Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ М. Л. Громов
«_09_» июня 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

РАЗРАБОТКА СЛОЖНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЛОКА КМОП-АВТОГЕНЕРАТОРА

по направлению подготовки 03.03.03 - Радиофизика
профиль – «Радиофизика, электроника и информационные системы»

Дорохов Никита Сергеевич

Руководитель ВКР
доктор физ.-мат. наук, профессор
_____ В. А. Кагадей
«_08_» июня 2023 г.

Научный консультант
аспирант, каф. ПЭ, РФФ ТГУ
_____ Е. С. Полынцев
«_08_» июня 2023 г.

Автор работы
студент группы № 071903
_____ Н. С. Дорохов
«_08_» июня 2023 г.

Томск-2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОПОП
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ М.Л. Громов

«03» _____10____ 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы обучающемуся
Дорохову Никите Сергеевичу
(Ф.И.О. обучающегося)

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы бакалавра
Разработка сложного функционального блока КМОП-автогенератора

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:
а) на кафедру – 06.06.2023
б) в ГЭК – 12.06.2023

3 Исходные данные к работе:
Объект исследования – Электронные генерирующие устройства
Предмет исследования – Модель интегрального автогенератора, построенная на основе комплекта средств проектирования HCMOS8D ПАО Микрон
Цель исследования – Разработка сложного функционального блока автогенератора на основе комплекта средств проектирования HCMOS8D ПАО Микрон для применения в КМОП аналоговых интегральных схемах

Задачи:
1) Литературный обзор по следующим вопросам:
   a. Маршрут проектирования КМОП интегральных схем
   b. Технологический маршрут изготовления КМОП ИС
   c. Сложные функциональные блоки
   d. Обзор схемотехнических решений
2) Разработка схемы электрической принципиальной блока автогенератора
3) Разработка схемы электрической принципиальной блока термостабилизации
4) Исследование и анализ параметров сложного функционального блока автогенератора

Методы исследования

Проектирование схемы электрической принципиальной сложного функционального блока будет проводиться в САПР Cadence Virtuoso на основе комплекта средств проектирования HCMOS8D ПАО Микрон. Лицензионный доступ к САПР Cadence предоставляется НИ МИЭТ.

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа:

Научно-образовательный центр "Инжиниринговый центр СВЧ техники и технологии, Региональный центр сквозного проектирования телекоммуникационного оборудования, НИ ТГУ

4. Краткое содержание работы

В рамках выпускной квалификационной работы будет разработан сложный функциональный блок автогенератора с перестраиваемой частотой генерации. Сложный функциональный блок автогенератора основан на кольцевом автогенераторе с использованием последовательно соединенных инверторов. Автогенератор термостабилизирован во всем рабочем диапазоне температур 0 – 125 °С, частотный диапазон перестройки автогенератора – от 1 до 44 МГц, точность частоты автогенератора в рабочем диапазоне температур 3%. Разработка отечественных сложных функциональных блоков актуальна и востребована в рамках глобальной задачи обеспечения национальной безопасности и импортонезависимости Российской Федерации в области радио- и микроэлектроники.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Зам. директора, НОЦ ИЦ СВЧ ТТ ТГУ	/	В.А. Кагадей
(должность, место работы)	(подпись)	(И.О. Фамилия)

Консультант выпускной квалификационной работы

Аспирант, каф. ПЭ, РФФ ТГУ	/	Е.С. Полынцев
(должность, место работы)	(подпись)	(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

Студент, каф. ПЭ, РФФ ТГУ	/	Н.С. Дорохов
(должность, место работы)	(подпись)	(И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Отчёт по ВКР содержит: 47 страниц, 3 главы, 32 рисунка, 1 таблица, 13 формул, 15 источников.

СФ-БЛОК, КМОП ИС, КОЛЬЦЕВОЙ АВТОГЕНЕРАТОР, ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ, HCMOS8D, САПР CADENCE VIRTUOSO, СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ

Целью данной работы является разработка сложного функционального блока автогенератора на основе комплекта средств проектирования HCMOS8D ПАО «Микрон» для применения в КМОП аналоговых интегральных схемах.

Объектом исследования является электронные генерирующие устройства.

В настоящей работе представлены результаты разработки КМОП СФ-блока термостабильного перестраиваемого по частоте автогенератора. Разработка выполнялась с использованием дизайн кита ПАО «Микрон» HCMOS8D и САПР Cadence. СФ-блок автогенератора основан на кольцевом автогенераторе с использованием последовательно соединенных инверторов. Автогенератор термостабилизирован во всем рабочем диапазоне температур. Питание СФ-блока осуществляется от напряжения 3 В; частотный диапазон перестройки автогенератора от 1 до 44 МГц; точность частоты автогенератора в рабочем диапазоне температур 3%.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5
1. Литературный обзор по проектированию интегральных схем 6
1.1 Маршрут проектирования КПОМ ИС 6
1.2 Технологический маршрут изготовления КМОП ИС 10
1.3 Сложные функциональные блоки 12
1.4 Базовые схемы автогенераторов 13
1.4.1 Мультивибратор 14
1.4.2 Автогенератор на операционном усилителе 16
1.4.3 Кольцевой автогенератор 18
1.5 Постановка задачи 20
2. Методика проектирования 21
3. Разработка схемы электрической принципиальной СФ-блока автогенератора 23
3.1 Разработка блока автогенератора 23
3.2 Разработка блока термостабилизации 37
3.3 Результаты проектирования и их анализ 42
Заключение 44
Список использованной литературы 46

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей отечественной микроэлектроники является разработка логических сверхбольших интегральных схем и схем специального назначения. Для создания таких схем требуются сложные функциональные блоки (СФ-блоки), построенные на основе отечественных технологических процессов. Задача разработки открытых отечественных сложных функциональных блоков – актуальна и востребована в рамках глобальной задачи обеспечения национальной безопасности и импортонезависимости Российской Федерации в области радио- и микроэлектроники.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка сложного функционального блока автогенератора на основе комплекта средств проектирования HCMOS8D ПАО «Микрон» для применения в КМОП аналоговых интегральных схемах. Проектирование ИМС выполнялось с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) Cadence Virtuoso

В рамках работы проведен литературный обзор, включавший обзор типичного маршрута проектирования интегральных схем на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП), технологический маршрут изготовления КМОП интегральных схем, обзор классификации СФ-блоков, используемых в промышленности, обзор базовых схем автогенераторов. На основе проведенного литературного обзора сформулированы технические требования к СФ-блоку. Разработан СФ-блок перестраиваемого по частоте термостабильного автогенератора с рабочим диапазоном температур 0-125 °С, который обеспечивает линейный частотный диапазон перестройки 1-44 МГц. СФ-блок состоял из кольцевого автогенератора с промежуточной схемой управления частотой и управляющего блока термостабилизации, выполненного на основе термо-компенсированной самосмещенной цепи и бандгапа на основе *pnp* биполярного транзистора в диодном включении. СФ-блок предназначен для использования в составе аналоговых контроллеров питания, ШИМ-контроллерах и т.д.

Верификация разработанного СФ-блока планируется путем изготовления опытного образца в физическом воплощении на ПАО Микрон в 2024 году в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW». До конца 2023 года СФ-блок будет включен в российскую библиотеку открытых СФ-блоков.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

1.1 Маршрут проектирования КПОМ ИС

Проектирование интегральных схем (ИС) можно разделить на две большие категории, отличающихся подходом: проектирование цифровых ИС и проектирование аналоговых ИС. К цифровым ИС относятся такие устройства, как микропроцессоры, программируемые логические интегральные схемы, схемы памяти устройства (ОЗУ, ПЗУ и флэш-память) и цифровые интегральные схемы специального назначения (ASIC). Цифровое проектирование фокусируется на логической правильности, максимизации плотности схемы и размещении схем таким образом, чтобы минимизировать рассинхронизацию управляющих сигналов. Проектирование аналоговых ИС специализируется на проектировании силовых и радиочастотных ИС. Аналоговый подход к проектированию используется в операционных усилителях, линейных регуляторах, контурах с фазовой автоподстройкой, генераторах и активных фильтрах. Аналоговое проектирование больше связано с физикой полупроводниковых устройств, таких как усиление, согласование, рассеивание мощности и сопротивление. Точность усиления и фильтрации аналогового сигнала обычно имеет решающее значение, и в результате аналоговые микросхемы используют активные устройства большей площади, чем цифровые, и обычно имеют меньшую плотность схемы [1].

Современные микросхемы чрезвычайно сложны. По состоянию на 2015 год, средний чип в составе персонального компьютера содержит более 1 миллиарда транзисторов. Правила относительно того, что можно и чего нельзя производить, также чрезвычайно сложны. Кроме того, поскольку сам производственный процесс не является полностью предсказуемым, проектировщики должны учитывать его статистический характер. Сложность проектирования современных ИС, а также давление рынка, требующее быстрого создания улучшенных устройств, привели к широкому использованию средств автоматизированного проектирования (САПР).

Проектирование интегральных схем включает в себя создание электронных компонентов, таких как транзисторы, резисторы, конденсаторы и соединение этих компонентов на поверхности полупроводниковой пластины. Необходим способ изоляции отдельных компонентов, сформированных в подложке, поскольку кремниевые подложки является проводящими. Также, необходимо уделять внимание рассеянию мощности транзисторов и сопротивлению межсоединений, а также плотности тока, протекающего в межсоединениях, контактах и переходах. Наконец, физическое расположение

определенных подблоков схемы обычно имеет решающее значение для достижения желаемой скорости работы, для отделения электрически шумных участков ИС, а также для уравновешивания эффектов тепловыделения через ИС. В связи с этой чрезвычайной сложностью был разработан маршрут проектирования, позволяющий учесть многие нюансы и выявить критические ошибки при проектировании на ранних этапах. Типичный маршрут проектирования приведен на рисунке 1.1.

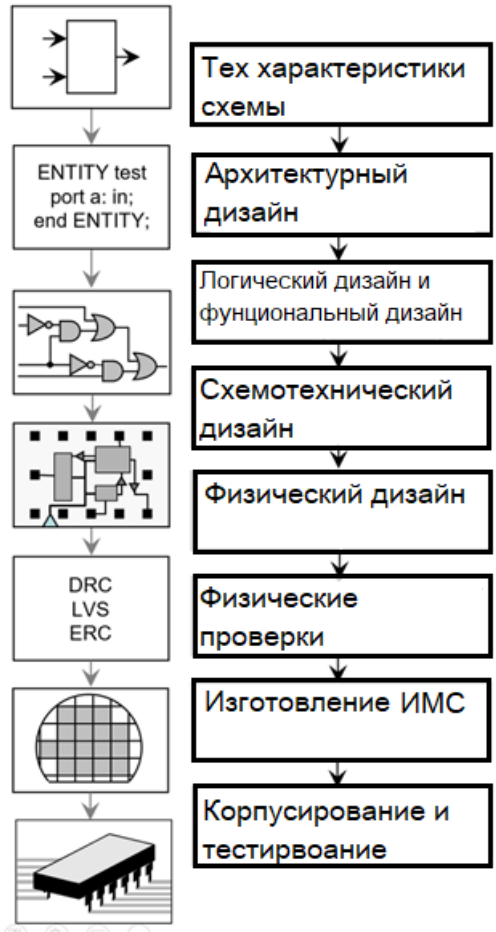


Рисунок 1.1 – Типовой маршрут проектирования интегральной микросхемы (ИМС) [1]

Процесс проектирования любой интегральной схемы начинается с определения входных и выходных параметров, предъявляемых к схеме, обычно формализованных в виде технического задания. Техническое задание – это документ на разработку микросхемы, который формируется в тесном сотрудничестве заказчика и проектировщика. Исходя из требований заказчика и возможностей проектировщика, в этом документе определяются следующие требования:

1. Функциональность ИМС (какую функцию она должна выполнять)
2. Параметры работы ИМС (напряжение питания, тактовая частота, потребляемая мощность, рабочий диапазон температур, устойчивость к излучениям и т.д.)

3. Технология производства ИМС
4. Маршрут проектирования
5. Сроки окончания этапов проектирования
6. Порядок передачи проекта на производство и приемки изделия заказчиком

На следующем этапе разрабатывается архитектура ИС, выделяются основные функциональные блоки, определяются требования к ним. Архитектура определяет основные принципы функционирования ИС. Результатом этого этапа работ является архитектурная спецификация.

Следующим этапом проектируется логическая часть ИМС. Логическая схема описывается на специальном языке Verilog (или VHDL), который предназначен для процессов, происходящих внутри микросхемы. В результате написания кода, получается файл, описывающий работу ИМС. Правильность текстового файла определяется путем поведенческого моделирования и соотнесения результатов с требованием технического задания. Далее с помощью с логического синтезатора код преобразуется в логическую схему. В логический синтезатор, помимо кода Verilog загружается файл ограничений, который описывает на какой частоте должна работать схема. После того, как вся информация была загружена, система преобразует описание в логическую схему и формирует отчет, о том может ли работать схема на выбранной частоте и технологии. Если требуемые характеристики не могут быть достигнуты, то рассматриваются варианты оптимизации логики функционирования аппаратуры или переход на более мелкую технологию изготовления. Если все характеристики соответствуют требованиям, то следующим этапом происходит встраивание систем тестирования. Для этого необходимо на логическом этапе встроить специальные схемы и алгоритмы технологического тестирования, которые создаются с использованием средств автоматизированного проектирования (САПР) и предназначены для поиска производственных дефектов без оценки правильности логического функционирования устройства. На этом этапе заканчивается этап логического проектирование.

На следующем этапе разрабатывается топология созданной логической схемы. Задача разводки топологии сводится к эффективному, плотному расположению транзисторов и функциональных блоков в поле кристалла. Одним из наиболее важных параметров цифровых схем является рабочая тактовая частота. Для прогнозирования времен задержки в ИМС строится дерево синхронизации, которое позволяет оценить задержки в схеме. Очень важно, чтобы в каждую точку микросхемы тактовый сигнал пришел с минимально возможным расхождением относительно всех остальных точек схемы. Для этого сигнал синхронизации разветвляется по всей схеме и многократно

усиливается от источника частоты до конечной точки на схеме. После создания дерева синхронизации на кристалл помещаются элементы логической схемы и дальнейшее соединения этих элементов при помощи металлических проводников. После соединения все элементов логической схемы на кристалле, необходимо провести проверки на соответствие разработанной топологии электрической схеме, а также проверку на соответствие правилам проектирования, определенные фабрикой-производителем.

Проверка на соответствие правилам проектирования (Design Rule Check (DRC)) проводится для того, чтобы убедиться, что спроектированная ИМС, может быть изготовлена на фабрике: т.е все размеры элементов и расстояния между ними соблюдены. Вторая проверка выполняется для проверки на соответствие топологии схеме электрической принципиальной (Layout Versus Schematics (LVS)). LVS проверка сводится к сравнению разработанной топологии с исходной электрической схемой. Проверка Electrical Rules Check (ERC) проводится для того, чтобы удостовериться, что разработанная схема правильно выполнена с электрической точки зрения, например правильно ли разведено питание и заземление.

После создания топологии микросхемы, создается комплект масок, которые отправляются на производство. С их помощью будет изготовлен комплект фотошаблонов, которые в дальнейшем будут использоваться в производстве. Процесс производства кристалла ИМС включает в себя технологические операции, которые связанны с изготовлением транзисторов, диодов, других активных или пассивных элементов, формируемых в приповерхностном слое кремниевой пластины, а также с созданием межэлементной разводки по слою диэлектрика, осажденному на кремний. Формирование ИМС обязательно включает в себя следующие технологические операции: литография, травление и осаждение полупроводников, металлов и диэлектриков, ионная имплантация, химико-механическая планаризация. После прохождения всех технологических этапов, полупроводниковая пластина разделяется на отдельные чипы, которые затем помещают в корпус.

После корпусирования проводится финальное тестирование ИМС на соответствие техническим требованиям и отсутствие брака. После финальной проверки протестированные микросхемы отправляются потребителям.

1.2 Технологический маршрут изготовления КМОП ИС

Технологический маршрут изготовления КМОП ИС включает большое количество технологических операций. Основные этапы формирования МОП-транзисторов в типовом КМОП маршруте на p-подложке приведены на рис.1.2– 1.7.

Для изготовления структуры используется подложка кремния *p* – типа проводимости. Сначала по всей поверхности подложки выращивается толстый слой оксида кремния.

Рисунок 1.2 – Структура подложки в поперечном сечении на этапе формирования маски под ионную имплантацию

С помощью первой литографии вскрываются окна над областями будущих карманов *n* – типа. Затем с помощью рисунка в пленке SiO_2 проводится имплантация ионов, дающих *n* – тип проводимости. Карман должен быть довольно глубоким, поэтому используют легкие ионы фосфора.

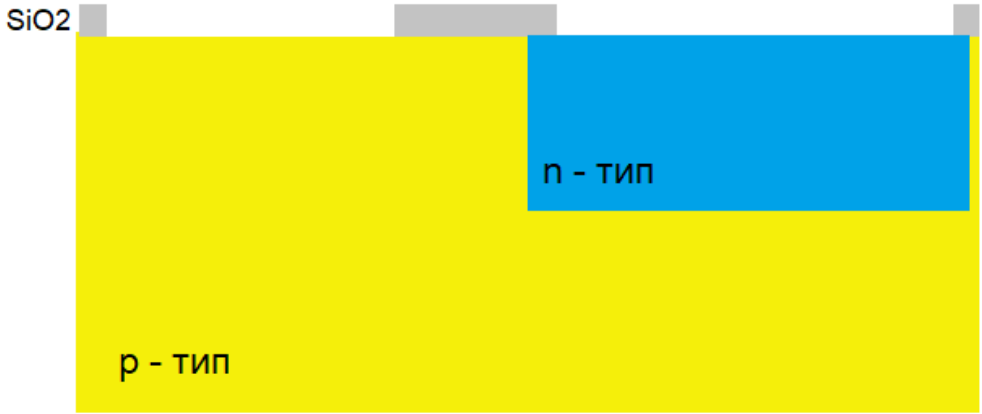


Рисунок 1.3 - Формирование кармана *n* – типа путем имплантации ионов

Следующим этапом опять производится рост толстой пленки SiO_2 вокруг активных областей будущих транзисторов. Вслед за этим методом осаждения из газовой фазы формируется пленка легированного поликремния, на которой методами литографии наносится рисунок будущих затворов с межсоединениями.

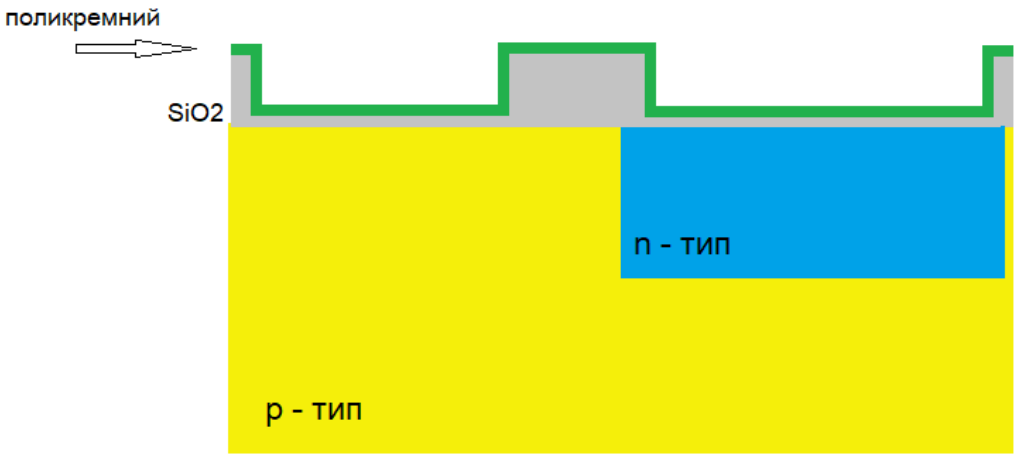


Рисунок 1.4 – Выращивание подзатворного слоя оксида и осаждение поликремния

Следующим этапом происходит травление поликремния и оксида. Затем, используя две различного вида маски, выполняют имплантацию n^+ и p^+- областей истоков и стоков транзисторов.

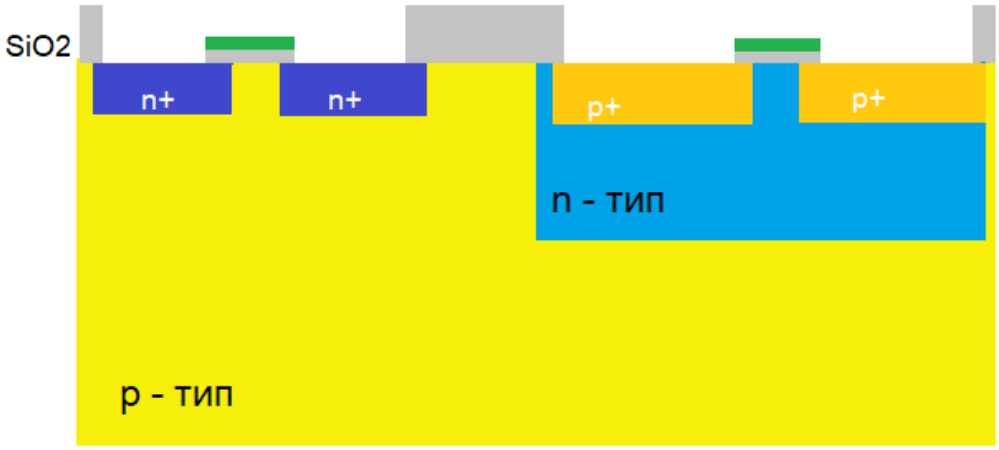


Рисунок 1.5 – Травление поликремния и оксида, имплантация $\boldsymbol{n}^+$ и $\boldsymbol{p}^+$- областей

В течение следующей операции наносится капсулирующий слой из нитрида металла (напрмер TiN), который необходим для дополнительной защиты металлических проводников при дальнейшей металлизации.

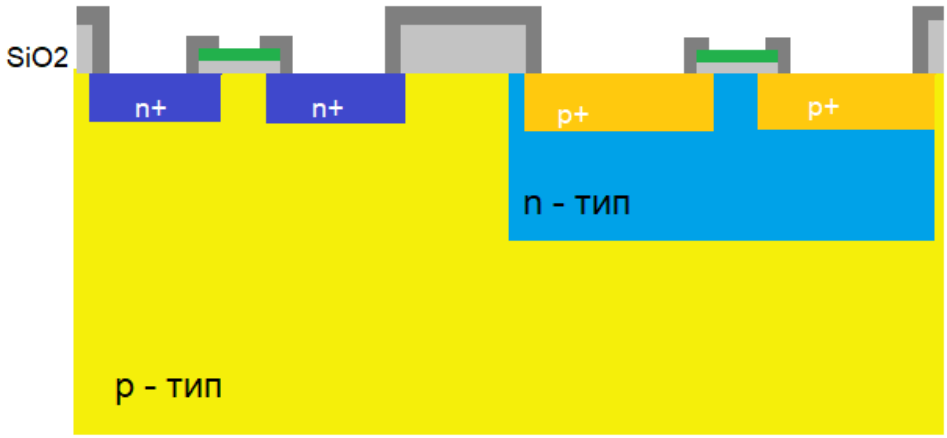


Рисунок 1.6 –Выращивание и дальнейшее травление слоя нитрида металла

Следующим этапом создаются электрические соединения между ближайшими элементами, их часто называют локальными межсоединениями. В качестве материала для этих целей используют металлы. Происходит этот процесс путем напыления металла и дальнейшем его травлением с образованием стоков и истоков, и их соединений.

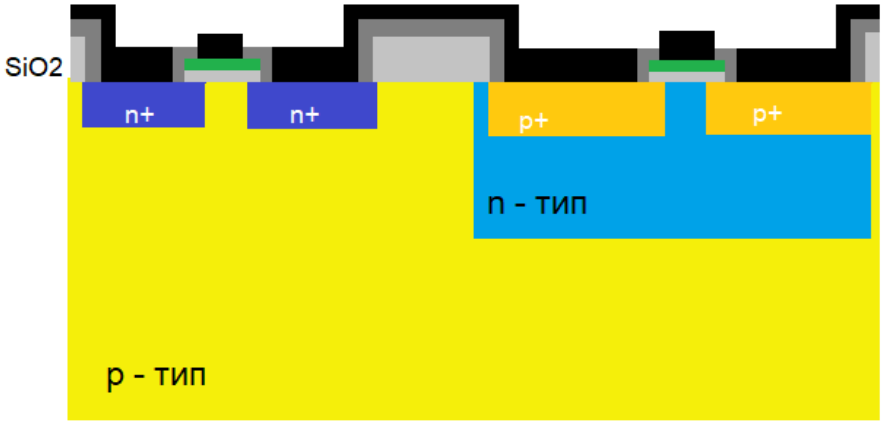


Рисунок 1.7 – Образование стоков и истоков путем металлизации

1.3 Сложные функциональные блоки

Современные твердотельные интегральные микросхемы, реализуемые по идеологии «система на кристалле», представляют собой совокупность взаимосвязанных сложно функциональных блоков (СФ-блоков), каждый из которых выполняет определённую функцию целого устройства. СФ-блоки (или IP-ядра) – это готовые блоки для проектирования микросхем (например, для построения систем на кристалле). Права на схему чипа могут принадлежать одной компании, однако некоторые компании продают

лицензии на схемы своих чипов в виде блоков для широкого использования. К примеру, Apple покупает лицензии на СФ-блоки у ARM для создания своих микропроцессоров, которые затем используются в смартфонах и компьютерах.

Использование СФ-блоков может варьироваться в зависимости от того, где и как будет использоваться данный СФ-блок. в промышленной индустрии различают 3 вида СФ-блоков:

1. *Soft* СФ-блоки, представляющие собой программные блоки, описанные на языке описания архитектуры (Verilog). Преимущество данного СФ-блока заключается в гибкости, портативности и возможности повторного использования. недостатком является отсутствие гарантированных временных характеристик или характеристик мощности, поскольку реализация в различных процессах и приложениях приводит к различиям в производительности.
2. *Firm* СФ-блоки представляют собой схему соединения функциональных элементов из состава библиотеки, предназначенной для создания ИС на базе конкретной технологии изготовления.
3. *Hard* СФ-блоки представляют собой топологический фрагмент, ориентированный на определенную технологию изготовления, который можно непосредственно реализовать в физической структуре кристалла.

Типичными СФ-блоками являются аналого-цифровой преобразователь, цифро-аналоговый преобразователь, генераторы тактовой частоты, ячейки памяти и т.д.

1.4 Базовые схемы автогенераторов

Автогенератор (автономный генератор) – устройство, генерирующее электрические колебания с заданными параметрами без воздействия возбуждающего колебания, то есть самостоятельно, автономно. Автогенераторы являются источниками первичных колебаний. Они применяются во всех радиотехнических системах в качестве возбудителей передатчиков, источников опорных, эталонных сигналов и являются наиболее ответственными элементами. Принцип действия электронных автогенераторов, как и других автоколебательных систем – это внесение в автоколебательную систему энергии, в точности компенсирующую рассеяние энергии в нагрузке и в самой колебательной системе. Если это не выполняется, то колебания либо нарастают, либо затухают.

Классифицировать автогенераторы можно по следующим признакам:

1. по типу активного элемента, например, ламповый, транзисторный, диодный и т.п
2. по количеству активных элементов, однотактный, двухтактный и т.п

3. по схемному построению
4. по количеству и виду колебательных цепей, одноконтурный, двухконтурный и т.п
5. по типу элементов колебательной цепи - *LC, RC*-автогенераторы.

1.4.1 Мультивибратор

Одной из часто применяющихся в электронике схем, является симметричный мультивибратор. Мультивибратор представляет собой электронное устройство, которое генерирует колебания по форме, близкой к прямоугольным. Мультивибраторы строятся как усилители с положительной обратной связью с коэффициентом усиления по контуру много больше единицы. Мультивибратор собирается на двух транзисторах или логических схемах с дополнительными элементами. Что означает, что выход второго каскада соединен через конденсатор со входом первого каскада. В следствии этого усилитель за счет положительной обратной связи превращается в генератор. Для генерации импульсов достаточно подключить мультивибратор к источнику питания. Мультивибраторы можно разделить на симметричные и несимметричные. Схема симметричного вибратора представлена на рисунке 1.8.

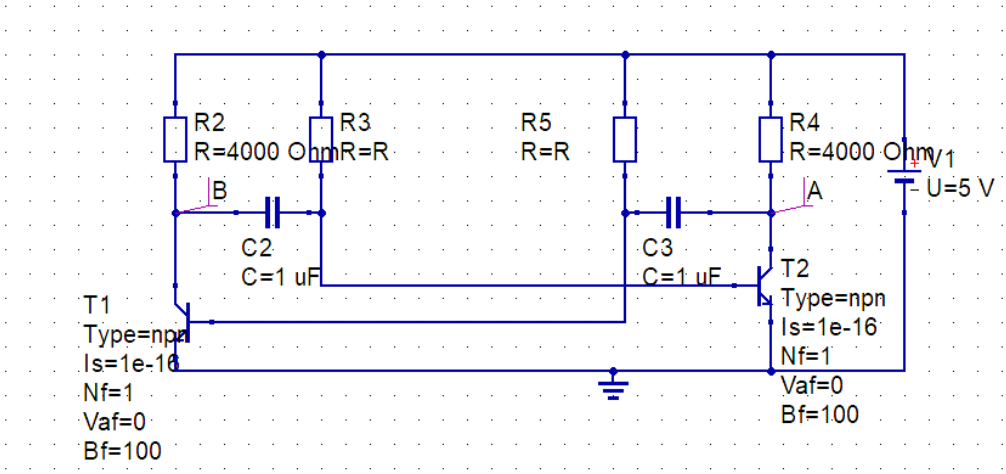


Рисунок 1.8 – Схема электрическая принципиальная симметричного вибратора

В симметричном мультивибраторе номиналы элементов каждого из двух плеч абсолютно одинаковы: $R_2 = R_4$, $R_3 = R_5$, $C_2 = C_3$. Симметричный мультивибратор представляет собой двухкаскадный усилитель, причем схема построена так, что выход первого каскада соединен с входом второго. Вследствие этого после подачи питания на схему, получается, что один из биполярных транзисторов открыт, а другой находится в закрытом состоянии. Если предположить, что транзистор T1 открыт и находится в состоянии насыщения, а транзистор T2 закрыт, то в схеме происходят процессы, связанные с перезарядом конденсаторов C2 и C3. Изначально конденсатор C3 полностью разряжен,

вслед за насыщением транзистора T1 происходит его постепенная зарядка его через резистор R4. Поскольку конденсатор C3 шунтирует коллектор-эммитерный переход транзистора T2 через эммитерный переход транзистора T1, то скорость его заряда определяет скорость изменения напряжения на коллекторе T2. После заряда C3 транзистор T2 закрывается. Продолжительность этого процесса (длительность фронта напряжения коллектора) можно вычислить по формуле:

$$t_{1a} = 2{,}3R_2C_2, \quad (1)$$

В схеме также протекает и второй процесс, который связан с разрядом конденсатора C2. Разряд его происходит через транзистор T1, резистор R3 и источник питания. После разряда конденсатора на базе транзистора T1, он начинает открываться, так как появляется положительный потенциал. Заканчивается этот процесс после полного разряда конденсатора C2. Длительность этого процесса (импульса) можно рассчитать по формуле:

$$t_{2a} = 0{,}7R_3C_2, \quad (2)$$

После окончании времени t_{2a} транзистор T1 будет заперт, а T2 будет находится в насыщении. После этого процесс повторяется заново по аналогичной схеме, тогда длительность интервалов следующих процессов, можно рассчитать по формулам:

$$t_{1b} = 2{,}3R_4C_3, \quad (3)$$

$$t_{2b} = 0{,}7R_5C_3, \quad (4)$$

Для определения частоты колебания симметричного мультивибратора, можно воспользоваться формулой:

$$f = 1/(t_{2a} + t_{2b}), \quad (5)$$

При правильном расчёте мультивибратора, сопротивление коллекторных резисторов должно быть меньше базовых резисторов, т.к. коллекторные резисторы обеспечивают быстрый заряд конденсаторов. Частота мультивибратора определяется постоянной RC-цепей R3-C2 и R5-C3. Мультивибратор может вырабатывать как симметричные, так и не симметричные по длительности импульсы. Длительность импульса на коллекторе T1 определяется номиналами R5 и C3, а длительность импульса на коллекторе T2 определяется номиналами R3 и C2. Длительность перезаряда конденсаторов $t_и$ определяется формулой:

$$t_и = RC, \quad (6)$$

Таким образом длительность импульса на коллекторе T1 и длительность импульса на коллекторе T2 определяются формулами:

$$t_{и1} = R_5C_3, \quad (7)$$

$$t_{и2} = R_3C_2, \quad (8)$$

При равенстве номиналов R5=R3, C3=C2, на выходах мультивибратора получаем прямоугольные импульсы с коэффициентом заполнения импульсов 0,5 (рисунок 1.9), где T

– полный период колебания мультивибратора, который равен сумме длительности импульса и времени между импульсами

$$T = t_{и1} + t_{и2}. \quad (9)$$

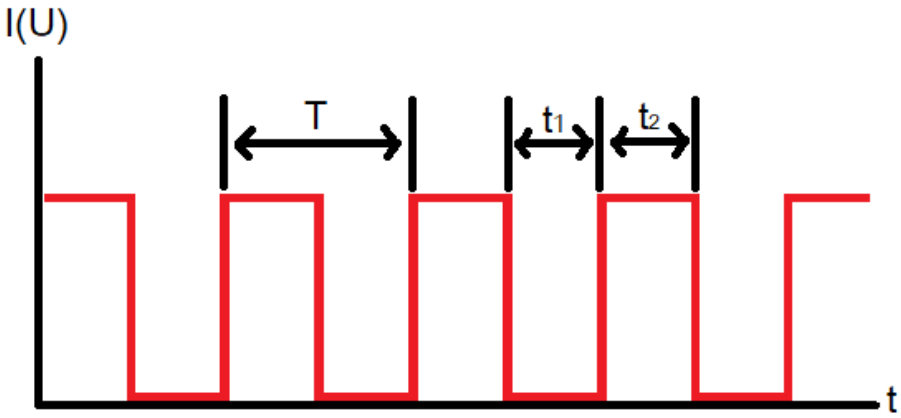


Рисунок 1.9 – Осциллограмма колебаний, генерируемых мультивибратором

1.4.2 Автогенератор на операционном усилителе

Часто для построения схем генераторов используют операционные усилители (ОУ). Для создания автогенераторов обычно используют ОУ в интегральном исполнении. Конструирование генератора в этом случае сводится к выбору типа микросхемы ОУ и способа подключения к ней дискретных элементов для организации обратной связи и внешних элементов управления. Разделают два вида генераторов на ОУ синусоидальные и релаксационные. Синусоидальные состоят из усилителей с *RC* или *LC* цепями, с помощью которых можно менять частоту генерации. Генераторы синусоидального сигнала работают без подачи на них внешнего сигнала. Вместо этого применяется комбинация положительной или отрицательной обратной связи, чтобы перевести усилитель в нестабильное состояние, что приводит к цикличному изменению сигнала на выходе от минимального до максимального напряжения питания с постоянным периодом. Частота и амплитуда колебаний определяется набором активных и пассивных компонентов, подключённых к операционному усилителю. Релаксационные генераторы генерируют колебания треугольной, пилообразной, прямоугольной, импульсной или экспоненциальной формы. При создании генераторов различными способами комбинируют положительную и отрицательную обратные связи.

Схема генератора на операционном усилителе (ОУ) изображена на рис. 1.10. Автоколебательный режим работы генератора обеспечивается за счет положительной обратной связи, которая образуется благодаря включению делителя R_2, R_3 между выходом

и неинвертирующим входом операционного усилителя. Частота выходного сигнала зависит от параметров интегрирующей цепи R_1, C_1, которая связывает выход и инвертирующий вход ОУ. Операционный усилитель в схеме генератора фактически работает как компаратор, выполняя сравнение напряжений, подаваемых на его инвертирующий и неинвертирующий входы. Кроме этого, ОУ выполняет функцию источника напряжения заряда и разряда конденсатора.

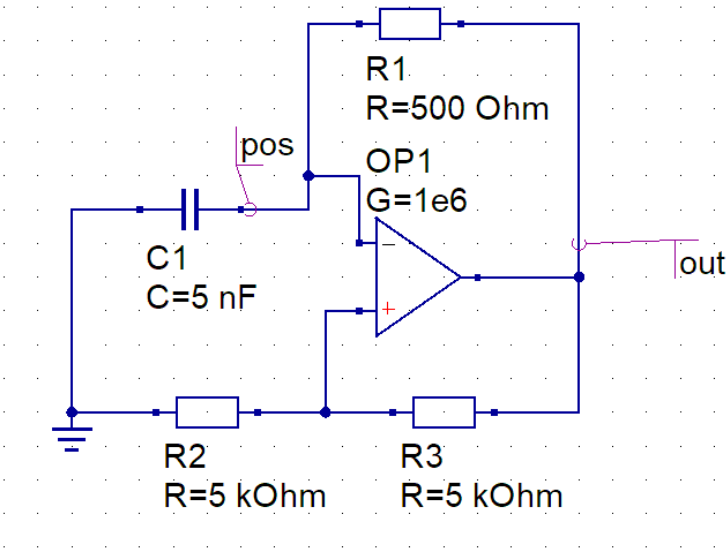


Рисунок 1.10 – Генератор прямоугольных импульсов на операционном усилителе

Если в процессе регенерации ОУ оказался в насыщении по положительной полярности и на его выходе присутствует максимальное положительное напряжение$+U_{\text{вых}.max}$. При этом напряжение на неинвертирующем входе ОУ зависит от коэффициента передачи цепи положительной обратной связи

$$g = R_2/(R_3+R_2). \tag{10}$$

И равняется $+gU_{\text{вых}.max}$. Под действием выходного напряжения ОУ происходит заряд конденсатора с постоянной времени,

$$t = RC_1, \tag{11}$$

что приводит к увеличению напряжения на инвертирующем входе. Как только это напряжение достигает уровня $+gU_{\text{вых}.max}$, происходит переключение ОУ в режим насыщения по отрицательной полярности и на его выходе появляется напряжение $-U_{\text{вых}.max}$. При этом на неинвертирующий вход через делитель R_3, R_2 подается напряжение $-gU_{\text{вых}.max}$, Отрицательное напряжение на выходе ОУ приводит к разряду и перезаряду с противоположной полярностью конденсатора C_1, что приводит к уменьшению потенциала на инвертирующем входе ОУ. Как только напряжение на конденсаторе достигает уровня $-gU_{\text{вых}.max}$, операционный усилитель снова переключается в режим насыщения по положительной полярности. Подобные процессы повторяются

периодически. При этом на выходе ОУ формируется периодическая последовательность двухполярных прямоугольных импульсов.

1.4.3 Кольцевой автогенератор

Кольцевой автогенератор – электронное устройство, состоящее из нечётного числа инвертирующих каскадов или цифровых инверторов, служащее для генерации последовательности прямоугольных импульсов. Типичная схема простейшего кольцевого автогенератора приведена на рисунке 1.11. Генерация возникает за счёт того, что коэффициент усиления цепи элементов больше единицы, а фазовая задержка более 180 градусов. Кольцевой генератор строится по одной из двух схем: либо в виде цепи из нечетного числа инверторов, либо на основе цепи с произвольным количеством дифференциальных элементов задержки, инвертирование задержанного импульса в которой осуществляется перекрестными обратными связями. Настоящему кольцевому генератору для работы требуется только питание. При превышении определенного порогового напряжения колебания начинаются самопроизвольно. Для увеличения частоты колебаний обычно используются два метода. Во-первых, создание генератора, состоящего из меньшего количества инверторов, приводит к более высокой частоте колебаний при примерно таком же энергопотреблении. Во-вторых, можно увеличить приложенное напряжение. В схемах, где может быть применен этот метод, он уменьшает задержку распространения через цепочку инверторов, увеличивая как частоту колебаний, так и потребляемый ток. Максимально допустимое напряжение, приложенное к цепям, ограничивает скорость данного генератора.

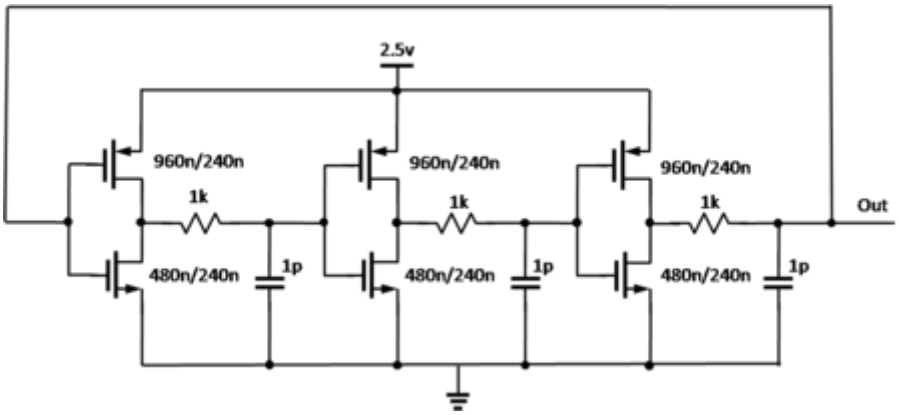


Рисунок 1.11 – Схема электрическая принципиальная простейшего кольцевого генератора

Принцип работы кольцевого генератора, основан на временной задержке, необходимой для открытия транзистора. Ни один транзистор не может переключаться мгновенно, в следствии наличия затворной емкости, которую необходимо зарядить для открытия транзистора и разрядить для закрытия. Таким образом, выходной сигнал каждого инвертора в кольцевом генераторе изменяется за некоторое конечное время после изменения сигнала на его входе. Отсюда легко увидеть, что добавление дополнительных инверторов в цепочку увеличивает общую задержку на элементе, уменьшая частоту колебаний.

Генератор с задержкой по времени состоит из инвертирующего усилителя с элементом задержки между выходом усилителя и его входом. Предположим, что входное и выходное напряжение уравновешивается в стабильной точке. Тогда возникает небольшой шум, который вызывает небольшое увеличение мощности усилителя. После прохождения через элемент временной задержки это небольшое изменение выходного напряжения появится на входе усилителя. Усилитель имеет отрицательное усиление больше 1, поэтому выходной сигнал будет изменяться в направлении, противоположном входному напряжению. Усилитель изменит свою величину, которая превышает входное значение напряжения, для усиления больше единицы. Этот усиленный сигнал распространяется от выхода через временную задержку, а затем обратно на вход, там он усиливается и опять инвертируется. В результате этого последовательного цикла получается прямоугольный сигнал на выходе усилителя с периодом каждой половины прямоугольного сигнала, равным временной задержке. Полученная прямоугольная волна будет нарастать, пока выходное значения напряжения не достигнет предела, где оно стабилизируется, т.е. волна, которая растет из начального шума, может быть не прямоугольной, но, когда усилитель достигнет своих пределов, она станет квадратной.

Кольцевые генераторы обладают сильной зависимостью частоты от питающего напряжения и температуры, а также от свойств транзисторов из которых построены цифровые инверторы. Это свойство, однако, применяется в интегральных микросхемах для контроля параметров процесса. Небольшой тестовый блок, состоящий из типичных элементов, как инвертора, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, элементов, объединенных в кольцевые генераторы, генерируют набор сигналов, измерение частоты которых дает информацию о задержках каждого из элементов данного процесса, напряжения питания и температуры.

1.5 Постановка задачи

На основе проведенного литературного обзора принято решение, о том, что среди рассмотренных схемотехнических решений автогенераторов наиболее перспективным для реализации в виде СФ-блока является схема на основе кольцевого автогенератора, поскольку она обеспечивает максимальную простоту схемотехнической реализации, минимальный размер на кристалле, а также широкий диапазон пристройки выходной частоты автогенератора.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка СФ-блока автогенератора на основе кольцевого автогенератора, удовлетворяющего техническим требованиям, приведенным в таблице 1, для применений в составе аналоговых контроллеров питания, ШИМ-контроллерах.

Таблица 1 – Технические требования к СФ-блоку автогенератора

Параметр	**Значение**
Напряжение питания, В	3.3 – 4
Диапазон рабочих температур	0 – +125 ℃
Частотный диапазон перестройки автогенератора, не менее, МГц	1 – 40
Точность частоты автогенератора в рабочем диапазоне напряжений питания и температур, %	3
Диапазон управляющих напряжений, В	0-2,6

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать схему электрическую принципиальную блока автогенератора, обеспечивающую электрические параметры, приведенные в таблице 1.
2. Разработать схему электрическую принципиальную блока термостабилизации автогенератора.
3. Исследовать и проанализировать электрические и эксплуатационные параметры разработанного СФ-блока автогенератора на соответствие техническим требованиям, приведенным в таблице 1.

2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Маршрут проектирования СФ-блока в данной работе, состоит из трех этапов:

1. Определение концепции и принципов функционирования СФ-блока автогенератора.
2. Проектирование схемы электрической принципиальной СФ-блока автогенератора с использованием САПР Cadence Virtuoso.
3. Верификация СФ-блока на основе кольцевого автогенератора на соответствие техническим требованиям.

Средой разработки интегральной схемы являлся САПР Cadence Virtuoso – комплексное программное обеспечение для проектирования интегральных схем. С его помощью разработчики могут создавать и оптимизировать сложные микроэлектронные системы. Virtuoso разработан компанией Cadence Design Systems и является одной из наиболее распространенных и универсальных платформ для разработки интегральных схем. Cadence Virtuoso включает в себя множество инструментов для проектирования и управления ИС и ИМС. Эти инструменты включают в себя средства для разработки цифровых, аналоговых и смешанных схем, а также средства моделирования, анализа и верификации. В Virtuoso встроены компоненты для создания макросхем, интеграции технологических процессов и средства для работы с данными. Основными компонентами системы Virtuoso являются:

Virtuoso Layout Editor — это графический редактор, который позволяет разработчикам создавать или редактировать многослойные интегральные микросхемы. Он имеет мощный функционал для обработки сложных сигналов и управления соединением элементов.

Virtuoso Schematic Editor — это графический редактор, который позволяет разработчикам создавать и редактировать графические схемы.

Virtuoso Analog Design Environment (ADE) — это среда для создания и оптимизации аналоговых схем. Он позволяет разработчикам применять широкий спектр частотных и мокроточных аналоговых схем.

Virtuoso Verification Environment — это среда для моделирования, верификации и анализа сложных интегральных схем. Он позволяет разработчикам проверять работу схем, решать проблемы с задержками и шумами, и разрабатывать стратегии тестирования.

Лицензионный доступ к САПР Cadence предоставлялся НИ МИЭТ в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы

«Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW». В рамках данной программы был предоставлен дизайн-кит HCMOS8D ПАО «Микрон». Проектирование интегральной схемы (ИС) выполнялось на основе базовой технологии HCMOS8D CMOS 0,18 мкм 200, предназначенной для производства высокопроизводительных универсальных микроконтроллеров и микропроцессоров, СБИС памяти, цифро-аналоговых преобразователей и аналого-цифровых преобразователей. Дизайн-кит представлял набор моделей, библиотек элементов и их топологических представлений, на основе которых создаются интегральные схемы. Библиотека элементов дизайн кита HCMOS8D состояла из множества элементов, однако в рамках данной работы были использованы:

- *n*-канальные МОП транзисторы ввода-вывода с рабочим напряжением 3,3 В,
- *p*-канальные МОП транзисторы ввода-вывода с рабочим напряжением 3,3 В,
- диффузионные резисторы,
- биполярные *pnp* транзисторы,
- конденсаторы,
- диоды.

Методика проектирования заключалась в использовании ряда классических схемотехнических решений и базовых элементов дизайн-кита HCMOS8D с целью создания СФ-блока термостабильного автогенератора с управляемой частотой. Классические схемотехнические решения были реализованы на основе базовых элементов дизайн-кита HCMOS8D, с помощью модуля Schematic XL. Полученные схемы электрические принципиальные моделировались в ADE L. Моделирование схем производилось во временной области (transient analysis), и на постоянном токе (dc analysis). По результатам моделирования оценивалась корректность работы схемы принципиальной и принималось решение по ее оптимизации. Оптимизация заключалась в подборе размеров транзисторов (соотношение W/L), номинальных сопротивлений и размеров резисторов, итд.

3. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СФ-БЛОКА АВТОГЕНЕРАТОРА

3.1 Разработка блока автогенератора

СФ-блок автогенератора построен на основе кольцевого генератора. Кольцевой автогенератор работает на основе колебаний, возникающих внутри кольца инверторов – простых цифровых логических элементов. Схема инвертора приведена на рисунке 3.1. Каждый инвертор в кольцевом автогенераторе создает задержку сигнала, за счет времени перезарядки затворных емкостей. Каждый инвертор создает набег фазы сигнала в 180 градусов. При последовательном подключении нечетного числа инверторов и организации цепи отрицательной (между входом и выходом автогенератора) создается автоколебальный контур.

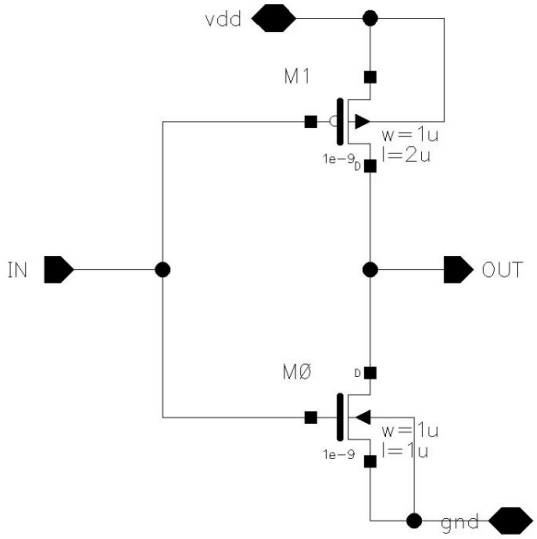


Рисунок 3.1 – Схема инвертора

Однако при большом числе инверторов, увеличивается общее время задержки на инверторе, а следовательно, уменьшается частота колебаний на выходе кольцевого автогенератора. Период колебания определяется временем распространения сигнала через всю цепочку инверторов. Математически, если задержка одного инвертора равна t_{inv}, а число инверторов N, то период T колебаний будет выражаться следующей формулой [13]:

$$T = 2t_{inv}N, \tag{12}$$

Следовательно, увеличение числа инверторов приводит к увеличению периода колебаний T, а значит, к уменьшению частоты колебаний и, соответственно, частоты на

выходе кольцевого автогенератора. На рисунке 3.2 приведена зависимость частоты на выходе автогенератора от числа инверторов, полученная в ходе моделирования в САПР.

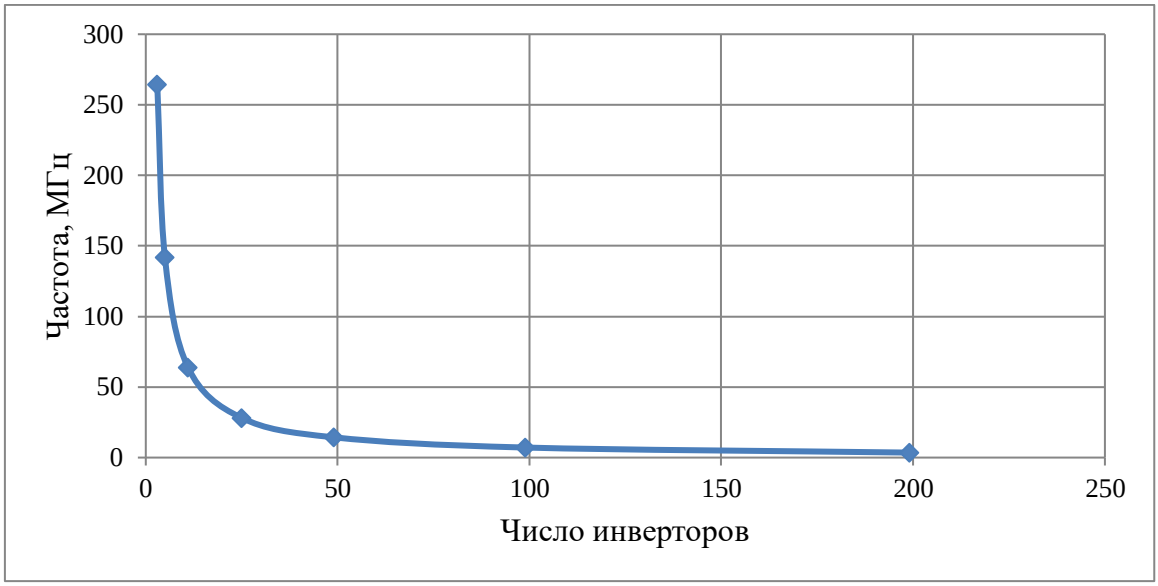


Рисунок 3.2 – Зависимость частоты от числа инверторов

Кольцевой генератор обладает сильной зависимостью частоты от питающего напряжения и температуры, а также от свойств транзисторов, на основе которых построены инверторы. Это свойство, однако, применяется в интегральных микросхемах для контроля параметров процесса. Для снижения зависимости от частоты от температуры кольцевой автогенератор стабилизируют во всем диапазоне рабочих температур и напряжений питания.

В САПР Cadence Virtuoso был построен кольцевой генератор на основе трех инверторов, соединенных последовательно. Инверторы состоят из 2 транзисторов *p* и *n* типа. Транзистор *p*-типа имеет размеры:

Ширина канала – 1 мкм,

- Длина канала – 2 мкм.

Транзистор *n*-типа имеет:

- Ширина канала – 1 мкм,
- Длина канала – 1 мкм.

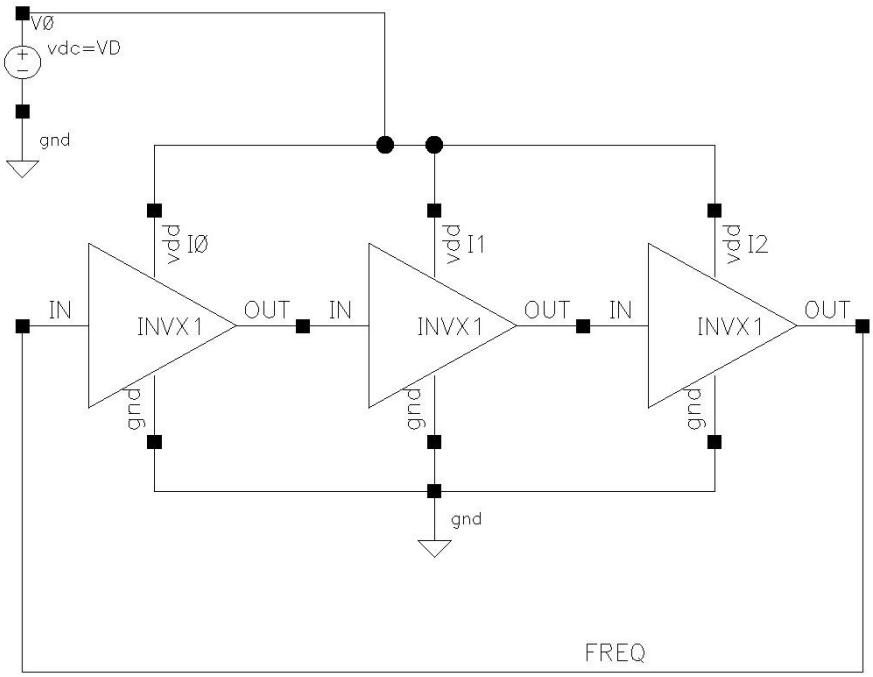
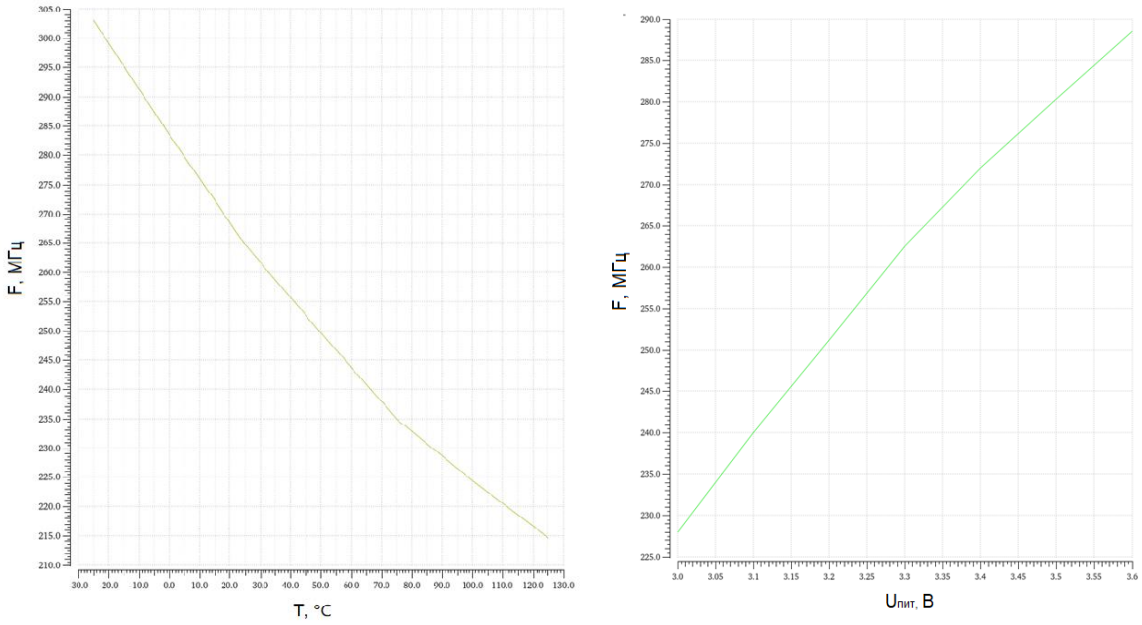


Рисунок 3.3 – Схема электрическая принципиальная кольцевого генератора

Схема электрическая принципиальная кольцевого генератора приведена на рисунке 3.3. Было проведено моделирование, в результате которого, были получены графики зависимости частоты генерации от температуры в диапазоне -25 - +125 °С при напряжении питания 3.3 В (рисунок 3.4а), а также зависимость частоты генерации от напряжения питания в диапазоне 3-3,6 В при температуре 30 °С (рисунок 3.4б).



а б

Рисунок 3.4 – Зависимость частоты автогенератора от вариаций: а – температуры; б – напряжения питания

Из рисунка 3.4а можно сделать вывод, что при увеличении температуры частота уменьшается на 10-20 МГц каждые 25 °С. Из рисунка 3.4б можно сделать вывод, при увеличении питающего напряжения частота линейно увеличивается на 12 МГц каждые 0.1 В.

Была построена модифицированная схема автогенератора с управляемой частотой генерации, состоящая из 5 последовательно соединённых каскадов инверторов (рисунок 3.5) и цепей управления частотой.

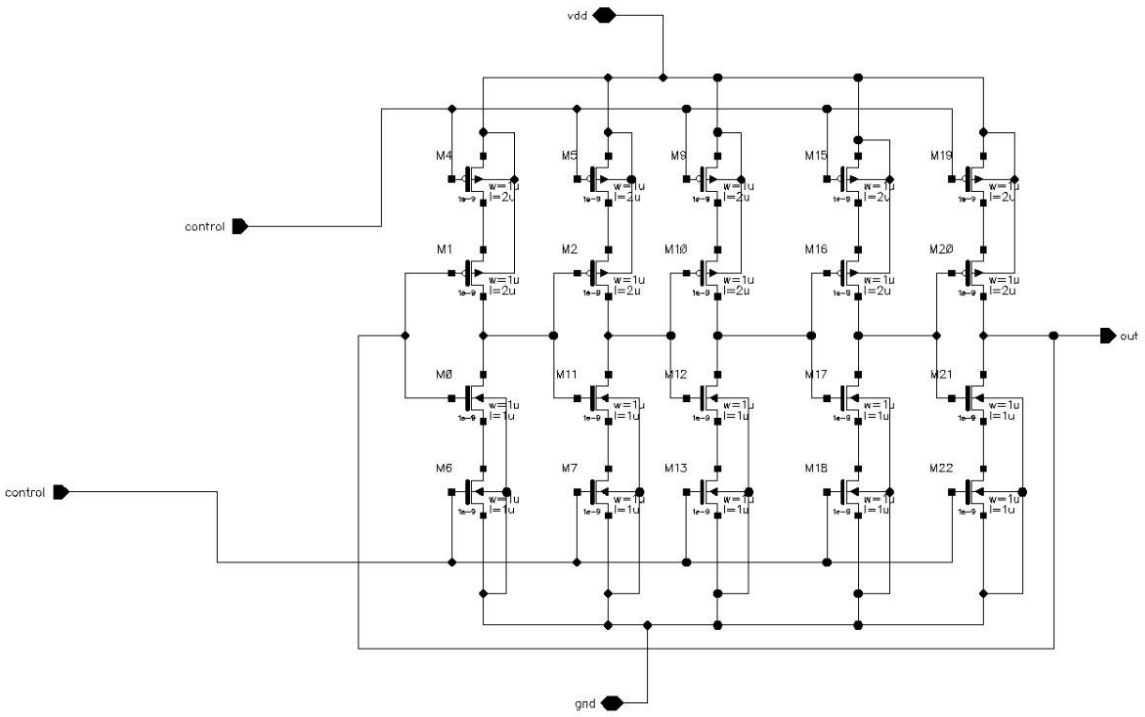


Рисунок 3.5 – Схема электрическая принципиальная автогенератора

Необходимо провести ряд исследований, чтобы оценить степень влияния верхних (M4, M5, M9, M15 и M19) и нижних (M6, M7, M13, M18, M22) управляющих транзисторов на выходную частоту автогенератора.

Для оценки влияния верхних ключей был проведен следующий эксперимент. Выполнялось моделирование в временной области; время моделирования составляло 10 мкс; с помощью встроенных в САПР математических функций регистрировалась выходная частота на выводе «out». Напряжение на затворах верхних управляющих транзисторов изменялось в диапазоне 0 – 2,5 В, при неизменном напряжении 3,3 В на затворах нижних транзисторов.

В результате моделирования была получена зависимость частоты выходного сигнала автогенератора от различных напряжений на затворах верхних транзисторов (рисунок 3.6).

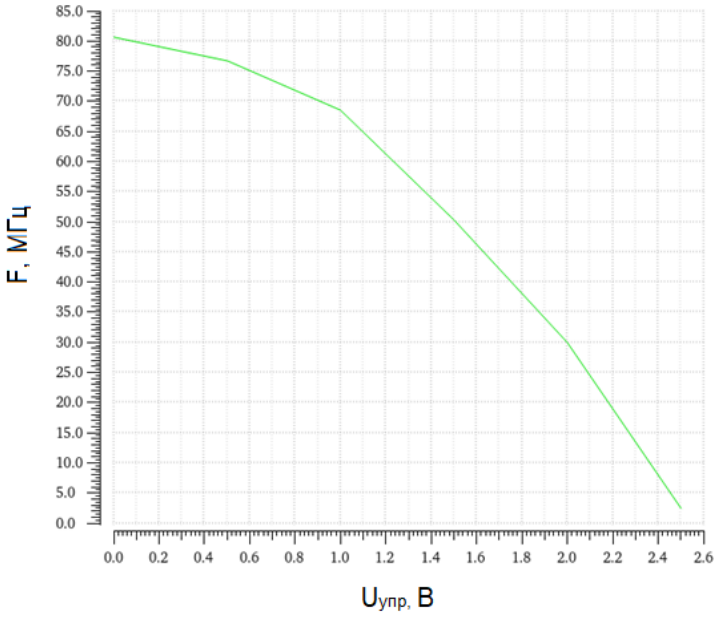
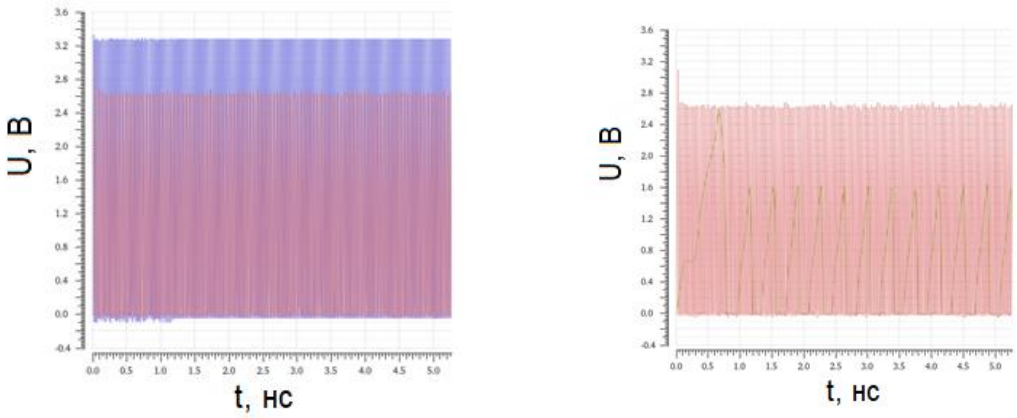


Рисунок 3.6 – Зависимость частоты от напряжения питания верхних каскадов

При изменении управляющего напряжения на верхних транзисторах в диапазоне 0-2,5 В, частота сигнала уменьшается с 80 до 3 МГц. На рисунке 3.7 представлена осциллограмма напряжений на выходе автогенератора. Из рисунка 3.7 видно, что с увеличением управляющего напряжения амплитуда на выходе автогенератора уменьшается и при управляющем напряжении 2,5 В достигает величины не более 1,6 В. Такой амплитуды явно недостаточно для дальнейшего использования, поскольку пороговое напряжение открытия транзисторов, используемых в данной работе не превышает 0,9 В. Следовательно, необходимо работать с диапазоном напряжений на выходе автогенератора 1,65 – 3,3 В, что обусловлено общепринятой инженерной практикой.



а б

Рисунок 3.7 – Осциллограммы на выходе автогенератора для различных значений управляющих напряжений: а – при управляющих напряжениях 1,5 В (синим) и 2 В (красным); б – при управляющих напряжениях 2 В (красным) и 2,5 В (желтый)

Было проведено аналогичное моделирование для нижних управляющих транзисторов. Напряжение на затворах нижних транзисторов изменялось в диапазоне от 0 – 3,3 В, при неизменном напряжении 0 В на верхних транзисторах. В результате была получена зависимость, представленная на рисунке 3.8. Из графика видно, что при увеличении напряжения частота сигнала растёт в диапазоне 0 – 82 МГц.

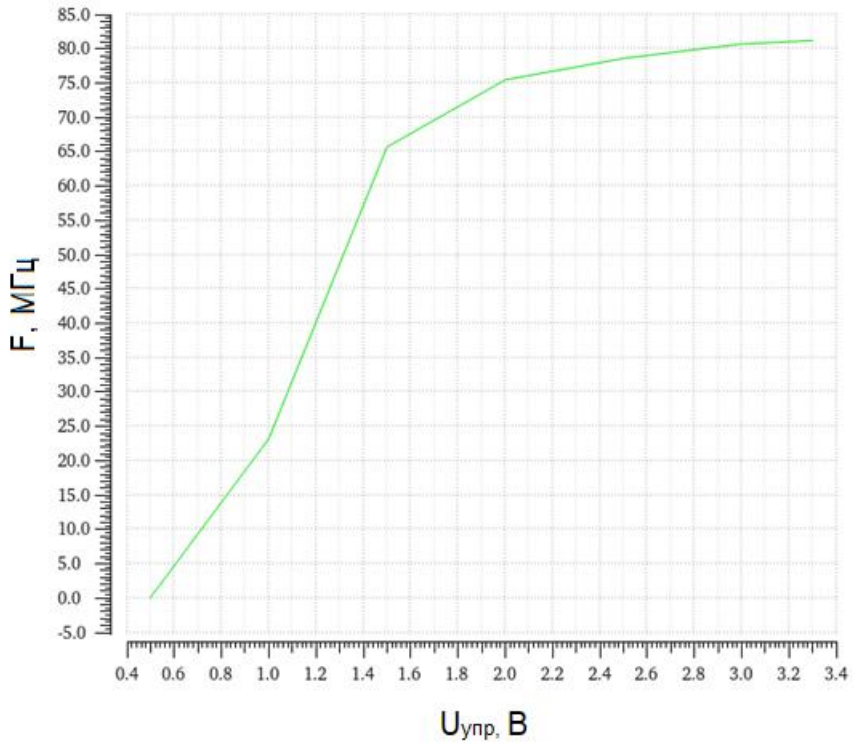
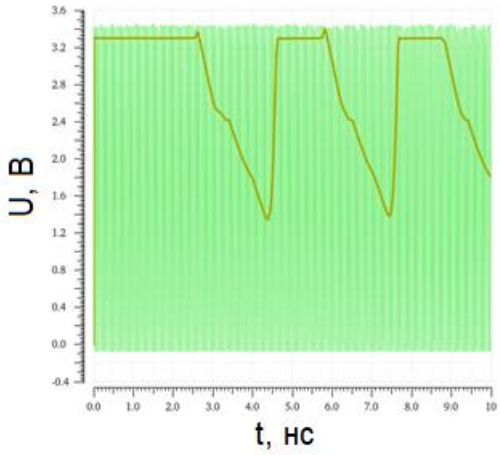


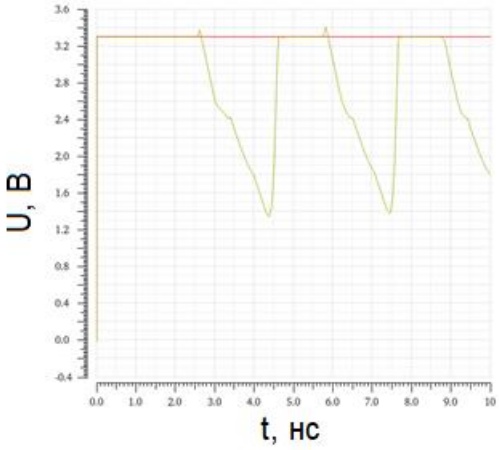
Рисунок 3.8 – Зависимость частоты от напряжения питания нижних каскадов

В диапазоне управляющих напряжений 0,5 – 1,5 В частота автогенератора линейно возрастает с 0 до 66 МГц, а в диапазоне от 1,5 до 3,3 В – крутизна характеристики снижается, а выходная частота изменяется в диапазоне 66 – 82 МГц.

На рисунке 3.9 представлены осциллограммы напряжений на выходе автогенератора.



а



б

Рисунок 3.9 – Осциллограммы на выходе автогенератора для различных значений управляющих напряжений: а – при управляющих напряжениях 0 В (красным) и 0,5 В (желтым); б – при управляющих напряжениях 0,5 В (желтым) и 1 В (зеленым)

Из рисунка 3.9 видно, что с увеличением управляющего напряжения амплитуда на выходе автогенератора увеличивается.

Проведенные исследования показали, что увеличение управляющего напряжения приводит к росту частоты автогенератора при его подаче на нижние ключи и к снижению частоты при подаче управляющего напряжения. Для согласованного управления частотой автогенератора необходимо разработать промежуточную управляющую цепь, которая преобразует входные управляющие сигналы в сигналы, пригодные для подачи на верхние и нижние управляющие транзисторы. Исходя из проведенных исследований можно сформулировать требования к выходным управляющим сигналам: на затворы нижних транзисторов необходимо подавать диапазон напряжений 0,5 – 3,3 В и диапазон напряжений на затворы верхних транзисторов 0 – 2 В.

В исходную схему автогенератора была добавлена промежуточная цепь управления, состоящая из 2 полевых транзисторов (M24, M25) *p* и *n* (рисунок 3.10).

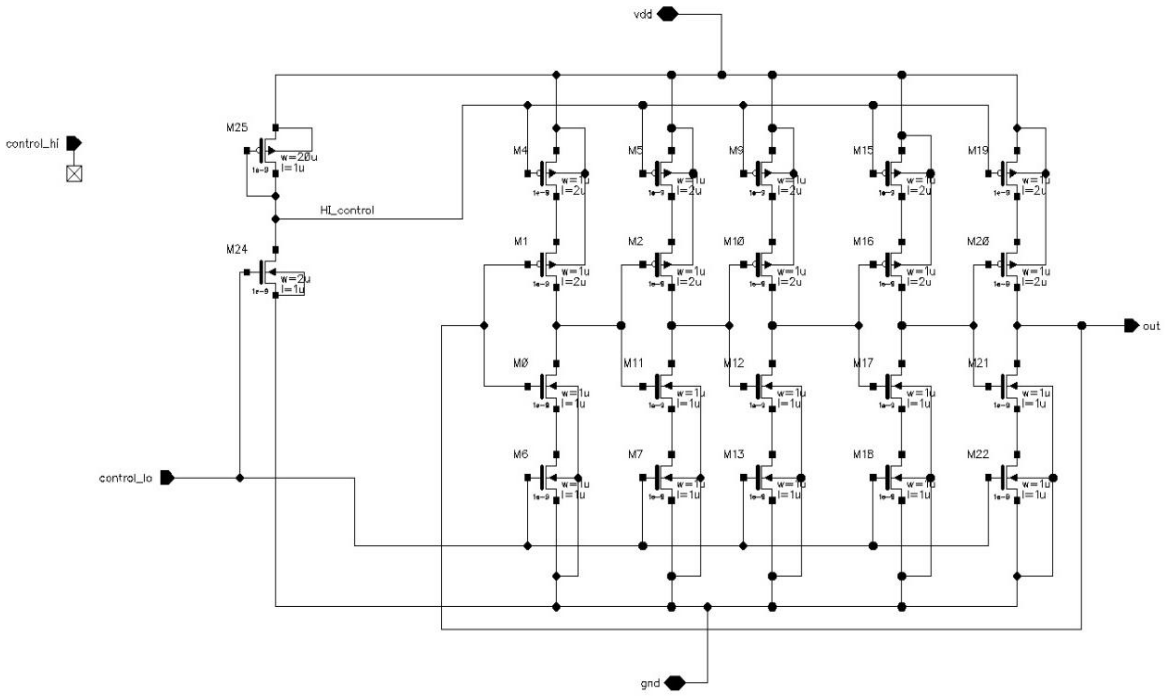


Рисунок 3.10 – Схема электрическая принципиальная автогенератора

Ширина и длина канала полевого транзистора оказывают прямое влияние на его электрические параметры, в частности на сопротивление канала транзистора. Чем длиннее и уже канал транзистора, тем больше сопротивление, и, следовательно, больше падение напряжения в канале, при том же уровне тока в канале. Таким образом, чтобы уменьшить падение напряжения в канале транзистора, необходимо увеличить ширину канала или уменьшить его длину, но при этом следует помнить об ограничениях, таких как мощность и тепловыделение транзистора.

Было проведено моделирование, в ходе которого ширина канала (*W*) транзистора M25 изменялась в диапазоне 2-20 мкм. Были получены зависимости частоты от напряжения питания при различной ширине канала верхнего ключа (рисунок 3.11).

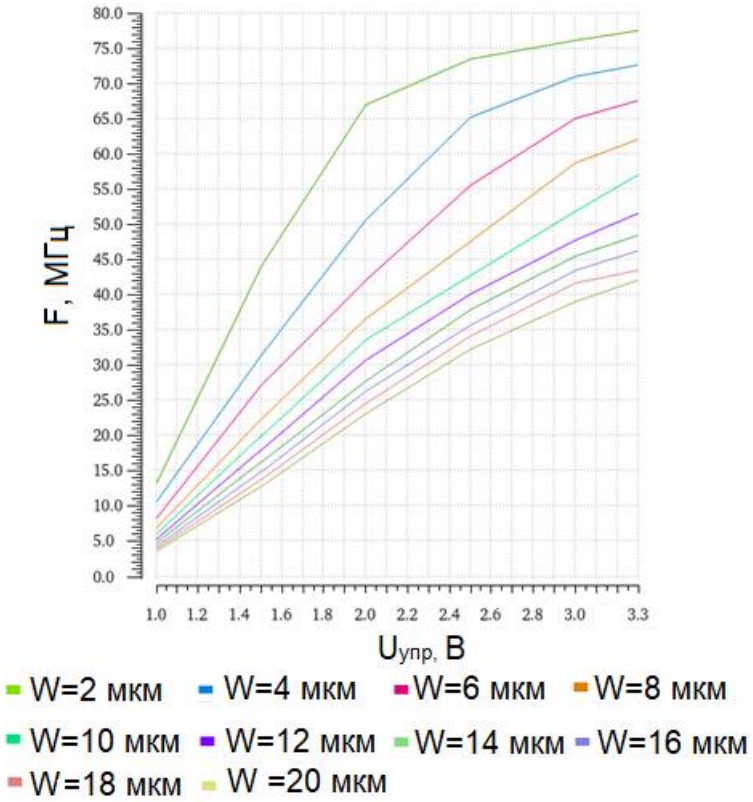


Рисунок 3.11 – Зависимость частоты на выходе автогенератора от управляющего напряжения при различной ширине канала верхнего ключа (М25)

Из рисунка 3.11 видно, что при ширине канала верхнего ключа равной 20 мкм, частота генерации линейно возрастает в диапазоне 3 – 43 МГц. При дальнейшем увеличении ширины канала линейность в диапазоне управляющих напряжений 1-3,3 В снижается, а диапазон перестройки – возрастает.

Было проведено аналогичное моделирование для транзистора М24 в ходе которого ширина канала (*W*) изменялась в диапазоне 2 – 20 мкм. Были получены зависимости частоты от напряжения питания при различной ширине канала нижнего ключа (рисунок 3.12). Из графика видно, что при ширине канала нижнего ключа 2 мкм, зависимость растет линейно в диапазоне управляющих напряжений 1-3,3 В.

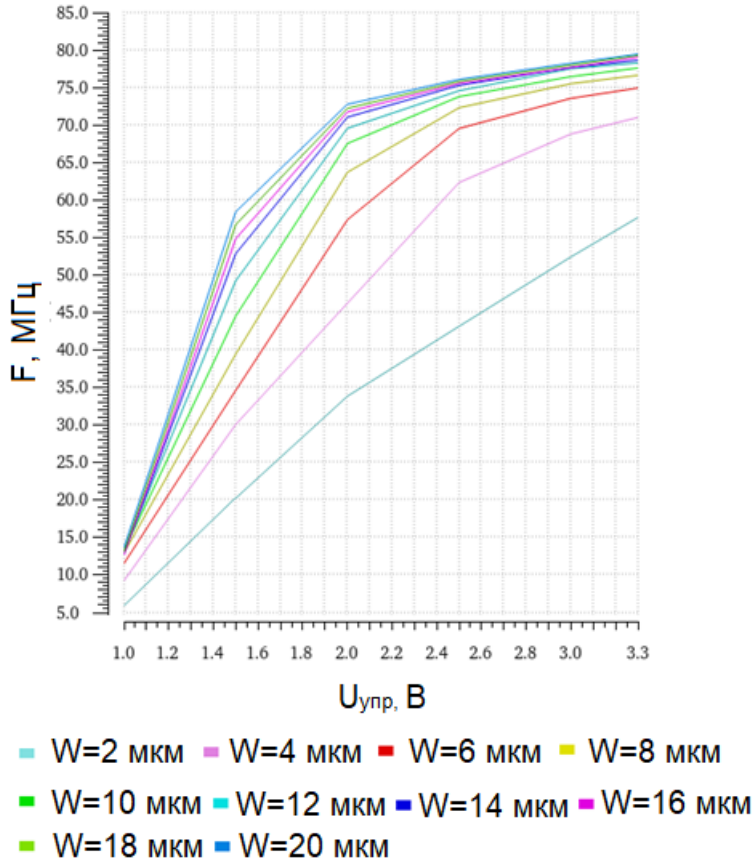


Рисунок 3.12 – Зависимость частоты на выходе автогенератора от управляющего напряжения при различной ширине канала нижнего ключа (М24)

Было проведено дополнительное моделирование в ходе которого изменялась длина канала (L) нижнего ключа в диапазоне 1 – 20 мкм. В результате были получены зависимости, представленные на рисунке 3.13. Из данных зависимостей видно, что наибольшая линейность частоты в диапазоне управляющих напряжений 1-3,3 В наблюдается при длине канала 1 мкм.

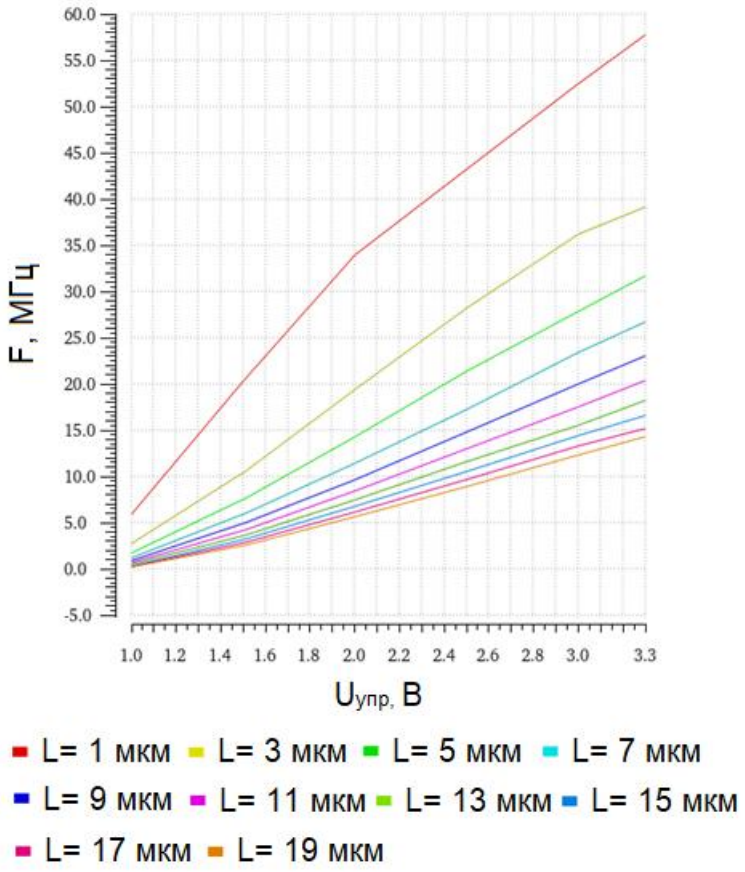


Рисунок 3.13 – Зависимость частоты на выходе автогенератора от управляющего напряжения при различной длине канала нижнего ключа (М24)

Исходя из проведенных исследований и полученных зависимостей были определены наиболее оптимальные параметры блока автогенератора:

- Размеры транзисторов и в инверторах кольцевого генератора;
- Размеры управляющих транзисторов.

Итоговая схема кольцевого автогенератора приведена на рисунке 3.14.

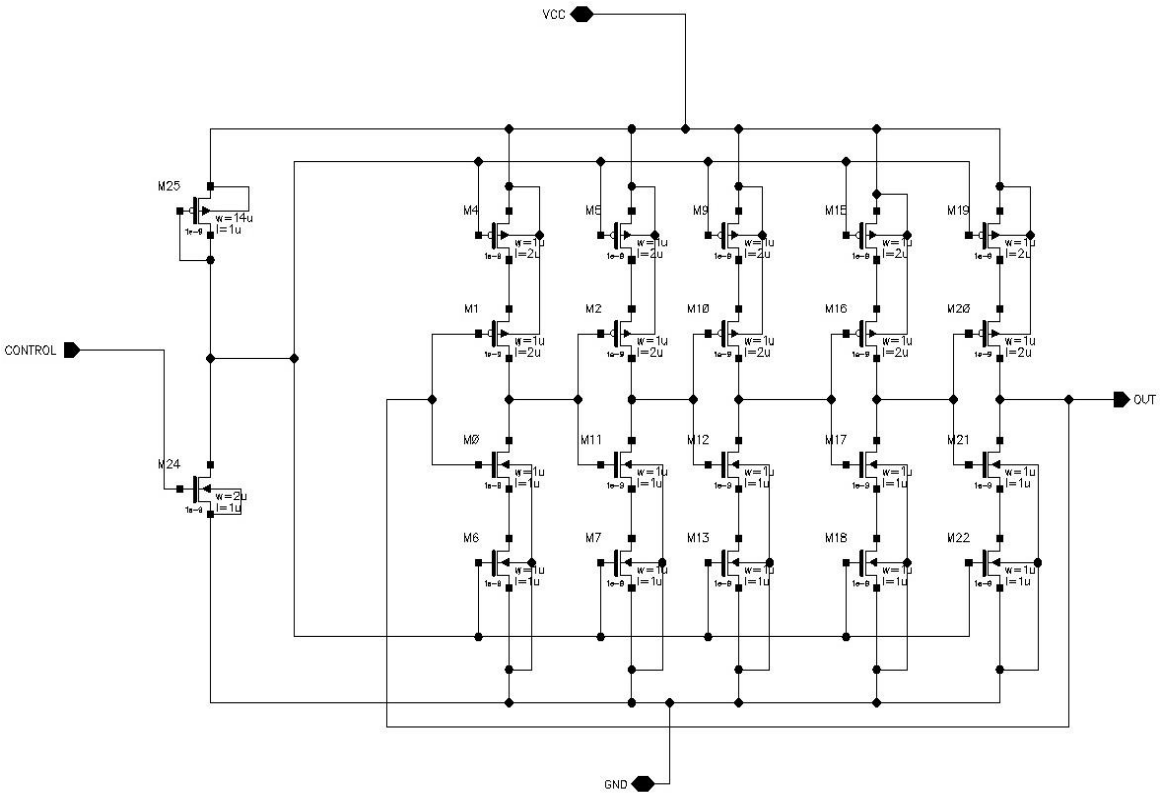
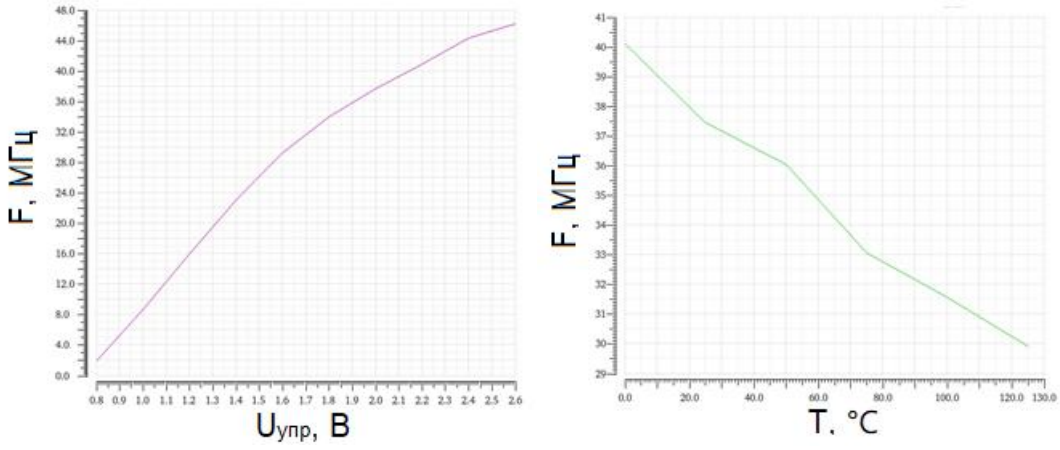


Рисунок 3.14 – Финальная схема кольцевого автогенератора с цепью управления

Кольцевой генератор состоит из пяти последовательно соединенных инверторов, построенных на основе транзисторов *p* и *n* типа, с размерами W=1 мкм, *L* = 2 мкм для транзисторов *p* – типа и *W*=1 мкм, *L* = 1 мкм для транзисторов *n* – типа. Схема управления частотой автогенератора состоит из транзисторов M24, M25 с размерами *W*=2 мкм, *L* = 1 мкм и *W*=14 мкм, *L* = 1 мкм соответственно. Управление частотой автогенератора осуществлялось с помощью внешнего управляющего напряжения с диапазоном 0-2,6 В. В результате моделирования кольцевого генератора с цепью управления была получена зависимость, представленная на рисунке 3.15. Из графика видно, что заявленное управляющее напряжение обеспечивает диапазон частотной пристройки 1 – 46 МГц.



а б

Рисунок 3.15 – Зависимость выходной частоты автогенератора от управляющего напряжения (а); зависимость выходной частоты автогенератора от температуры (б)

3.2 Разработка блока термостабилизации

Температурные изменения существенно влияют на рабочую частоту автогенератора. Ранее на рисунке 3.15(б) была показана зависимость частоты кольцевого автогенератора от температуры: при увеличении температуры с 0 до 125 °С выходная частота снижается в 1,4 раза. Снижение частоты автогенератора обуславливается увеличением сопротивлений каналов транзисторов, образующих автогенератор, в следствии чего возрастает постоянная времени эквивалентной RC цепи (τ_{RC}). Для обеспечения точности генерируемой частоты не хуже 3 % (согласно поставленной задаче), необходимо разработать схему термостабилизации автогенератора.

Термостабилизация автогенератора основана на использовании компенсационных элементов, которые изменяют свою проводимость при изменении температуры. Компенсационные элементы имеют свойство изменять свою проводимость таким образом, чтобы компенсировать изменения температуры. Когда температура изменяется, энергия проводимости и ширина запрещенной зоны полупроводника также изменяются. В литературе различают два типа компенсационных элементов – прямо пропорциональных абсолютному изменению температуры (proportional to absolute temperature – PTAT) и обратно пропорциональных абсолютному изменению температуры (complementary to absolute temperature - CTAT).

CTAT-элементами бандгапов, выполненных как по биполярной, так и по КМОП-технологии, обычно служат биполярные *npn*-транзисторы в диодном включении. Если через такой диод протекает постоянный прямой ток, заданный внешним источником, то

напряжение на переходе база-эмиттер $V_{БЭ}$ убывает с ростом температуры. Для кремниевых диодов и транзисторов ТКН $V_{БЭ}$ составляет примерно −2 мВ/К (с ростом температуры на один градус напряжение база-эмиттер падает на 2 мВ). В первом приближении зависимость $V_{БЭ}(T)$ можно считать линейной. Если экстраполировать эту линейную зависимость в область низких температур, то при абсолютном нуле (0 К) прямая $V_{БЭ}(T)$ пересечёт ординату при значении напряжения, равном ширине запрещённой зоны полупроводника E_g. При T = 0 К для чистого монокристаллического кремния E_g=1,17 эВ, а для кремния с типичными для аналоговых ИС концентрациями легирующих примесей E_g=1,143 эВ. На рисунке 3.16 приведен график температурной зависимости выходного напряжения СТАТ элемента, а также его схема электрическая принципиальная.

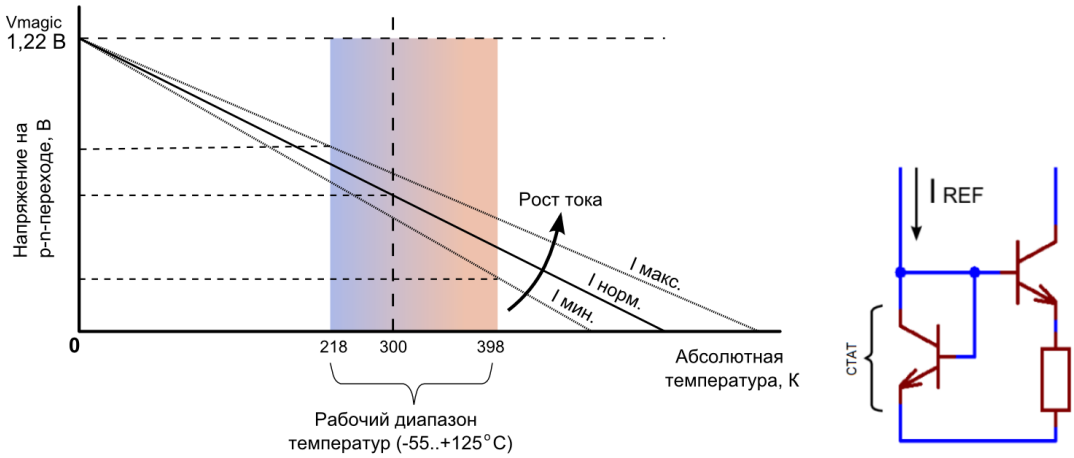


Рисунок 3.16 – Температурная зависимость выходного напряжения СТАТ элемента

PTAT-элементы бандгапов строятся на парах кремниевых биполярных транзисторов в диодном или транзисторном включении. В КМОП-микросхемах возможно применение как биполярных транзисторов, так и МОП-транзисторов в режиме слабой инверсии. В этом режиме вольтамперная характеристика (ВАХ) МОП-транзистора экспоненциально возрастает с ростом напряжения, аналогично ВАХ обычного диода. Один транзистор PTAT-пары работает при большей плотности тока, другой при меньшей, причём отношение двух плотностей тока χ (хи малое) постоянно во всех режимах работы. При равных температурах обоих переходов разница между напряжениями на них равна

$$\Delta V = \frac{kT}{q} ln(\chi), \tag{13}$$

где k — постоянная Больцмана,

q — заряд электрона.

Принципиально важно то, что ΔV транзисторной пары зависит только от её геометрии, от соотношения токов (то есть χ) и температуры. Она мало зависит от разброса технологических параметров, который одинаково влияет на оба транзистора пары, и от абсолютных величин токов. Экспоненциальная зависимость тока от напряжения по формуле Шокли выведена за скобки: разность напряжений на переходах определяется простой линейной функцией от температуры.

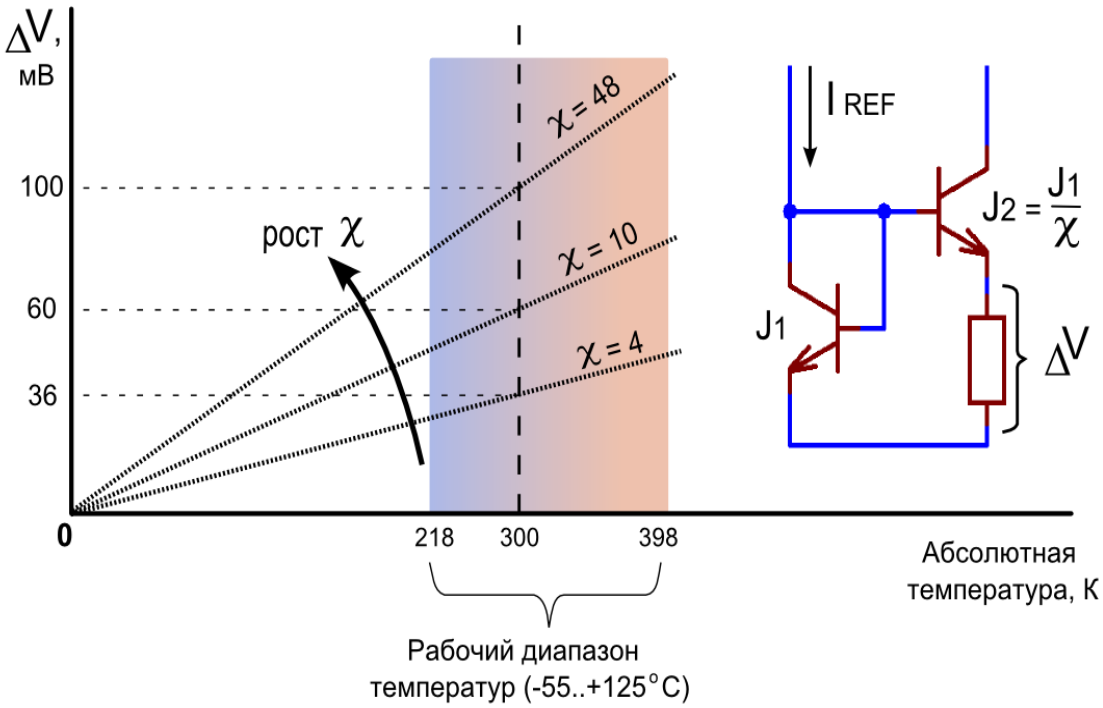


Рисунок 3.17 – Температурная зависимость выходного напряжения PTAT элемента

В предыдущем разделе, на рисунке 3.15 были приведены зависимости частоты генерации от управляющего напряжения и частоты генерации от температуры. Концепция термостабилизации выходной частоты состоит в том, чтобы подать на затворы управляющих транзисторов скомпенсированный управляющий сигнал, который будет состоять из двух составляющих:

1. управляющее напряжение, задающее частоту автогенератора;
2. поправка на абсолютное изменение температуры.

Управляющее напряжение должно подаваться из внешней цепи, через входной СФ-блок, и должно преобразовываться в сигнал, пригодный для управления автогенератором (диапазон напряжений 0-2,6 В). Так как частота автогенератора убывает при увеличении температуры, компенсирующее управляющее напряжение должно возрастать с увеличением температуры. Исходя из этого, цепь термокомпенсации должна иметь характер PTAT источника.

Принцип действия бандгапа основан на арифметическом сложении двух напряжений: напряжения на прямо смещённом p-n-переходе, которое при заданном токе линейно убывает с ростом температуры, и комплементарного ему напряжения на другом схемном элементе, которое прямо пропорционально абсолютной температуре.

На рисунке 3.18 приведена управляющая схема автогенератора.

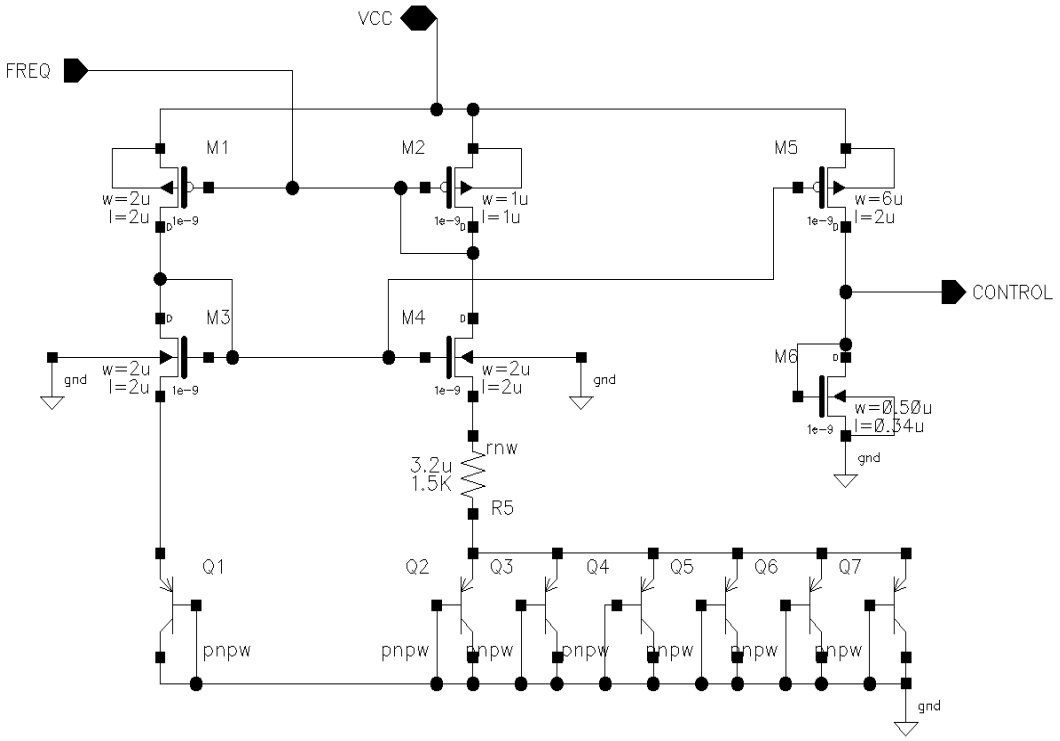


Рисунок 3.18 – Управляющая схема автогенератора

Управляющая схема состоит из токового зеркала, построенного на транзисторах (M1-M4). Токовое зеркало является самосмещенным, за счет того, что ток, протекающий через зеркало, сначала задается парой транзисторов p-типа, причем ток задающим элементом является транзистора M2, а затем парой транзисторов n-типа. Ток такого самосмещенного токового зеркала задается с помощью подбора размеров транзисторов, образующих его. Внешнее управляющее напряжение, подаваемое на затвор транзистора M99, задает смещение всей схемы и позволяет управлять выходным напряжением. Снизу к токовому зеркалу подключена нагрузка, состоящая из двух ветвей. Первая ветвь состоит из одного биполярного транзистора (Q1), в диодном включении. Вторая ветвь состоит из биполярных транзисторов в диодном включении Q2-Q7, подключенных параллельно и резистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При сложении двух напряжений через буфер, состоящий из транзисторов M5, M6, получается, что данные

ветви компенсируют друг друга и управляющая цепь выдает стабильное управляющее напряжение, не зависящее от температуры.

На рисунке 3.19 приведены температурные зависимости выходных напряжений, выдаваемых цепью термокомпенсации при различных уровнях входных управляющих напряжений.

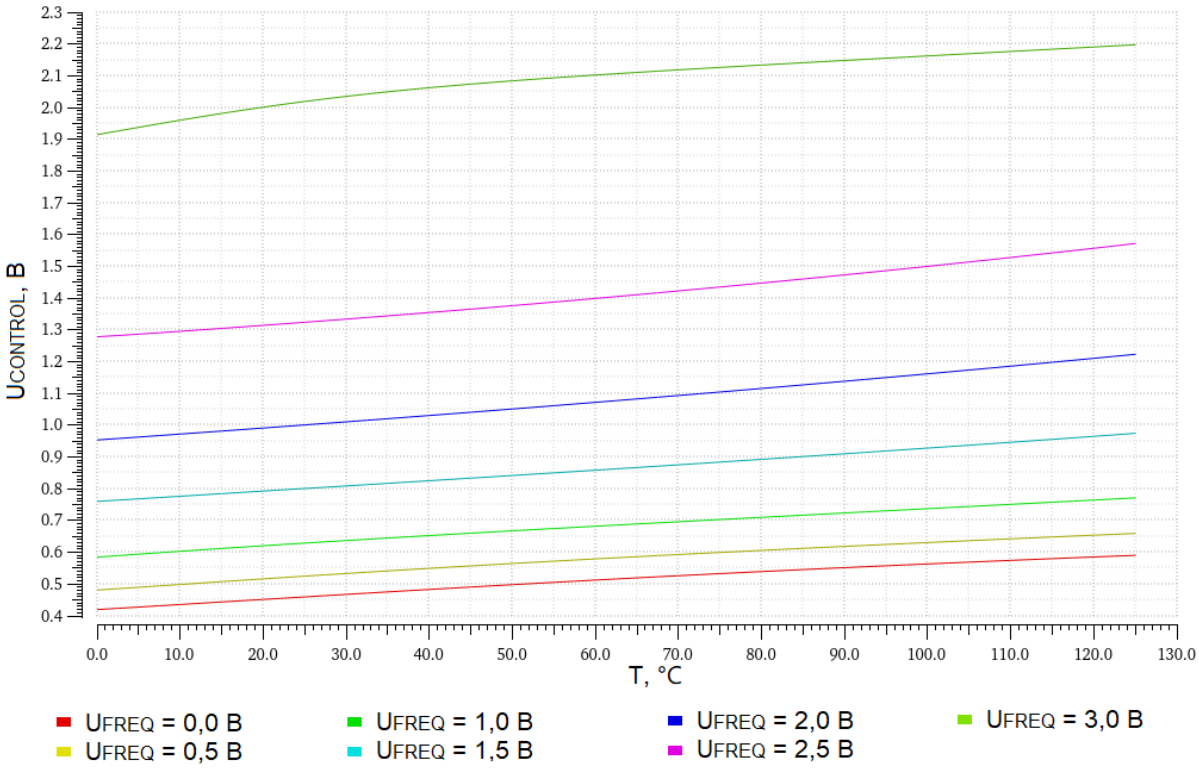


Рисунок 3.19 – Зависимости выходных напряжений при различных уровнях входных управляющих напряжений

3.3 Результаты проектирования и их анализ

Финальная схема электрическая принципиальная СФ-блока автогенератора представляет собой комбинацию схемы перестраиваемого по частоте автогенератора и схему термостабилизации (рисунок 3.20). Схема имеет выводы VCC и gnd для подключения питания, вывод SET для управления частотой автогенератора, а также вывод OUT с которого регистрируется переменный сигнал. Управление частотой осциллятора осуществляется, с помощью генератора пилообразного напряжения через вывод FREQ.

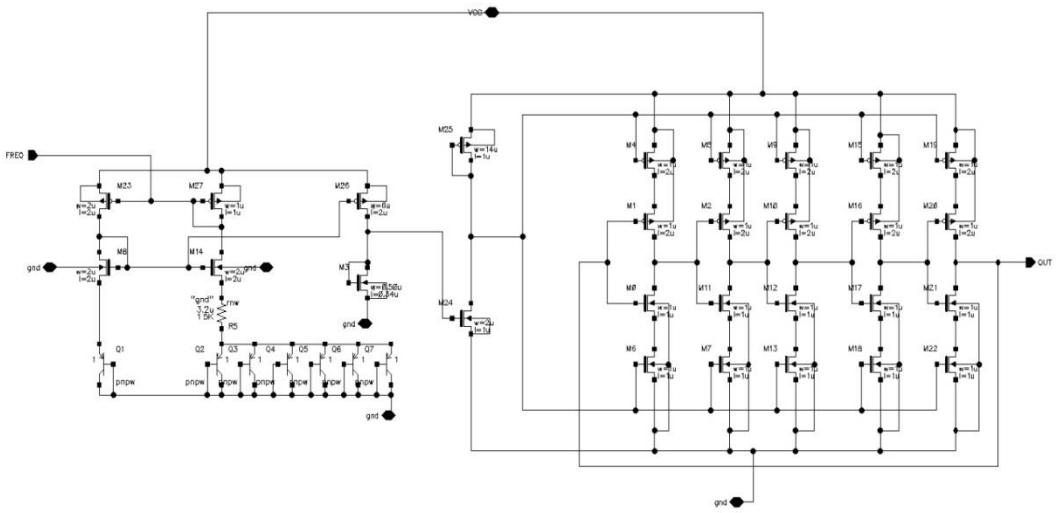


Рисунок 3.20 – Схема электрическая принципиальная СФ-блока автогенератора

На рисунке 3.21 приведена зависимость частоты автогенератора от управляющего напряжения, подаваемого на вывод FREQ при различных температурах. Управление частотой автогенератора осуществлялось с помощью управляющего напряжения в диапазоне 0-2,6 В. Это позволило управлять частотой автогенератора в диапазоне 1-46 МГц. Перестройка осуществлялась линейно с коэффициентом пропорциональности -20 кГц/мВ. Из рисунка 3.21 видно, что при изменении температуры в рабочем диапазоне температур 0-125 °С флуктуации выходной частоты происходят на величину не более 3% от частоты при рабочей температуре 25 °С.

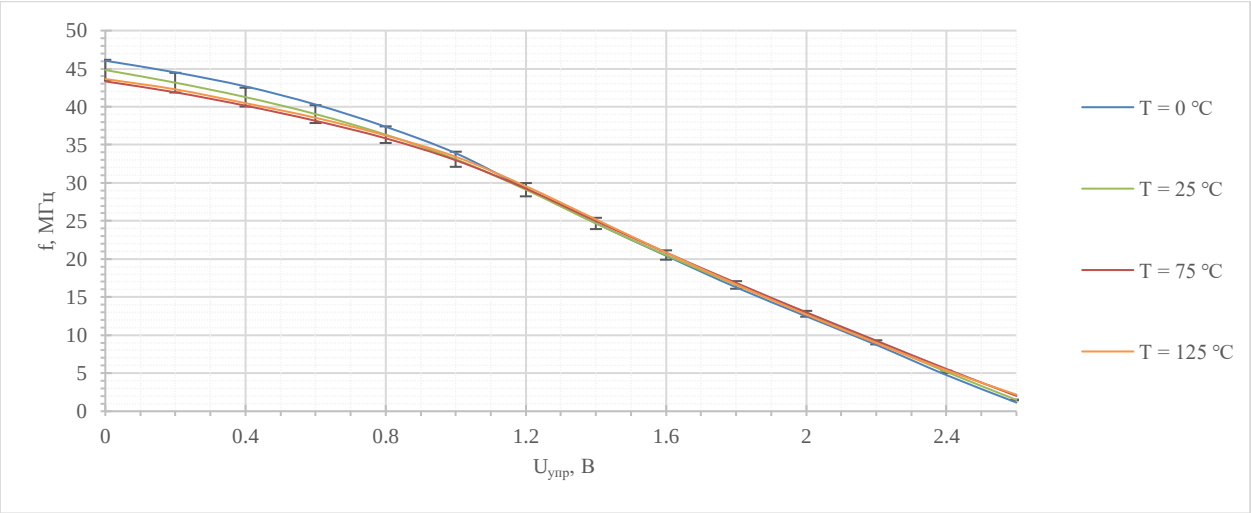


Рисунок 3.21 – Зависимость частоты от управляющего напряжения при различных температурах

Таким образом, разработанная схема СФ-блока автогенератора удовлетворяет всем техническим требованиям, предъявленным к ней ранее в разделе 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи:

1. Был проведен литературный обзор по маршруту проектирования КМОП ИС, технологическому маршруту изготовления КМОП ИС, обзор классификации СФ-блоков, обзор базовых схем автогенераторов. На основе проведенного литературного обзора принято решение, о том, что среди рассмотренных схемотехнических решений автогенераторов наиболее перспективным для реализации в виде СФ-блока является схема на основе кольцевого автогенератора.

2. Разработана и промоделирована в САПР схема электрическая принципиальная перестраиваемого по частоте автогенератора. Схема автогенератора состояла из кольцевого автогенератора, построенного на основе пяти каскадов инверторов, а также промежуточной схемы управления.

3. Разработана и промоделирована в САПР схема электрическая принципиальная блока термостабилизации частоты автогенератора. Схема блока термостабилизации состояла из термокомпенсированной самосмещенной цепи, и бандгапа на основе *pnp* биполярного транзистора в диодном включении. Блок термостабилизации компенсировал температурную нестабильность выходной частоты автогенератора в рабочем диапазоне температур.

4. Проведено исследование и анализ параметров разработанного перестраиваемого по частоте термостабильного СФ-блока автогенератора. Установлено, что СФ-блок перестраиваемого по частоте термостабильного автогенератора с рабочим диапазоном температур 0-125 °С, который обеспечивает линейный частотный диапазон перестройки 1-44 МГц.

Результаты работы апробированы в ходе представления доклада на XX Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов (СНИИ – 2023), приуроченной к 70-летию радиофизического факультета и 145-летию Томского государственного университета.

Верификация разработанного СФ-блока планируется путем изготовления опытного образца в физическом воплощении на ПАО Микрон в 2024 году в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных

производствах на основе сервиса MPW». До конца 2023 года СФ-блок будет включен в российскую библиотеку открытых СФ-блоков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaeslin H. Digital integrated circuit design: from VLSI architectures to CMOS fabrication. – Cambridge University Press, 2008.
2. Clein D. CMOS IC layout: concepts, methodologies, and tools. – Elsevier, 1999.
3. Abbas K. Handbook of Digital CMOS Technology, Circuits, and Systems. – Springer Nature, 2020.
4. Данилина Т. И., Чистоедова И. А. Современные технологии микро - и наноэлектроники. Томск: Издательство ТУСУР, 2020. 339 с.
5. Данилина Т. И., Кагадей В. А., Анищенко Е. В. Технология кремниевой наноэлектроники. Томск: ТУСУР, 2015. 316 с.
6. Johns D. A., Martin K. Analog integrated circuit design. – John Wiley & Sons, 2008.
7. Беленький Я. Е., Многофазные релаксаторы, К., 1966; Справочник по импульсной технике, под ред. В. Н. Яковлева, 3 изд., К., 1972
8. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. — М.: Радио и связь, 1990. — С. 322—325. — ISBN 5-256-00408-5.
9. Чулков В. А. Кольцевые генераторы импульсов в цифровых преобразователях информации // Пензенский государственный технологический университет, 2019. Пенза.
10. R. Jacob Baker CMOS. Circuit Design, Layout, and Simulation. Third Edition: IEEE Press Series on Microelectronic Systems, 1177 с.
11. Banba H. et al. A CMOS bandgap reference circuit with sub-1-V operation //IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1999. – Т. 34. – №. 5. – С. 670-674.
12. Andreou C. M., Koudounas S. & Georgiou, J. (2012). A novel wide-temperature-range, 3.9 ppm/C CMOS band-gap reference circuit //IEEE Journal of Solid-State Circuits. – Т. 47. – №. 2.
13. Rabaey, Chandrakasan, Nikolic Digital Integrated Circuits: A Design Perspective. - Pearson Education, 2003. - 514 с.
14. McNeill J. A., Ricketts D. The designer's guide to jitter in ring oscillators. – Springer Science & Business Media, 2009.
15. Mandal M. K., Sarkar B. C. Ring oscillators: Characteristics and applications, 2010.

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Дорохов Никита Сергеевич
Самоцитирование рассчитано для: Дорохов Никита Сергеевич
Название работы: Отчет ВКР. Дорохов Н.С
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение:

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	30.05%	СОВПАДЕНИЯ	28.25%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	69.95%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.75%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 12.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 12.06.2023 19:15

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2-4, 6-46

Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи: 12-06-2023

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.