

На правах рукописи



Данилов Даниил Сергеевич

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ
СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УСИЛЕНИЯ ДЛЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ**

Специальность 2.2.14 –
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Малютин Николай Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР

Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Ющенко Алексей Юрьевич
кандидат технических наук, начальник 4 отдела акционерного общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»)

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

Защита состоится 15 декабря 2026 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/vi9bj6ll>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Доктор технических наук, доцент



Суровцев Роман Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. СВЧ-усилители мощности являются одними из важнейших устройств, применяемых в составе различных радиоэлектронных систем: телекоммуникационном оборудовании, приемо-передающих модулях (ППМ), а также измерительной технике. В настоящее время наблюдается тенденция увеличения максимальной частоты и полосы рабочих частот контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Разрабатываются и широко применяются следующие типы КИА: векторные анализаторы цепей (ВАЦ); анализаторы спектра (АС); генераторы сигналов (ГС) с требуемой полосой рабочих частот от единиц герц до 67 ГГц. Кроме этого, для увеличения функциональных возможностей КИА разрабатываются различные внешние конверторы к ВАЦ, АС и ГС для расширения полосы рабочих частот вплоть до 110 ГГц и выше.

Как известно, характеристики измерительных приборов определяются компонентной базой, входящей в этот прибор. Поскольку монолитно-интегральные схемы (МИС) усилителей являются одними из основных компонентов, то требования, предъявляемые, например, к полосе рабочих частот прибора, также предъявляются и к усилителям. Кроме этого, часто возникают требования к другим параметрам усилителя, в том числе противоречащим друг другу. Например, требования к минимальному шуму и мощности при полосе рабочих частот в несколько октав для приемника АС или блока генератора ГС, соответственно. Достижение требуемых характеристик МИС реализуется с помощью выбора соответствующей схемы и технологии. Одной из схем, представляющих интерес для исследования и разработки, является схема усилителя распределенного усиления (УРУ).

Схемы УРУ позволяют реализовывать усилители на диапазоны частот от единиц мегагерц до десятков гигагерц. УРУ является неотъемлемой частью СВЧ-узлов и блоков для различных КИА. В настоящее время из-за возрастающих требований к КИА возникает потребность в исследовании и разработке УРУ, обладающих широкой полосой рабочих частот, высокой мощностью и низким шумом.

Степень разработанности темы. Первые работы по созданию схем УРУ принадлежат Percival W., Ginzton, E.L. Большой вклад в развитие теории и проектирования схем распределенных усилителей внесли Кузьмин А.А., Шапиро Л. Я., Гюнтер В.Я., Голев Б.Ф., Алексеев О.В., Grebennikov A. Разработчиками и исследователями схем распределенных усилителей мощности были Kyung-Tae Bae, Philippe Dennler, Peter Bruckner, M. Häfele, A. Trasser, Cha Liu и др. Схемы малошумящих распределенных усилителей представлены в работах Гюнтера В.Я., P. Ikalainen, Bo Lindstrom, Nikandish G., Chun-Lin Ko, Agarwal B. и др. Схемы специальных и составных УРУ исследованы в работах Kyung-Tae Bae, Amin Jahanian, Ziad El-Khatib, Mei-Chen Chuang, Pei-Si Wu, Monsin M. Tarar.

Несмотря на глубокую степень проработки и исследований различных схем распределенных усилителей, при использовании УРУ в контрольно-измерительном оборудовании появляются новые требования к их параметрам и, прежде всего, к исполнению усилителей в виде монолитных интегральных схем (МИС) по современным технологиям.

Цель работы – разработка, исследование и оптимизация новых схемотехнических решений для применения в микросхемах усилителей распределенного усиления с целью улучшения их электрических характеристик, а также развития методики проектирования ряда усилителей распределенного усиления для применения в контрольно-измерительной аппаратуре.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. исследовать текущее состояние моделирования, разработки схем и технологий при реализации УРУ;
2. моделировать и исследовать параметры схемы, состоящей из двух транзисторов, включенных по схеме каскода;
3. разработать поэтапную методику проектирования и оптимизации параметров МИС УРУ;
4. разработать и экспериментально исследовать новые схемы и топологии распределенных усилителей различных типов и назначений:
 - 1) широкополосных МИС УРУ с перекрытием диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц;
 - 2) мощных УРУ в рабочих диапазонах частот 10 МГц – 30 ГГц и 10 МГц – 50 ГГц;
 - 3) МИС малошумящих УРУ в диапазоне частот 10 МГц – 50 ГГц;
 - 4) МИС УРУ поддиапазонов частот 3 ГГц – 50 ГГц и 10 ГГц – 67 ГГц.

Научная новизна

1. Предложена и опробована поэтапная методика расчета и проектирования распределённых усилителей, позволяющая учитывать влияние параметров искусственных линий передачи, Т-образного фильтра и фазовой синхронизации на характеристики усилителя с последующим электродинамическим анализом оптимизированных топологий МИС УРУ.
2. Проведена классификация топологических построений периферии транзисторов в схеме каскода по степени влияния на параметры схем распределенного усиления, позволяющая сокращать время проектирования УРУ с заданными параметрами и особенностями применения.
3. Предложена модификация частотно-зависимой нагрузки, подключаемой к входной линии передачи распределенного усилителя и состоящей из RCR-элемента и демпфирующих цепей, что улучшает согласование УРУ с внешними цепями.

Теоретическая значимость

1. Установлена связь между топологическими реализациями линий передачи распределенного усилителя, обеспечивающими фазовую синхронизацию эквивалентных искусственных линий и коррекцию частотных характеристик Т-образным фильтром, что позволило разработать схему сверхширокополосного УРУ диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц.
2. Анализ топологических реализаций схем каскода позволил выявить наиболее подходящие для разработки решения, на основе которых могут быть синтезированы сверхширокополосные УРУ, распределенные усилители мощности и малошумящие УРУ с требуемыми для применения в КИА параметрами.

3. В результате анализа существующих и вновь полученных схемотехнических решений и экспериментально полученных данных в ходе разработки усилителей распределенного усиления предложены универсальные схемотехнические решения для улучшения характеристик УРУ при использовании различных технологий.

Практическая значимость

Спроектированы, изготовлены и экспериментально исследованы нижеперечисленные типы УРУ для различных применений.

1) Широкополосный усилитель распределённого усиления на диапазон частот 10 МГц – 67 ГГц с коэффициентом усиления 8–10 дБ во всей полосе частот.

2) Малошумящий УРУ диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц с коэффициентом шума ниже 5 дБ в полосе частот 50 МГц – 50 ГГц.

3) Распределенный усилитель мощности диапазона частот 10 МГц – 30 ГГц с точкой одностенной компрессии ($P_{1\text{dB}}$) 27 дБм.

4) УРУ диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц с мощностью насыщения (P_{sat}) 22 дБм до 40 ГГц.

5) УРУ диапазона частот 10 ГГц – 67 ГГц с коэффициентом усиления 18–20 дБ во всей полосе частот.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, матричной алгебры, метод математического исключения параметров цепей, метод экстракции параметров нелинейных элементов, вычислительной математики, специализированных систем моделирования и автоматизированного проектирования, численные методы синтеза пассивных корректирующих и согласующих цепей.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная поэтапная методика оценки реализуемости параметров распределенных усилителей, основанная на расчете линий передачи как эквивалентных искусственных линий, учитывающая фазовую синхронизацию и свойства согласующего Т-образного фильтра, позволяет выполнить первичную параметризацию усилителя и получить адекватное начальное приближение, существенно сокращая время последующей оптимизации УРУ в диапазонах частот до 70 ГГц.

2. Систематизация существующих схемотехнических решений построения топологий каскодов позволила выявить влияние реализации периферии транзисторов в каскаде на достижение задаваемых параметров УРУ, что позволило реализовать усилитель мощности диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц с мощностью насыщения 22 дБм в поддиапазоне от 10 МГц до 40 ГГц и 18 дБм в поддиапазоне от 40 ГГц до 50 ГГц.

3. Использование модифицированной частотно-зависимой нагрузки вместо классической согласованной нагрузки, подключённой к входной линии передачи усилителя распределенного усиления диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц, позволило снизить коэффициент шума до 3 дБ на частотах 50 МГц – 3 ГГц и при этом обеспечить коэффициент шума на частоте 50 ГГц ниже 5 дБ, а также получить коэффициент отражения по входу S_{11} –20 дБ и коэффициент усиления 13 дБ во всей рабочей полосе частот.

Достоверность результатов

Достоверность предложенного расчета ячейки усилителя распределенного усиления подтверждается совпадением результатов электродинамического моделирования в САПР с измерениями опытных образцов. Разработанные и изготовленные на подложке из арсенида галлия МИС внесены в реестр топологий интегральных схем, что подтверждено одиннадцатью свидетельствами о регистрации топологий.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих конференциях:

1. Метрология в радиоэлектронике. XIII Всероссийская научно-техническая конференция. Менделеево, 20–22 июня 2023;
2. 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 17-19 November 2022, Tomsk, Russian Federation;
3. Электронные средства и системы управления. Международная научно-практическая конференция, Томск, ТУСУР, 26-27 ноября 2021;
4. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 28-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2018). 2018.

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 20 работ, в том числе 5 публикаций в журналах из перечня ВАК, 3 публикации в сборниках международных и всероссийских конференций, 10 свидетельств о регистрации топологий интегральных схем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы составляет 137 страниц. Основная часть включает 108 страниц текста, 63 рисунка и 1 таблицу. Список используемых источников содержит 122 наименования.

Личный вклад автора

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и ТУСУР. Основные исследования, результаты которых представлены в диссертации, были выполнены по инициативе автора. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, результаты работы. Личный вклад автора включает разработку схемотехнических решений, разработку топологий МИС, выбор методик исследований, разработку алгоритмов программных решений, моделирование в САПР, обработку экспериментальных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения по теме исследования и обоснована ее актуальность.

В первом разделе приведен анализ аспектов применения усилителей распределенного усиления в составе контрольно-измерительной аппаратуры. На примере структурных схем ВАЦ, ГС и АС показаны особенности использования и требования, возникающие к усилителям. Приведена историческая справка по раз-

витию УРУ, описаны принцип работы, технологии изготовления и модели схем усилителей.

Во втором разделе представлены результаты исследования схем каскода, моделирование и разработка схем усилителей распределенного усиления. Описаны различные схемотехнические решения, позволяющие улучшать характеристики УРУ в интегральном исполнении.

Также приведены варианты и особенности схем включения и топологий каскода, имеющих большое значение для обеспечения требуемой полосы рабочих частот. Показана трансформация принципиальных схем в более сложные эквивалентные схемы, в которых учитываются параметры так называемой периферии транзисторов. Это вся совокупность элементов цепей, отражаемых на схемах, но характеризующихся более сложными эквивалентными схемами вследствие наличия неоднородностей и паразитных параметров.

Каскодное включение транзисторов позволяет одновременно поднять верхнюю границу рабочей полосы и повысить выходную мощность усилителя распределённого усиления. Однако преимущества каскода реализуются лишь при правильном выборе топологии соединения транзисторов и междо соединений, поскольку от конфигурации металлизации зависят как внутренние паразитные элементы, так и характер нагрузки. Рассмотрены четыре альтернативные реализации каскодной ячейки (рисунок 1, 2), проанализировано их влияние на характеристики МИС УРУ и обоснован выбор наиболее предпочтительных структур и схем.

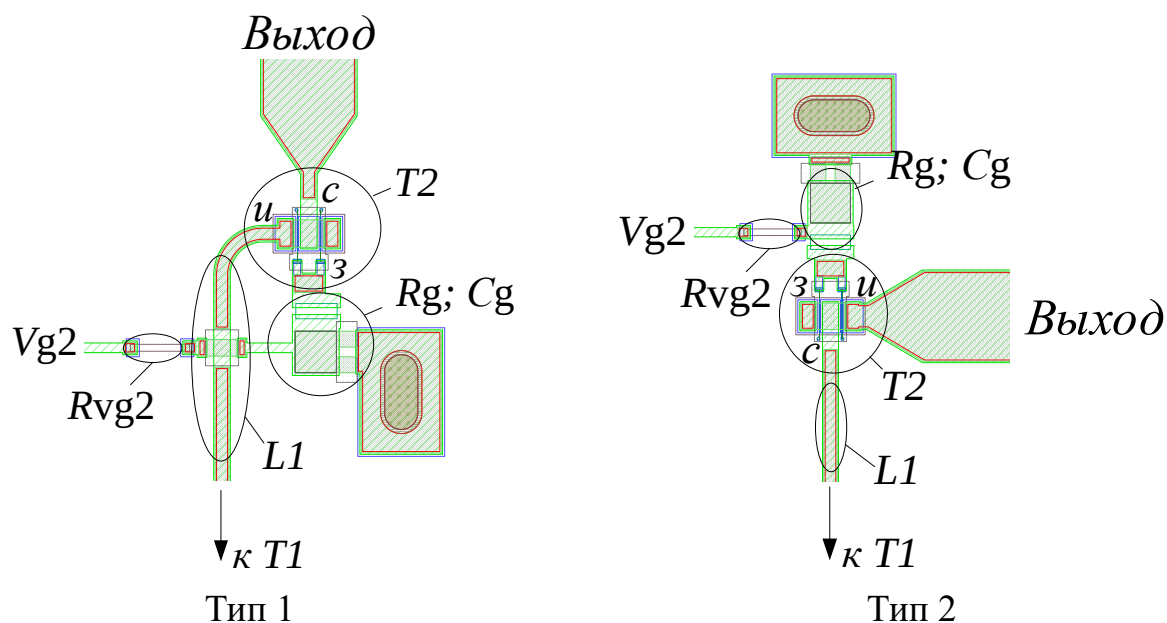


Рисунок 1 – Топологии каскодов с линией передачи $L1$, подключенной к истоку (тип 1) и к стоку (тип 2) транзисторов

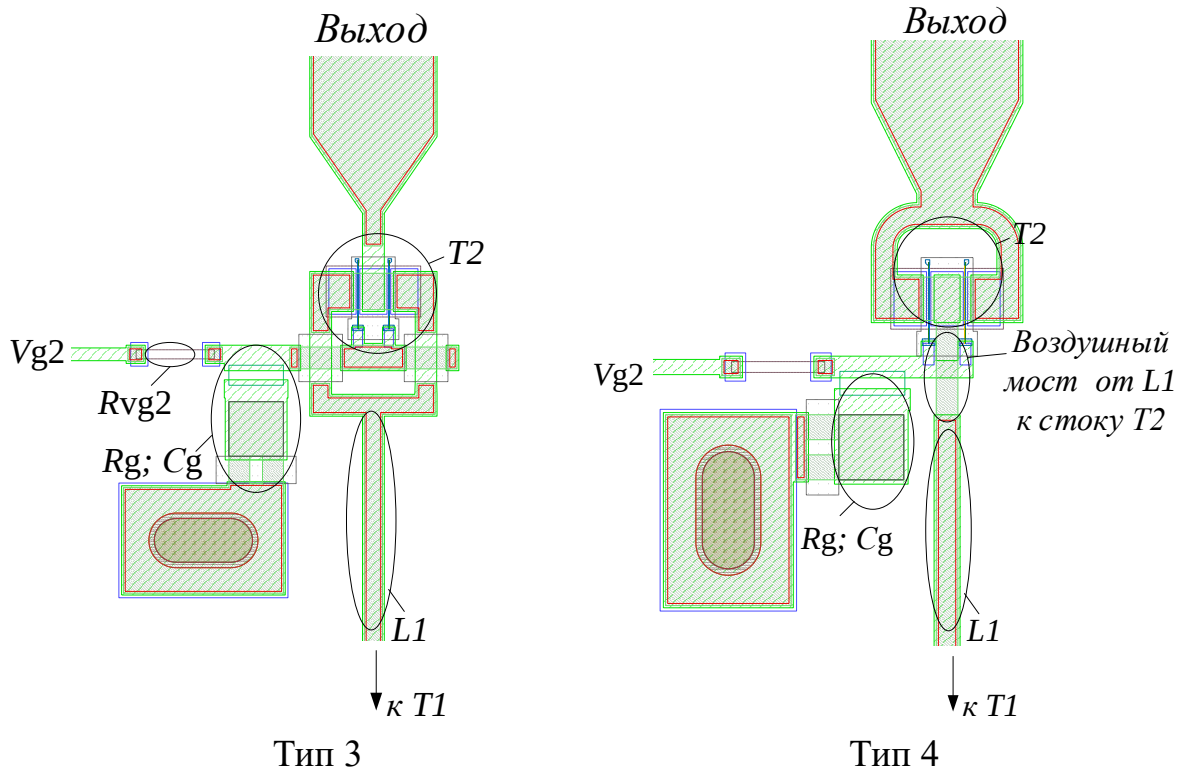


Рисунок 2 – Топологии каскодов с линией передачи L_1 , подключенной к истоку (тип 3) и к стоку (тип 4) транзисторов

Обозначения на рисунках: V_{g2} – питание транзистора с общим затвором; R_{vg2} – высокоомный резистор по питанию V_{g2} ; R_g и C_g – RC-цепь по затвору транзистора, которая увеличивает реальную составляющую импеданса затвора, а также демпфирует потенциальные колебания, предотвращая самовозбуждение. L_1 – линия передачи между стоком $T1$ и истоком $T2$ преобразует импеданс в каскодной ячейке, что, в свою очередь, также влияет на коэффициент усиления и устойчивость.

На основании анализа данных каскодов был сделан вывод, что выбор топологии каскода представляет собой компромисс между полосой рабочих частот, коэффициентом шума и выходной мощностью. Для реализации более широкополосных и малошумящих схем предпочтительным является использование каскодов типа 1 и 2 (рисунок 1), коэффициент отражения которых по выходу составляет ниже -10 дБ до 80 ГГц, а коэффициент шума минимальный среди всех рассмотренных конфигураций. Для мощных выходных УРУ, где требования к шуму и согласованию менее жесткие, следует применять варианты 3 и 4, обеспечивающие более высокую выходную мощность за счет более компактной топологии и сниженных паразитных потерь. Результаты анализа различных типов каскодов позволили реализовать распределенные усилители мощности.

Далее была предложена методика расчета схемы УРУ и на основе данной методики реализована топология усилителя диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц. Методика состоит из выполнения шести шагов:

- 1) деэмбединг и получение внутренних параметров транзистора;
- 2) расчет оптимального количества ячеек УРУ;

- 3) расчет индуктивностей корректирующего Т-образного фильтра и частоты среза;
- 4) расчет характеристик схемы с учетом каскодной конфигурации;
- 5) расчет и настройка фазовой синхронизации и коэффициентов отражения по входу и выходу схемы;
- 6) расчет и оптимизация схемы с использованием компонентов библиотеки (PDK).

На основе данной методики с использованием технологического процесса GaAs 0,1 pHEMT, была реализована схема УРУ диапазона частот 10 МГц – 70 ГГц (рисунок 3).

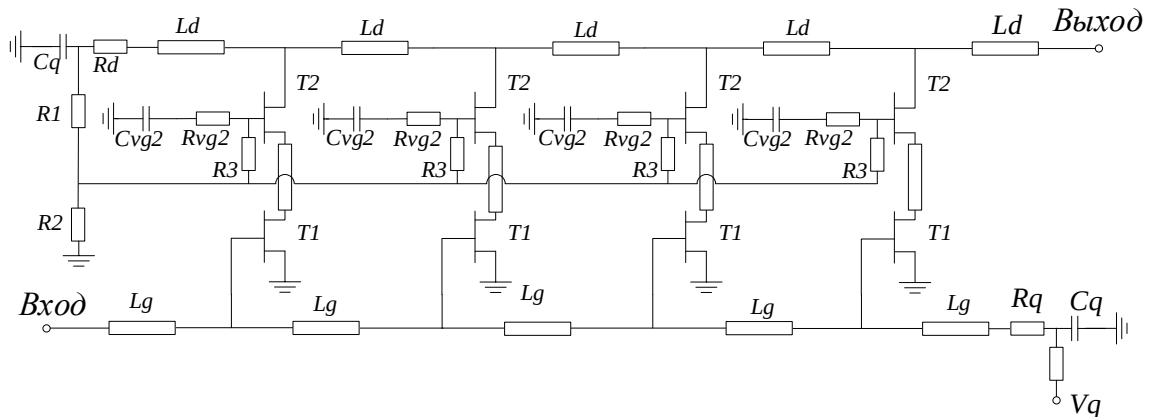


Рисунок 3 – Схема УРУ диапазоном частот 10 МГц – 67 ГГц, выполненная на компонентах библиотеки GaAs 0,1 pHEMT

Параметры компонентов схемы были оптимизированы для получения равномерного (± 1 дБ) коэффициента усиления 11–12 дБ и коэффициентов отражения по входу и выходу схемы не выше –10 дБ до частоты 70 ГГц. В разделе 3 приводится сравнение расчетных и измеренных характеристик топологии, выполненной на основе данной схемы.

Далее была реализована модификация нагрузки входной линии передачи схемы УРУ для улучшения коэффициента шума усилителя на низких частотах. На момент написания диссертации известны и реализованы различные подходы к модификации нагрузки, направленные на улучшение шумовых характеристик УРУ. Данные подходы можно классифицировать по двум основным группам: первая группа связана с использованием активной нагрузки вместо пассивного согласованного резистора; вторая группа основана на применении частотно-зависимой RC-цепи обратной связи, подключенной с выхода схемы на входную линию вместо согласованной нагрузки. На рисунке 4 представлены фрагменты выходных ячеек схемы УРУ, иллюстрирующие различные типы нагрузки входной линии.

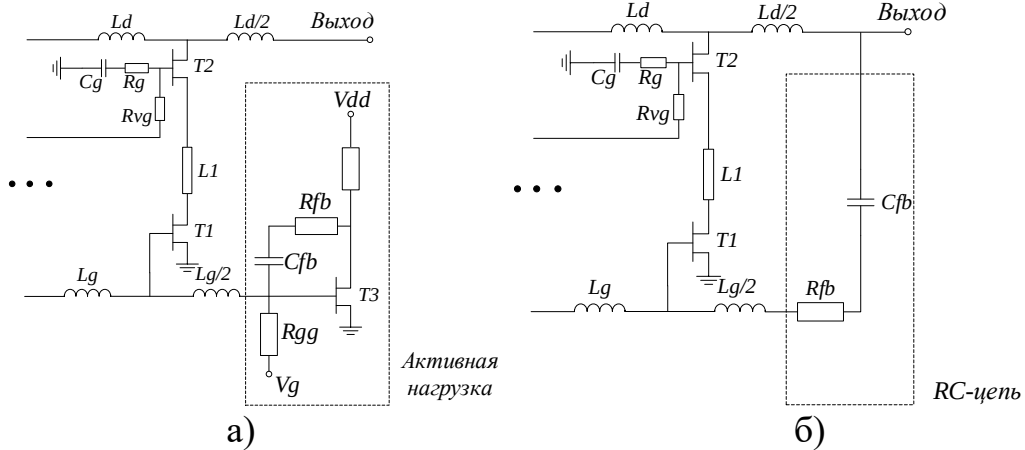


Рисунок 4 – Типы нагрузок входной линии передачи УРУ. Активная нагрузка (а),
РС-цепь (б)

Активная нагрузка подразумевает замену резистора на активную цепь согласования, состоящую из транзистора ТЗ, охваченного параллельной обратной связью через резистор R_{fb} и опциональные реактивные элементы C_{fb} и R_{gg} для расширения полосы частот (рисунок 4, а). Плюсом метода является снижение эффективного теплового шума за счет деления эквивалентного шумового напряжения нагрузки на коэффициент петлевого усиления активной цепи. Недостатком является генерирование активной нагрузкой паразитных искажений, которые подаются обратно на вход усилителя и усиливаются всеми последующими каскадами без соответствующего увеличения уровня полезного сигнала, что ухудшает динамический диапазон и линейность. На рисунке 5 показана модифицированная схема нагрузки УРУ.

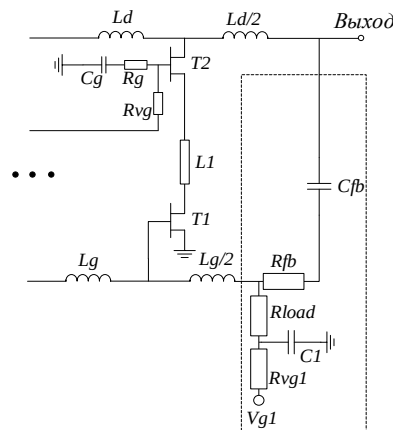


Рисунок 5 – Модифицированная нагрузка входной линии передачи распределенного усилителя

Схема, представленная на рисунке 5, сочетает в себе классическую RC-цепь, образованную последовательно включёнными резистором и конденсатором, и соединяющую окончание входной линии передачи с выходом усилителя, с дополнительной нагрузкой R_{load} , подключаемой параллельно конденсатору C_1 . К резистору R_{load} подсоединяется конденсатор высокого номинала, высокоомный резистор R_{vg1} и источник напряжения смещения. Данное техническое решение занимает промежуточное положение между свойствами классической RC-цепи и режимом пол-

ностью согласованной нагрузки. Следует отметить, что схема на рисунке 5 приведена в упрощённом виде. На основе данной схемы разработан малошумящий распределенный усилитель диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц, получены свидетельства о государственной регистрации.

На рисунке 6 представлено сравнение частотных зависимостей коэффициента шума в низкочастотной области до 10 ГГц для трёх конфигураций УРУ: с согласованной нагрузкой, с классической RC-цепью и с модифицированной RCR-цепью.

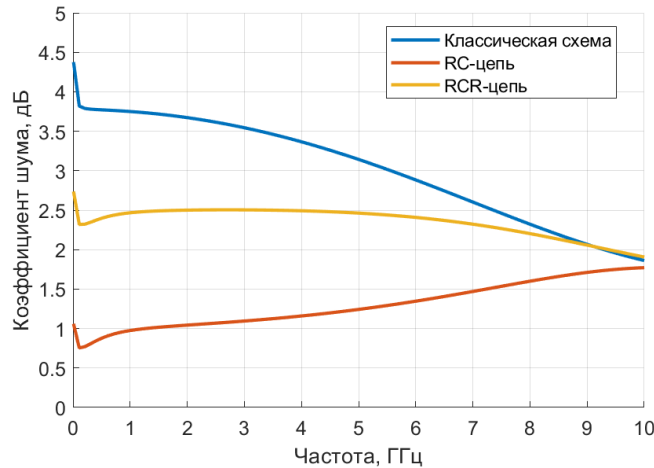


Рисунок 6 – Сравнение коэффициентов шума УРУ в диапазоне частот до 10 ГГц с согласованной нагрузкой, классической RC-цепью и модифицированной RCR-цепью

Полученные характеристики наглядно демонстрируют, что введение дополнительного параллельно конденсатору C_1 резистора R_{load} позволяет подавить рост шума на низких частотах. Несмотря на то, что абсолютный минимум коэффициента шума в модифицированной конфигурации несколько уступает показателю классической RC-цепи, данный компромисс является оправданным. Модифицированная цепь позволяет избежать деградации таких важных параметров, как согласование и усиление в рабочей полосе, которая неизбежно возникает при использовании простой последовательной RC-структуры.

Также в данном разделе было исследовано влияние номиналов RC-цепи, подключаемой к входу транзисторов с общим истоком в схеме УРУ, на коэффициент усиления и выходную мощность. Используя данную схему и принцип неоднородного согласования ячеек, реализована схема усилителя мощности распределённого усиления диапазона частот 10 МГц – 35 ГГц. Кроме этого, разработана схема диапазонного УРУ на основе двух УРУ диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц, включенных в каскадную структуру и позволяющая реализовать усилитель диапазона частот 10 ГГц – 67 ГГц с высоким коэффициентом усиления (более 15 дБ) на частотах 40–67 ГГц. Предложена широкополосная схема цепи питания и на ее основе разработана схема УРУ с диапазоном частот 3 ГГц – 50 ГГц.

В третьем разделе представлены разработка, исследование и моделирование топологий УРУ. Представлена реализация различных схемотехнических решений, описанных в разделе 2, в топологическом виде. Также представлены характеристики и сравнение моделей топологий УРУ с экспериментальными образ-

цами. Проведен анализ полученных результатов и описаны особенности полученных топологий МИС.

На основе схемы УРУ на диапазон частот 10 МГц – 67 ГГц, выполненной на компонентах библиотеки GaAs 0,1 рHEMT, была построена топология усилителя (рисунок 7).

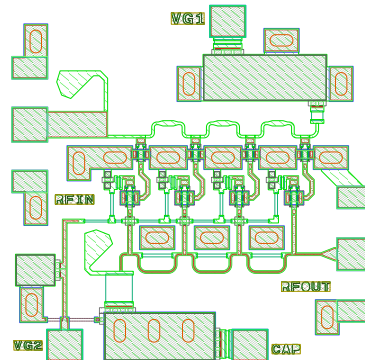
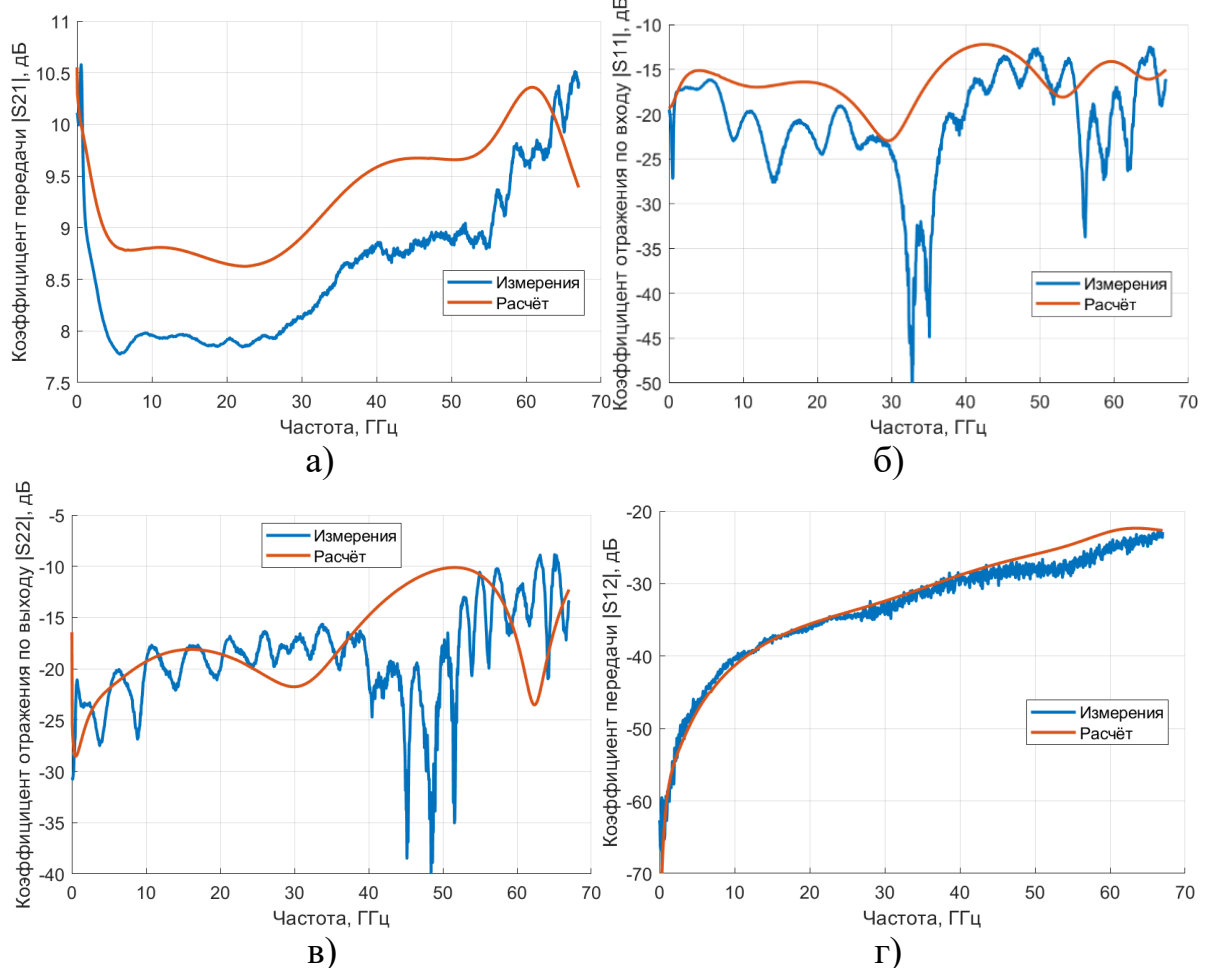


Рисунок 7 – Топология УРУ диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц

Размеры полученной МИС 1×1 мм. На рисунке 8 показаны характеристики полученного усилителя. Представлены расчетные параметры и результаты измерения образца. Характеристики получены при питании $V_d = 4$ В, $V_{g1} = -0,3$ В. Питание на транзистор с общим затвором V_{g2} подключается через автосмещение от основного источника питания и составляет 1,4 В. Потребляемый ток при данном режиме составляет 60 мА. S-параметры измерялись до 67 ГГц, а точка однодецибелной компрессии P_{1dB} и коэффициент шума до 50 ГГц.



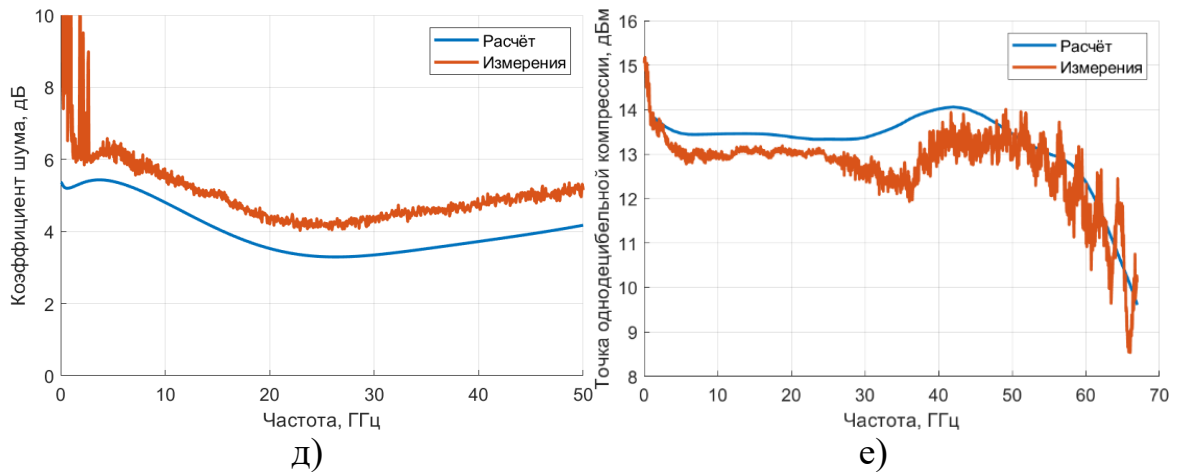


Рисунок 8 – Сравнение характеристик модели и измеренного образца усилителя диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц. Коэффициент усиления (а), коэффициент отражения по входу S_{11} (б), коэффициент отражения по выходу S_{22} (в), развязка S_{12} (г), коэффициент шума (д), точка однодецибельной компрессии (е)

Полученный усилитель обладает широкой полосой рабочих частот 10 МГц – 67 ГГц при малом потреблении по току (60 мА), небольших размерах (1×1 мм), с двумя источниками питания (V_d и V_{g1}) и с возможностью регулировки усиления изменением V_{g2} . Данный усилитель может быть использован в СВЧ-блоках КИА в качестве буферного усилителя или усилителя мощности для гетеродина смесителей частот.

Далее представлена топология малошумящего распределенного усилителя диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц (рисунок 9).

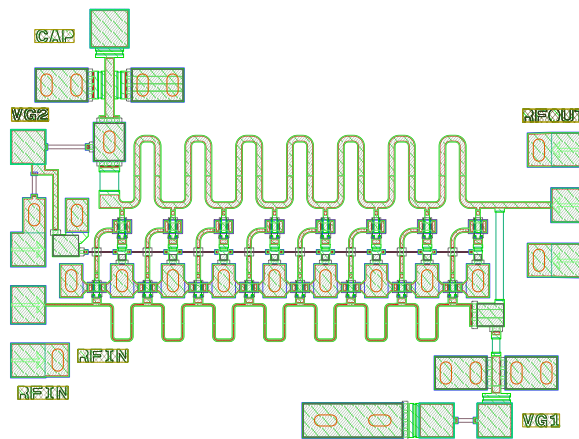


Рисунок 9 – Топология МИС УРУ диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц

Размеры полученной МИС 1,6×1,2 мм. На рисунке 10 изображены характеристики полученного малошумящего усилителя. Представлены расчетные характеристики топологии и измеренного образца. Характеристики приведены при питании $V_d = 5$ В, $V_{g1} = -0,56$ В. Питание на транзистор с общим затвором V_{g2} подключается через автосмещение от основного источника питания и составляет 1,6 В. Потребляемый ток при данном режиме составляет 70 мА. S-параметры приведены до 67 ГГц. Точка однодецибельной компрессии $P1_{dB}$ и коэффициент шума измерены в частотном диапазоне до 50 ГГц.

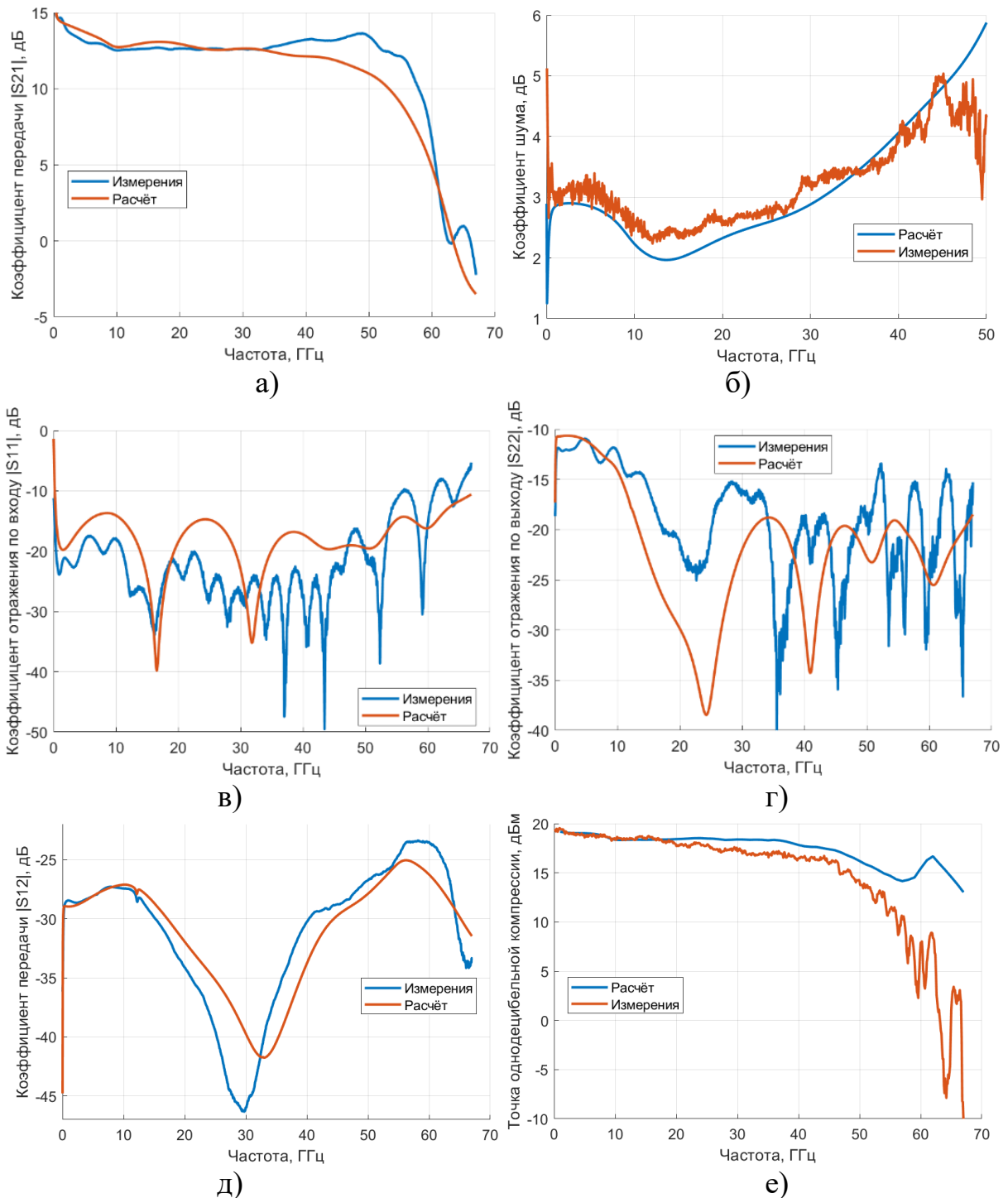


Рисунок 10 – Сравнение характеристик модели и измеренного образца усилителя частот диапазоном 10 МГц – 50 ГГц. Коэффициент усиления (а), коэффициент шума (б), коэффициент отражения по входу S_{11} (в), коэффициент отражения по выходу S_{22} (г), развязка S_{12} (д), точка однодецибелной компрессии (е)

Характеристики, полученные в ходе измерений готовых образцов, подтверждают результат, полученный в ходе моделирования: использование RCR-цепи со схемой демпфирования вместо классической согласованной нагрузки или RC-цепи, позволяет добиться низкого коэффициента шума (ниже 5 дБ) в диапазоне частот от 50 МГц до 50 ГГц.

Кроме представленных выше усилителей, в данной работе были исследованы и разработаны МИС распределенных усилителей мощности диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц с мощностью насыщения P_{sat} 22 дБм до 40 ГГц и 18 дБм до 50 ГГц. Также была разработана топология распределенного усилителя мощности диапазона частот 10 МГц – 30 ГГц с мощностью насыщения 27 дБм.

На основе схемы усилителя диапазона частот 10 МГц – 67 ГГц была реализована топология усилителя диапазона частот 10 ГГц – 67 ГГц с коэффициентом усиления в диапазоне частот 50–67 ГГц, равным 18 дБ и коэффициентом шума на частоте 50 ГГц ниже 5 дБ. Также была разработана топология усилителя диапазона частот 3 ГГц – 50 ГГц.

Заключение

Таким образом, в диссертационной работе решены основные задачи моделирования и экспериментального исследования сверхширокополосных монолитных интегральных схем усилителей распределенного усиления, предназначенных для использования в контрольно-измерительной аппаратуре. Полученные научные результаты в области анализа физических и схемотехнических особенностей работы УРУ, легли в основу сложившейся системы проектирования УРУ. Наиболее значимыми в этой системе являются результаты, перечисленные ниже.

1. Предложена поэтапная методика оценки параметров распределенного усилителя, основанная на представлении линий передачи эквивалентными искусственными линиями, учете фазовой синхронизации и анализе Т-образного фильтра, обеспечивающая оценку начальных параметров схемы для формирования корректных стартовых условий последующего детального моделирования в САПР в диапазоне частот до 70 ГГц.

2. Исследованы характеристики различных способов подключения двух GaAs рНЕМТ транзисторов по схеме каскода. Выявлены зависимости параметров от различного построения периферии транзисторов и способов подключения линий передачи в каскаде, что позволяет выяснить какую конструкцию использовать при разработке малошумящего, мощного или сверхширокополосного распределенного усилителя.

3. Используя предложенный метод расчета УРУ и выбрав каскод с наиболее высокой выходной мощностью на высоких частотах, была реализована топология распределенного усилителя мощности диапазоном рабочих частот 10 МГц – 50 ГГц с мощностью насыщения 22 дБм до 40 ГГц и 18 дБм до 50 ГГц, коэффициентом усиления 14–15 дБ во всей полосе частот, а также встроенным детектором на выходе микросхемы.

4. Использование RCR-схемы вместо классической согласованной нагрузки на входной линии передачи УРУ позволило реализовать МИС малошумящего сверхширокополосного усилителя диапазона частот 10 МГц – 50 ГГц, коэффициентом шума ниже 5 дБ в полосе частот 50 МГц – 50 ГГц и коэффициентом усиления 13–15 дБ во всей полосе рабочих частот.

5. Каскадное включение двух топологий сверхширокополосных УРУ диапазоном частот 10 МГц – 67 ГГц вместе с широкополосной цепью питания и цепью

автосмещения позволило реализовать МШУ диапазона частот 10 ГГц – 67 ГГц с коэффициентом усиления 18 дБ в диапазоне частот 50–67 ГГц и коэффициентом шума ниже 5 дБ на частотах до 50 ГГц. Также была разработана топология усилителя диапазоном частот 3 ГГц – 50 ГГц.

6. Использование широкополосной цепи питания, встроенной в УРУ с дополнительными цепями демпфирования, позволило реализовать буферный усилитель диапазона частот 3–50 ГГц с коэффициентом усиления 13–15 дБ.

7. Использование RC-цепи, подключенной между входной линией передач и затворами транзисторов вместе с неоднородным согласованием ячеек УРУ, позволило реализовать топологию распределенного усилителя мощности диапазоном частот 10 МГц – 30 ГГц с мощностью насыщения 27 дБм и коэффициентом усиления 12–15 дБ.

Таким образом, представленная диссертация содержит результат решения научной задачи, имеющей важное значение для развития техники СВЧ, в частности, разработки и внедрения сверхширокополосных монолитных интегральных схем усилителей распределенного усиления для использования в контрольно-измерительной аппаратуре.

Рекомендации

1. При необходимости проведения деэмбединга с целью получения внутренних параметров транзисторов и использования данных параметров при проектировании распределенных усилителей, зачастую лучше проводить деэмбединг в САПР. Современные САПР обладают функциями, позволяющими провести деэмбединг с использованием библиотек компонентов.

2. При проектировании сверхширокополосных УРУ диапазона частот до 67 ГГц необходимо акцентировать внимание на согласованной нагрузке на конце входной и выходной линий передач. Из-за данной нагрузки вместе с конденсатором, подключенным к земле, резко возрастает неравномерность коэффициента усиления на низких частотах. В связи с этим необходимо использовать различные демпфирующие цепи, делая нагрузку распределенной для снижения неравномерности усиления.

3. При использовании УРУ в СВЧ-блоках к топологии по питанию, смещению или к нагрузкам подключаются внешние дискретные конденсаторы в виде чип-компонентов. Данные конденсаторы подключаются к площадкам топологии УРУ через разварочные проволочки, которые имеют индуктивный характер. Номинал составляет в среднем 0,1 нГн. Данная индуктивность вместе с чип-конденсатором образует LC-элемент и из-за нее может возникнуть резонанс в полосе частот 0,5–3 ГГц. Данный факт следует учитывать при разработке.

4. Для диапазонных УРУ необходимо аккуратно спроектировать топологическую «втулку питания», через которую подается питание на топологию. Данная индуктивность вместе с паразитными выходными емкостями транзисторов и всей топологии может образовать резонансный контур. В связи с этим рекомендуется использовать демпфирующие цепи, состоящие из резистора малого номинала (5–

20 Ом) и конденсатора, подключенного к земле между индуктивностью и площадкой для подключения питания схемы.

Также рекомендуется использовать резистор номинала 5–10 Ом, включенный последовательно с индуктивностью, что также позволит снизить добротность и повысить устойчивость. Однако необходимо использовать резистор достаточной ширины, поскольку через него будет проходить ток от источника питания. Также при моделировании индуктивности необходимо учитывать ток, проходящий через индуктивность и использовать линии передачи достаточной ширины.

5. При разработке распределённого усилителя мощности необходимо особое внимание уделять моделированию устойчивости – делать запас по устойчивости с помощью резисторов в цепи обратной связи и подключать RC-цепи на стоке транзистора с общим затвором в схеме каскода.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Перспективно совмещение предложенной методики с нахождением оптимальной нагрузки для каждой ячейки распределенного усилителя мощности с целью увеличения выходной мощности, а также введение дополнительных демпфирующих цепей для увеличения устойчивости схемы.

2. Использование технологических процессов с минимальным коэффициентом шума и оптимизация входной части малошумящего усилителя: входной линии передачи, RCR-нагрузки и демпфирующих цепей с целью уменьшения коэффициента шума и увеличения полосы рабочих частот.

3. Использование транзисторов типа E-mode для разработки диапазонных распределенных усилителей, а также их оптимизация с целью расширения частотного диапазона. Использование транзисторов E-mode позволит использовать положительное напряжение для смещения транзисторов, а значит использовать только один источник питания, что гораздо удобнее для применения в СВЧ-блоках КИА.

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Данилов Д.С., Батоев Ц.М., Ламанов Ю.А., Хмара И.В., Загородний А.С. GaAs pHEMT усилитель распределенного усиления с диапазоном рабочих частот от 10 МГц до 35 ГГц // Успехи современной радиоэлектроники. 2026. Т. 80. № 4. С. 98–107. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202604-10>

2. Смеситель частот диапазона 13...67 ГГц / Д. С. Данилов, А. В. Дроздов, Ц. М. Батоев, Ю. А. Ламанов, А. С. Загородний, Н. Д. Малютин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 89–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-89-98.

3. GaAs монолитные интегральные схемы широкополосных смесителей частоты на основе диодов с барьером Шоттки / Данилов Д.С., Дроботун Н.Б. // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5-2 (102). С. 495-498.

4. Данилов Д. С., Батоев Ц. М., Харитонов Н. М., Малютин Н. Д. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей распределенного усиления.

Ural Radio Engineering Journal. 2026;10(2):223–237. DOI: 10.15826/urej.2026.10.2.005.

5. Сверхширокополосный диплексерный переключатель диапазона 0–50 ГГц для контрольно-измерительной аппаратуры / И. В. Хмара, Д. С. Данилов, А. С. Загородний, С. Н. Шарангович // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2026. – Т. 29, № 1(89). – С. 75-81. – DOI 10.21293/1818-0442-2026-29-1-75-81. – EDN GTZMRK.

Прочие публикации

6. Данилов Д.С., Дроботун Н.Б. Моделирование GaAs монолитно-интегральной схемы калибратора для векторного анализатора цепей на основе коммутационных рНЕМТ транзисторов с диапазоном частот DC-50 ГГц // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-1. С. 11–12.

Свидетельства о регистрации топологии МИС

7. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2019630149. AMP_20_50_GIO25 / Д.С. Данилов, Н.Б. Дроботун. – Заявка № 2019630143, дата поступления 23.07.2019. Зарегистрировано в Реестре ТИМС 01.08.2019.

8. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2019630150. AMP_DC_50_GI25_GO25 / Д.С. Данилов, Н.Б. Дроботун. – Заявка № 2019630144, дата поступления 23.07.2019. Зарегистрировано 01.08.2019.

9. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2019630151. AMP_DC_50_R29_GI25_GO25 / Д.С. Данилов, Н.Б. Дроботун. – Заявка № 2019630145, дата поступления 23.07.2019. Зарегистрировано 01.08.2019.

10. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2019630152. AMP_20_50_GIO35 / Д.С. Данилов, Н.Б. Дроботун. – Заявка № 2019630146, дата поступления 23.07.2019. Зарегистрировано 01.08.2019.

11. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2023630084. Усилитель мощности MP538 / Д.С. Данилов, А.В. Дроздов, Ц.М. Батоев, А.С. Загородний. – Заявка № 2023630056, дата поступления 05.05.2023. Зарегистрировано 06.07.2023.

12. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2024630010. Усилитель мощности MP549 / Д.С. Данилов, А.В. Дроздов, Ц.М. Батоев, А.С. Загородний. – Заявка № 2024630004, дата поступления 11.01.2024. Зарегистрировано 22.01.2024.

13. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2025630296. Усилитель мощности MP552V02 / И.В. Хмара, Д.С. Данилов, Ц.М. Батоев. – Заявка № 2025630179, дата поступления 14.07.2025. Зарегистрировано 16.09.2025.

14. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2025630303. Усилитель мощности MP548V03 / Д.С. Данилов, Ц.М. Батоев, И.В. Хмара. – Заявка № 2025630292, дата поступления 15.09.2025. Зарегистрировано 19.09.2025.

15. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2025630304. Малошумящий усилитель MP511V02 / Д.С. Данилов, Ц.М. Батоев, И.В. Хмара, Н.М. Харитонов. – Заявка № 2025630293, дата поступления 15.09.2025. Зарегистрировано 19.09.2025.

16. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2025630305. Малошумящий

усилитель MP511V01 / Д.С. Данилов, Ц.М. Батоев, И.В. Хмара, Н.М. Харитонов. – Заявка № 2025630294, дата поступления 15.09.2025. Зарегистрировано 19.09.2025.

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science

17. D. S. Danilov, A. V. Drozdov, T. M. Batoev and N. D. Malyutin, "GaAs pHEMT Traveling Wave Amplifiers up to 50 GHz," *2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Tomsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIBCON56144.2022.10003003.

18. Drobotun, N. A decade bandwidth mixer based on planar transformers and quasi-vertical Schottky diodes implemented in GaAs MMIC technology / N. Drobotun, D. Danilov // 2020 50th European Microwave Conference (EuMC). – 2021. – DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338211.

Доклады в трудах конференций, проводимых в России

19. Особенности измерения фазовой задержки в полосковых структурах с диэлектрическим заполнением нелинейными объемными кристаллами / Малютин Г.А., Арутюнян А.А., Данилов Д.С. В сборнике: Метрология в радиоэлектронике. Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. Менделеево, 2023. С. 240-247.

20. Электронный калибратор с диапазоном рабочих частот от 10 МГц до 40 ГГц / Д.С. Данилов, В.Г. Нечаев, А.С. Загородний, Г.Г. Гошин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, Томск, ТУСУР, 17-19 ноября 2021.