировать технико-экономические характеристики и показатели надёжности.
2. Разработан алгоритм и программная реализация структурно-параметрического синтеза ИМС ППН.
3. Разработан технологический маршрут изготовления ИМС ППН, позволяющий определить численные значения важнейших параметров ИМС,

такие как глубины залегания *p-n*-переходов, поверхностные концентрации активных примесей в различных областях структуры, электрофизические параметры, как отдельных областей, так и готовых элементов, входящих в состав ИМС, а также вносить поправки в базовые операции, что является вектором к совершенствованию параметров и характеристик получаемых микросхем.

4. Разработана АСТПП на основе новой производственной методики диагностики скрытых дефектов на уровне топологического проектирования методами неразрушающего контроля с целью повышения качества и надёжности выпускаемых ИМС.

5. Разработана интегрированная среда (САПР и АСТПП) для реализации жизненного цикла «проектирование-производство-эксплуатация» ППН на базе пакета TCAD Sentaurus по новой технологии формирования «кармана в кармане», позволяющей получить силовой транзистор с управляющей схемой любой сложности на одном кристалле.

Предложенные в работе решения, соответствуют современной тенденции развития методов автоматизированного проектирования сложных электронных схем, их оптимизации на этапах проектирования, которые направлены на повышение эффективности и надёжности, так как позволяют выявлять возможные дефекты на ранних этапах проектирования и устранять их с минимальными затратами. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о возможности широкого внедрения и использования предложенной автоматизированной системы схемотехнического и конструкторско-технологического проектирования ИМС в практических разработках на предприятиях электронной промышленности Российской Федерации.

### **Перечень основных публикаций по материалам диссертации**

#### ***Статьи в журналах, рекомендованных ВАК России:***

1. Глухов, А.В. Автоматизированное проектирование драйверов в среде OrCAD [Текст] / А.В. Глухов, Л.Ю. Рогулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. –2013. – Том 19, №2. – С. 291-297. (Соискатель – 80%)

2. Глухов, А.В. Моделирование рабочих процессов цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC модемов [Текст] / А.В. Глухов, А.А. Алексеев, Г.В. Перов, В.И. Сединин // Вестник СибГУТИ. –2013. –№3. – С. 78-85. (Соискатель – 70%)

3. Глухов, А.В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC модемов [Текст] / А.В. Глухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. –2013. – Том 19, №4. – С. 749-756.

4. Глухов, А.В. Разработка технологического маршрута проектирования микросхем DC/DC преобразователей [Текст] / А.В. Глухов, В.И. Сединин // Вестник СибГУТИ. –2013. –№4. – С. 46-54. (Соискатель – 80%)



**Патенты:**

5. Глухов, А.В. Буферное запоминающее устройство [Текст] / А.В. Глухов // Патент РФ № 1462421 А1, 1986.
6. Глухов, А.В. Постоянное запоминающее устройство [Текст] / А.В. Глухов // Патент РФ № 1635219 А1, 1989.
7. Глухов, А.В. Цифровая линия задержки [Текст] / А.В. Глухов // Патент РФ № 1709517 А1, 1989.
8. Глухов, А.В. Конструкция кварцевой ампулы для диффузии легирующих примесей в кремний (диффузии мышьяка) с встроенным приспособлением для управления скоростью последиффузионного охлаждения кремниевых р-п- структур [Текст] / А.В. Глухов, С.П. Скорняков, Г.В. Перов // Заявка на изобретение № 2012121928 от 28.05.12 г. (Соискатель – 70%)
9. Глухов, А.В. Способ управления и стабилизации скорости последиффузионного (диффузия мышьяка) охлаждения низковольтных (~6В) кремниевых планарных структур прецизионных стабилитронов и устройство для его осуществления [Текст] / А.В. Глухов, С.П. Скорняков, Г.В. Перов // Заявка на изобретение № 2012121929 от 28.05.12 г. (Соискатель – 60%)
10. Глухов, А.В. Устройство защиты светодиодов от перегрузок [Текст] / А.В. Глухов, Л.Ю. Рогулин // Заявка на изобретение № 2013109498 от 04.03.13 г. (Соискатель – 80%)
11. Глухов, А.В. Устройство управления освещением по среднему значению тока [Текст] / А.В. Глухов, Л.Ю. Рогулин // Заявка на изобретение № 2013104855 от 05.02.13 г. (Соискатель – 80%)

**Публикации в других изданиях:**

12. Глухов, А.В. Электронные компоненты высокой мощности для систем защиты РЭА от импульсных перенапряжений [Текст] / А.В. Глухов, А.Г. Цветиков, А.Н. Акулов, С.П.Скорняков, Г.В. Перов // Электропитание. –2011. – №4. – С. 17-22. (Соискатель – 50%)
13. Глухов, А.В. Установка контроля импульсного напряжения ограничения систем защиты источников электропитания высокой мощности [Текст] / А.Г. Цветиков, А.В. Глухов, Г.В. Перов // Электропитание. –2011. – №4. – С. 23-26. (Соискатель – 70%)
14. Глухов, А.В. Метрологическое обеспечение при моделировании проводимости ультратонких диэлектриков с неоднородной границей в среде TCAD SETAURUS [Текст] / Г.В. Перов, А.В. Глухов, А.А. Алексеев, В.И. Сединин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы XI международной конференции АПЭП – 2012, Т.3 Новосибирск , 2 – 4 октября , 2012. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – С.112 - 115. (Соискатель – 60%)
15. Глухов, А.В. Проектирование программируемого интерполирующего фильтра для СБИС цифрового модулятора-преобразователя [Текст] / А.А. Алексеев, А.В. Глухов, Л.Г. Рогулина // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы XI международной конференции АПЭП – 2012, Т.3 Новосибирск , 2 – 4 октября , 2012. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – С.116 - 119. (Соискатель – 70%)

16. Глухов, А.В. Электронные компоненты высокой мощности для систем защиты РЭА от импульсных перенапряжений [Текст] / А.В. Глухов, А.Г. Цветиков, А.Н. Акулов, С.П.Скорняков, Г.В. Перов // Силовая электроника. – 2012. – №3. – С. 28-33. (Соискатель – 50%)
17. Глухов, А.В. Проектирование цифровых интерполирующих фильтров высокоскоростного цифрового квадратурного модулятора для PLC модемов [Текст] / А.А. Алексеев, А.В. Глухов, Г.В. Перов // Электропитание. –2012. – №3. – С. 46-50. (Соискатель – 65%)
18. Глухов, А.В. Развитие функциональных возможностей TCAD ФАКТ с целью расчета электрофизических параметров и расширения графического интерфейса [Текст] / С.В. Калинин, А.В. Глухов, Д.О. Кузнецов // Российская научно–техническая конференция. Материалы. Т. 1. Новосибирск : СибГУТИ, 2008. С. 416-417. (Соискатель – 80%)
19. Глухов, А.В. Моделирование характеристик и параметров КМОП транзисторов на основе TCAD SenTaigus [Текст]/ А.В. Глухов, С.В. Калинин, А.С. Черкаев // Российская научно–техническая конференция. Материалы. Т. 1. Новосибирск: СибГУТИ, 2011. С. 448-449. (Соискатель – 75%)
20. Глухов, А.В. Разработка маршрута проектирования микросхем DC-DC преобразователей [Текст] / А.В. Глухов, В.И. Сединин, Л.Г. Рогулина // XIII- международная конференция. Тезисы XIII - международной конференции. Под ред. Е.И. Артамонова. М.: Институт проблем управления РАН. – 2013. С. 27. (Соискатель – 70%)