

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра общей физики

Моделирование транзисторного усилителя мощности

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы
направления (специальности) 03.03.02 «Физика»
физического факультета

Калинина Артёма Викторовича

Научный руководитель,
д.т.н., профессор



А. Л. Хвалин

Зав. кафедрой общей физики,
д. ф.-м. н., профессор



А. А. Игнатъев

Саратов 2020

ВВЕДЕНИЕ

Получение высоких выходных мощностей транзисторных усилителей является весьма сложной и актуальной задачей. Этот класс устройств во многих радиотехнических системах определяет важнейшие тактико-технические параметры системы, такие как излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надёжность и стоимость.

Наиболее актуально проведение исследований по разработке широкополосных мощных транзисторных усилителей (МТУ). При создании конструкции широкополосного МТУ необходимо учитывать ряд особенностей, к которым относятся сложная схема построения выходного каскада, необходимость исключения влияния корпуса транзистора, подавления отражённых волн и применения многоканального суммирования мощности в силу малой выходной мощности отдельного кристалла транзистора.

Перечисленные особенности МТУ приводят к тому, что электрические параметры широкополосных приборов оказываются заметно хуже таковых у узкополосных усилителей, а габариты и стоимость – заметно (иногда в разы) выше. Тем не менее, имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей необходимо. К таковым относятся сверхширокополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника.

Основная задача данной дипломной работы заключалась в проектировании широкополосного усилителя в микрополосковом исполнении на подложке из поликора толщиной 1 мм на биполярном транзисторе 2Т937А в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц с выходной мощностью более 20 Вт и КСВН входа и выхода не более 1,5.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Дипломная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы – 48 страниц, из них 38 страниц – основное содержание, включая 26 рисунков и 11 таблиц, список использованных источников из 21 наименования.

В первом разделе рассматривается процесс синтеза СВЧ-устройства. Он состоит из следующих этапов: 1 — постановка задачи синтеза; 2 — структурная оптимизация; 3 — анализ устройства; 4 — параметрическая оптимизация; 5 — реализация устройства. Подразделу «параметрическая оптимизация» уделено особое внимание, так как данный этап синтеза является ключевым для проведения данной работы.

В разделе 2 обосновывается выбор системы автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования и последующей оптимизации параметров СВЧ-устройства. В качестве наиболее подходящей был выбран программный пакет AWR Design Environment, обладающий необходимыми средствами для проектирования полосковых СВЧ-устройств. В данный пакет входит модуль Microwave Office, предназначенный для проектирования схем СВЧ-устройств, начиная от сборок различной степени сложности и заканчивая СВЧ-микросхемами. Модуль позволяет выполнять анализ (моделирование) линейных и нелинейных схемных моделей.

Кроме того, в Microwave Office возможна оптимизация характеристик СВЧ-устройства в режиме реального времени, позволяющая контролировать изменение его характеристик при изменении параметров схемной модели. В подразделе 2.1 подробно рассматриваются методы оптимизации, доступные в вышеуказанной САПР, использованные при проектировании устройства, а именно симплекс-метод и метод случайного поиска.

В разделе 3 непосредственно описана комплектация и структура устройства. Приведена его блок-схема, элементами которой являются блоки деления и суммирования мощности и каналы усиления, ключевыми элементами

которых являются унифицированные блоки усиления мощности. Сложность построения МТУ в едином корпусе обусловлена большим числом каналов суммирования, тепловыми проблемами и трудностями настройки. Один из способов решения проблемы состоит в использовании идентичных усилителей с последующим суммированием мощности при помощи суммирующих схем с малыми потерями.

В связи с тем, что мощные биполярные транзисторы имеют относительно небольшой коэффициент усиления, для достижения необходимого значения усиления возникает необходимость последовательного включения нескольких каскадов усиления. Первый каскад усиления МТУ содержит базовые усилители мощности ВР1 и ВР2, второй каскад усиления имеет 8 каналов КУ1 – КУ8 с параллельно-последовательным включением усилителей ВР1 и ВР2. Для получения выходной мощности 20 Вт, при небольшой выходной мощности используемых транзисторов, использовано многоканальное суммирование выходных сигналов усилительных модулей КУ1 – КУ8, включённых параллельно. В базовых усилительных модулях (ВР1 и ВР2) биполярные транзисторы включены по схеме с общей базой и содержат цепи согласования.

В связи со сложностью схемы МТУ и большим объёмом вычислений при проектировании возникает необходимость использования чрезмерно больших вычислительных ресурсов, что не позволяет проводить расчётов в реальном времени, поэтому структурная и параметрическая оптимизация характеристик МТУ проводилась путём оптимизации параметров отдельных блоков и последующим сведением их моделей в единый расчётный проект всего устройства.

В последующих подразделах описывается моделирование каждого блока в отдельности.

В качестве элемента усиления для базового модуля выбран биполярный транзистор 2Т937А. Данный транзистор имеет достаточно широкую полосу рабочих частот от 0,9 до 5 ГГц при выходной мощности 1,6 Вт и коэффициенте

усиления 3 дБ. В качестве модели транзистора использовалась модель Гуммеля-Пуна, параметры которой определялись по статическим и частотным характеристикам по методике, описанной в соответствующем источнике.

В подразделе 3.2 приводится схема унифицированных базовых усилительных модулей, составляющими которой являются отрезки микрополосковых элементов, конденсаторы, индуктивности и непосредственно транзистор. Также приведены таблицы с оптимизированными параметрами данных блоков. Представлены результаты расчета коэффициента передачи по мощности усилительного модуля после оптимизации цепей согласования. Он находится в пределах от 3,5 до 4,6 дБ в рабочем диапазоне частот. При этом оптимальное значение коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) на входе не более 1,6, а на выходе – не более 1,55.

В подразделах 3.3 и 3.4 приведены конструкции базовых делителей и сумматоров мощности, соответственно. Так как делитель мощности является обратимым устройством, то схема сумматора мощности является аналогичной схеме делителя. Блоки деления и суммирования мощности выполнены с использованием микрополосковой технологии с применением согласующих сопротивлений, конденсаторов и индуктивностей. Параметрическая оптимизация данных блоков проведена с целью достижения наилучших рабочих характеристик в диапазоне частот 2 – 4 ГГц: минимальных потерь с входа на выходы, минимального уровня КСВН, минимального ослабления сигнала между выходами делителя/сумматора. Представлены характеристики, полученные в ходе оптимизации, и параметры элементов, входящих в схемы внешних блоков деления и суммирования мощности. Для делителя КСВН входа составляет не более 1,2, КСВН выхода – не более 1,5, коэффициент передачи с входа на выход (S_{21}) не более -3,1 дБ, коэффициент передачи между выходами не более -15 дБ; для сумматора КСВН входа составляет не более 1,2, КСВН выхода – не более 1,6, коэффициент передачи с входа на выход (S_{21}) не более -3,1 дБ, коэффициент передачи между выходами не более -15 дБ.

В четвёртом разделе описано непосредственно моделирование усилителя

мощности из блоков, описанных выше. Обосновывается выбор схемы их расположения, а также необходимость введения дополнительного усилительного каскада перед внешним блоком деления мощности. Данный каскад усиления вводится для обеспечения необходимого уровня сигнала на входе второго каскада усиления. Последующие делители мощности разделяют выходной сигнал первого каскада усиления на восемь параллельных выходов, необходимых для включения каналов второго каскада усиления. Для обеспечения требуемой выходной мощности МТУ используется схема суммирования выходных сигналов усилительных каскадов, включающая двухканальные сумматоры мощности. При этом восемь усилительных модулей второго каскада усиления имеют предельную выходную мощность 3,2 Вт. Тогда восьмиканальная схема суммирования выходной мощности усилительных модулей позволит получить на выходе МТУ мощность 25,6 Вт.

Заключительный пятый раздел содержит информацию по оптимизации всего устройства в целом. Так как усилитель мощности представляет собой комплексированное устройство, содержащее ряд взаимосвязанных блоков со своим набором варьируемых параметров, непосредственное решение задачи оптимизации характеристик всего усилителя становится практически невозможным вследствие чрезмерного их количества. В связи с этим, задача получения оптимальных характеристик усилителя мощности включает в себя ряд частных задач по оптимизации параметров отдельных блоков усилителя. Однако вследствие взаимного влияния элементов усилителя включение блоков с оптимальными характеристиками в общую схему не позволяет получить оптимальные характеристики устройства в целом. Необходимая корректировка параметров достигается путём решения задачи оптимизации всего устройства. При этом найденные на предыдущих этапах оптимизации оптимальные параметры отдельных блоков выступают в качестве первого приближения при оптимизации усилителя мощности.

В результате параметрической оптимизации с использованием методов, описанных в пунктах 2.1.1 и 2.1.2 раздела 2, для представленного усилителя

были получены следующие характеристики в диапазоне от 2 до 4 ГГц: КСВН входа и выхода – не более 1,5; коэффициент усиления в пределах 14 – 15 дБ, максимальная выходная мощность 22,5 Вт (43,5 дБм).

Было проведено сравнение характеристик полученного устройства с характеристиками усилителей в том же частотном диапазоне, имеющимися на рынке. Представленные усилители отличаются чрезвычайно разнообразным сочетанием рабочих характеристик в зависимости от их функционального назначения: диапазон частот, КСВН входа/выхода, чувствительность, выходная мощность в линейном режиме, экономичность, массогабаритные показатели и др. Среди отобранных наиболее близких по характеристикам усилителей полученное в ходе данной работы устройство слегка уступает в частотном диапазоне и коэффициенте усиления, зато имеет сравнительно лучшую выходную мощность и КСВН входа и выхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование по разработке усилителей в СВЧ-диапазоне. Изучен процесс синтеза СВЧ-устройств и все его этапы. Также были рассмотрены методы оптимизации, применяющиеся в системе автоматизированного проектирования AWR Design Environment и непосредственно в модуле Microwave Office. С использованием данной САПР была создана конструкция МТУ и его основных блоков. Проведена структурная и параметрическая оптимизация каждого блока в отдельности и всего устройства в совокупности.

Для базовых усилительных модулей коэффициент усиления находится в пределах от 3,5 до 4,6 дБ; оптимальное значение коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) на входе не более 1,6, а на выходе – не более 1,55. Для делителя и сумматора КСВН входа составляет не более 1,2; КСВН выхода – не более 1,6; коэффициент передачи с входа на выход (S21) не более -3,1 дБ, коэффициент передачи между выходами не более -15 дБ.

Представленный в работе усилитель в результате проведенной параметрической оптимизации имеет следующие характеристики в рабочем диапазоне частот: КСВН входа и выхода не более 1,5; коэффициент усиления в пределах 14 – 15 дБ, максимальная выходная мощность 22,5 Вт (43,5 дБм).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хвалин А.Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах: автореф. дисс. на соискание уч. степени д. техн. н.: 05.12.04. / Поволжская гос. академия телекоммуникаций и информатики: Самара. 2014. С. 312.
2. Хвалин А.Л., Страхова Л.Л., Воробьев А.В. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора по его экспериментальным характеристикам. Радиотехника. 2015. № 7. С. 35–40.
3. Хвалин А.Л., Васильев А.В. Оптимальный синтез характеристик транзисторного усилителя УВЧ-диапазона в интегральном исполнении. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 10. С. 29–33.
4. Кац Б.М., Мещанов В.П., Фельдштейн А.Л. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами / Под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
5. Система автоматизированного проектирования AWR Design Environment / модуль Microwave Office. Справочная информация.
6. Карпенко А.П. Методы оптимизации (базовый курс) [Электронный ресурс]. – URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou> (дата обращения 03.05.2020). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
7. Сотов Л.С., Хвалин А.Л. Средства разработки и исследования архитектурных моделей в САПР SYSTEM STUDIO. Часть 1. Использование инструментов SYSTEM STUDIO при моделировании матричного генератора перестановок. Гетеромагнитная микроэлектроника. 2008. № 5. С. 121–145.
8. Хвалин А.Л., Игнатьев А.А., Ляшенко А.В., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Электродинамическое моделирование СВЧ-усилителей с гетеромагнитным управлением // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во СГУ. 2004. Вып. 1: Многофункциональные

- комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 99–105.
9. Самолданов В.Н., Игнатьев А.А., Ляшенко А.В., Солопов А.А., Хвалин А.Л., Маринин А.В., Коваленко М.Л. Компьютерное моделирование ферритовых резонаторов во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во СГУ. 2004. Вып. 1: Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 110–118.
 10. Мещанов В. П., Хвалин А. Л. Методика уточнения характеристик модели Матерка полевого транзистора // Радиотехника. 2010. № 5. С. 111–115.
 11. Хвалин А.Л., Сотов Л.С., Васильев А.В. Расчет характеристик интегрального магнитоуправляемого генератора в диапазоне частот 26,0...37,5 ГГц. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 11. С. 47–49.
 12. Хвалин А.Л., Овчинников С.В., Сотов Л.С., Самолданов В.Н. Первичный преобразователь на основе ЖИГ генератора для измерения сильных магнитных полей. Датчики и системы. 2009. № 10. С. 57–58.
 13. Апин М.П., Балаболин А.Г., Хвалин А.Л., Моделирование характеристик биполярного транзистора 2Т937. Часть II. Частотные характеристики. Радиотехника. 2017. №7. С. 129–135.
 14. Хвалин А.Л. Двухкомпонентный датчик слабых магнитных полей на пленочном ЖИГ-резонаторе. Датчики и системы. 2015. № 6 (193). С. 33–37.
 15. Хвалин А.Л. Трёхкомпонентный датчик магнитного поля на сферическом ЖИГ резонаторе. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2015. № 3. С. 33–40.
 16. Хвалин А.Л. Векторный магнитометр слабых магнитных полей. Измерительная техника. 2014. № 10. С. 45–48.

17. Хвалин А.Л., Солопов А.А., Ляшенко А.В. Исследование СВЧ-резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учетом доменной структуры. Гетеромагнитная микроэлектроника. 2012. № 12. С. 4–11.
18. Хвалин А.Л. Моделирование магнитной микроструктуры полосовых доменов в плёнках ЖИГ // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. №11. С. 4–14.
19. Хвалин А.Л. Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2009. № 4. С. 25–30.
20. Хвалин А.Л. Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 1. С. 73–80.
21. Ассессоров В.В., Кожевников В.А., Асеев Ю.Н., Гаганов В.В. Модули ВЧ-усилителей мощности для портативных средств связи // Электросвязь. 1997. № 7. С. 21–22.

 Калинин А.В.