

На правах рукописи

Черкасов Кирилл Вячеславович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ ЧАСТОТ ПРИЕМНОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ
ПРОИЗВОДСТВА

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный
руководитель:

Мешков Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий приборостроения Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Официальные
оппоненты:

Савченко Владимир Петрович, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию АО “Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца”

Ванцов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 307 Московского авиационного института (МАИ)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени Российской научно-исследовательский институт радио имени М. И. Кривошеева» (ФГБУ НИИР).

Защита состоится «____» 2024 года в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте МГТУ им. Н. Э. Баумана www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «____» 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16,
к.т.н.

Сырицкий Антони Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ключевую роль в формировании показателей назначения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) играют устройства для преобразования частоты радиосигналов, такие как диодные смесители частот (СмЧ). Ключевым модулем СмЧ являются нелинейные элементы (НЭ) - их параметры оказывают доминирующее влияние на показатели назначения СмЧ. Использование резонансно-туннельных диодов (РТД) в качестве НЭ СмЧ позволяет улучшить показатели назначения данных устройств за счет обусловленных конструкцией диода и механизмом его функционирования преимуществ перед другими НЭ. Перспективность данного подхода подтверждается работами Т. С. L. G. Sollner, R. Tsu, L. Esaki, M. Asada, S. Suzuki, С. А. Мешкова, Ю. А. Иванова, И. А. Обухова, И. И. Абрамова, В. Ф. Елесина, Д. В. Громова, Н. В. Алкеева, А. А. Дорофеева и других отечественных и зарубежных авторов.

Вместе с тем, конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП) СмЧ приемной РЭА характеризуется высокой трудоемкостью этапа отработки изделий на технологичность, на котором обеспечиваются технологическая рациональность и преемственность конструкции изделия. Данный факт обусловлен недостаточной развитостью средств проектирования – существующие инженерные методики проектирования СмЧ не позволяют в полной мере учесть доминирующий вклад параметров конструкции НЭ и влияние технологических факторов на формирование показателей назначения СмЧ, что сужает круг возможных конструкторско-технологических решений и осложняет их поиск в процессе разработки СмЧ.

На основании изложенного представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на обеспечение технологичности СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства.

Цель диссертационной работы: повышение технологичности смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры на этапе подготовки производства.

Основные решаемые задачи:

1. Разработать методику прогнозирования показателей назначения смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры, позволяющую учитывать влияние технологических факторов;
2. Разработать методику оптимизации параметров конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры для повышения технологического выхода годных изделий на этапе подготовки производства;
3. Разработать программное обеспечение, предназначенное для конструкторско-технологического проектирования смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры.

Методы исследования

В работе использовались фундаментальные положения технологии приборостроения, радиотехники, управления качеством. Для прогнозирования показателей назначения СмЧ приемной РЭА использовались методы теории

линейных и нелинейных электрических цепей, электродинамического анализа микроволновых структур, методы численного моделирования процессов переноса вещества и заряда. Для прогнозирования технологического выхода годных изделий применялся метод вероятностного моделирования. Разработанные методики оптимизации базируются на методах нулевого и первого порядков с использованием методов теории чувствительности параметров РЭА.

Научная новизна:

1. Создана комплексная математическая модель смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая учесть влияние технологии изготовления в процессе прогнозирования их показателей назначения, которая представляет собой суперпозицию стохастической и детерминированной моделей, учитывающих доминирующий вклад параметров нелинейных элементов в формирование показателей назначения смесителей и формализующих влияние технологических факторов;
2. Разработан алгоритм оптимизации параметров конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры с учетом влияния технологии изготовления, позволяющий на этапе подготовки производства обеспечить заданный уровень технологического выхода годных изделий. Задача оптимизации решается поэтапно: на первом этапе осуществляется поиск сочетания параметров конструкции изделия, обеспечивающего попадание показателей назначения в заданные допуски, на втором - коррекция параметров полученного решения с учетом технологических факторов для обеспечения требуемого уровня технологического выхода годных изделий.

Практическая ценность работы:

1. Разработана реализованная в виде программного комплекса методика, позволяющая прогнозировать показатели назначения и технологический выход годных смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры;
2. Разработана реализованная в виде программного комплекса методика, позволяющая на этапе подготовки производства оптимизировать параметры конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры для достижения заданного уровня технологического выхода годных изделий в заданных условиях производства.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов.

Обоснованность теоретических положений обусловлена соответствием используемых в диссертационной работе методов исследования объекту исследования и протекающим в нем физическим процессам.

Достоверность результатов обеспечивается экспериментальной проверкой с использованием высокотехнологичного, поверенного измерительного оборудования и аттестованных методик измерения. Полученные результаты численного моделирования соответствуют экспериментальным данным и согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и зарубежных научно-технических источников в данной области.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов подтверждаются результатами обсуждения на международных и российских научно-технических конференциях, а также публикациями в научных изданиях,

входящих в перечень ВАК РФ, и изданиях, реферируемых в международных базах Web of Science и Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для решения задачи обеспечения технологичности смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры следует использовать комплексную математическую модель изделия, позволяющую учесть влияние технологии изготовления и представляющую собой сочетание детерминированной и стохастической моделей, учитывающих доминирующий вклад параметров нелинейного элемента в формирование показателей назначения смесителя и формализующих влияние на них технологических факторов;
2. Доминирующий вклад в технологический разброс показателей назначения смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры вносят технологические погрешности электрических параметров нелинейных элементов, обусловленные процессами формирования слоев активной области заданной толщины и химического состава и параметров топологии элемента;
3. Алгоритм оптимизации параметров конструкции смесителей частот для обеспечения заданного уровня технологичности основан на последовательном решении задач обеспечения соответствия показателей назначения установленным допускам и максимизации технологического выхода годных смесителей в заданных условиях производства.

Личный вклад автора. Все основные научные положения, определение цели, постановка задач, выводы и рекомендации сформулированы лично автором. Результаты теоретических исследований получены лично автором, экспериментальные исследования проводились с его участием. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов отражено в публикациях и подтверждено соавторами. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Апробация работы. Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на 9 научно-технических конференциях, в частности: International Russian Automation Conference «RusAutoCon 2023» (г. Сочи, 2023 г.), «Молодежный конкурс научно-технических работ и проектов на соискание премии им. академика А. И. Берга» (Москва, 2021 г.), International Russian Automation Conference «RusAutoCon 2020» (г. Сочи, 2020 г.); IAA/AAS SciTech Forum 2020 Cyber Edition International (г. Москва, 2020 г.); Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020 «ICMTMTE 2020» (г. Севастополь, 2020 г.); XV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2019 г.); International Russian Automation Conference «RusAutoCon 2019» (г. Сочи, 2019 г.); International Russian Automation Conference «RusAutoCon 2018» (г. Сочи, 2018 г.); Международной НТК «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies 2018 (EMMFT 2018)» (г. Воронеж, 2018 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов по специальности

«Проектирование и технология радиоэлектронных средств», магистров и бакалавров по направлению «Наноинженерия» МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждается актами, приложенными к диссертации.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 7 научных работах (из них 3 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ, 4 статьи в материалах международных и российских научно-технических конференций), 3 работы из перечисленных – в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science. Общий объем 3,3 п. л./1,3 п. л.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Содержит 182 страницы, в том числе 165 страниц основного текста. Список используемых источников содержит 163 наименования и приведен на 17 страницах. Работа содержит 85 иллюстраций и 41 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана ее актуальность, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указаны состав и структура диссертационной работы.

В первой главе обосновывается актуальность проблемы обеспечения технологичности СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства.

В формировании показателей назначения приемной РЭА значительную роль играют устройства, осуществляющие преобразования частоты радиосигналов, в частности, диодные СмЧ. К их показателям назначения относятся рабочая частота, потери преобразования, уровни комбинационных частот в спектре выходного сигнала, коэффициент стоячей волны, точка 1дБ-компрессии, точка пересечения продуктов интермодуляции 3-го порядка, коэффициент шума и др. Одним из путей совершенствования СмЧ приемной РЭА является применение РТД в качестве нелинейного элемента (НЭ), конструкция которых позволяет варьировать форму ВАХ диода, обеспечивая возможность улучшения показателей назначения СмЧ, что показано в работах ряда отечественных и зарубежных авторов.

Процесс КТПП смесителей приемной РЭА характеризуется высокой трудоемкостью этапа отработки конструкции устройства на технологичность. На данном этапе решаются задачи обеспечения технологической рациональности конструкции, технологической и конструктивной преемственности СмЧ. Согласно ГОСТ 4.465-87, РД 11 14.1008-89 к основным показателям технологичности СмЧ относится технологический выход годных. Таким образом, в процессе отработки конструкции изделия на технологичность (Рисунок 1) решается задача обеспечения заданного уровня технологического выхода годных, состоящая из двух подзадач: поиска конструкторско-технологического исполнения изделия, обеспечивающего заданный уровень показателей назначения изделия, и коррекции параметров найденного исполнения для достижения заданного уровня технологического выхода годных. В процессе решения задачи обеспечения заданного уровня технологического выхода годных СмЧ приемной РЭА расчетными методами необходимо учитывать влияние технологических факторов на показатели назначения изделия.



Рисунок 1. Алгоритм обеспечения технологической рациональности конструкции СмЧ

Существующие инженерные методики прогнозирования показателей назначения и технологического выхода годных СмЧ не позволяют в полной мере

учесть доминирующий вклад параметров конструкции НЭ и влияние технологических факторов, что обуславливает многократное повторение затратного этапа производства и проведения испытаний опытной партии изделий. Разработка математической модели СмЧ, способной учесть перечисленные факторы, позволит снизить трудоемкость этапа отработки конструкции изделия на технологичность за счет уменьшения итераций экспериментальных исследований опытной партии СмЧ.

Конструкция СмЧ состоит из подложки и расположенных на ней согласующих элементов, НЭ и цепей фильтрации на входе и выходе. Традиционно СмЧ реализуются в виде однотактной, балансной, двойной балансной, кольцевой или субгармонической схем. Для создания более бедного спектра на выходе СмЧ применяют балансные и двойные балансные схемы на основе четного количества НЭ, если в качестве полезных составляющих выходного спектра рассматриваются четные составляющие, или субгармонические схемы, если в качестве полезных составляющих рассматриваются нечетные составляющие выходного спектра. Достоинством РТД как НЭ СмЧ является уменьшение уровней паразитных комбинационных составляющих в выходном спектре за счет более пологой формы ВАХ по сравнению с традиционно используемыми в данном качестве диодов с барьером Шоттки (ДБШ), характеризующихся экспоненциальной ВАХ. Применение РТД в качестве НЭ СГС позволит существенно упростить конструкцию прибора – достаточно одного НЭ вместо пары антипараллельно включенных ДБШ.

Технологический процесс производства СмЧ включает этапы изготовления и подготовки подложки, формирования пассивных элементов и топологии на подложке, реализации межсоединений, формирования контактов, изготовления и монтажа НЭ.

Конструкция НЭ состоит из активной области, отвечающей за формирование нелинейной ВАХ, омических контактов (ОК) и легированных слоев эмиттера и коллектора между активной областью и контактами. Большинство параметров конструкции НЭ, в первую очередь толщины и химический состав слоев активной области, влияют одновременно на несколько параметров эквивалентной схемы, что обуславливает наличие корреляционных связей между ними и конфликтность.

Изготовление НЭ включает в себя этапы формирования активной области и последовательного формирования топологии – ОК, мезы и контактных площадок для монтажа диода в СмЧ. Операции формирования активной области и ОК НЭ характеризуются таким технологическим фактором, как воздействие высоких температур, что обуславливает возникновение диффузионных процессов в слоях активной области НЭ, влияющих на параметры эквивалентной схемы НЭ и, следовательно, на показатели назначения СмЧ.

Анализ существующих методик расчета показателей назначения СмЧ приемной РЭА показал, что они неспособны в полной мере учесть влияние параметров конструкции НЭ и технологических факторов на параметры эквивалентной схемы НЭ и показателей назначения СмЧ. Следствием этого является высокая трудоемкость этапа конструкторско-технологического

проектирования из-за недостаточной точности прогнозирования технологического выхода годных получаемых схемно-конструкторских решений. Выявленные недостатки обуславливают невозможность эффективного решения задачи обеспечения заданного уровня технологического выхода годных СмЧ приемной РЭА на этапе КТПП без совершенствования методик обеспечения требуемых показателей назначения.

При решении задачи обеспечения заданного уровня технологического выхода годных СмЧ приемной РЭА помимо доминирующего влияния параметров эквивалентной схемы НЭ на показатели назначения СмЧ необходимо учитывать влияние условий производства, обуславливающих технологические погрешности параметров конструкции изделия. Существующие методики прогнозирования технологического выхода годных СмЧ не учитывают влияния технологических разбросов и корреляционных связей параметров эквивалентной схемы НЭ под влиянием технологических погрешностей параметров конструкции на распределения показателей назначения изделия, что снижает адекватность получаемых оценок и увеличивает трудоемкость отработки конструкции СмЧ на технологичность в процессе подготовки производства, не позволяя эффективно решать задачу обеспечения заданного уровня технологического выхода годных изделий.

Таким образом, решение задачи обеспечения заданного уровня технологического выхода годных требует наличия методик и инженерного инструментария, позволяющих прогнозировать показатели назначения и технологический выход годных различных вариантов конструкторско-технологических исполнений изделий и осуществлять целенаправленный выбор исполнения, соответствующего заданным требованиям, с учетом технологических факторов и доминирующего вклада параметров НЭ в формирование показателей назначения СмЧ.

Изложенное в главе 1 показывает актуальность проблемы обеспечения технологичности СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства, позволяет обосновать научную и практическую значимость поставленной цели и решаемых в работе задач.

Вторая глава посвящена разработке методики, позволяющей учитывать влияние технологии изготовления при прогнозировании показателей назначения СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства.

Предложен поэтапный подход к решению задачи обеспечения заданного уровня технологического выхода годных СмЧ приемной РЭА, представленный в виде структурной схемы и заключающийся в последовательном выполнении преобразований, совершаемых в пространствах конструкторско-технологических параметров и показателей назначения изделия. Первое преобразование позволяет прогнозировать показатели назначения СмЧ, связывая их с параметрами конструкции и влиянием технологических факторов. Второе отвечает за коррекцию параметров конструкции изделия для обеспечения попадания его показателей назначения в заданные допуски. Третье вводит вероятностную меру конструкторско-технологических параметров СмЧ, позволяя получать статистические распределения показателей назначения и прогнозировать

технологический выход годных изделий. Целью четвертого преобразования является обеспечение заданного уровня технологического выхода годных смесителей путем определения поправок на номиналы показателей назначения СмЧ и соответствующего им конструкторско-технологического исполнения изделия.

В рамках решения поставленной задачи разработана комплексная математическая модель СмЧ (Рисунок 2), позволяющая прогнозировать показатели назначения изделия с учетом технологических факторов. Разработанная комплексная модель представляет собой суперпозицию детерминированной и стохастической моделей изделия, включает в себя математические модели смесителя и нелинейного элемента и позволяет осуществлять численное моделирование номинальных значений и статистических распределений показателей назначения смесителей.

| Комплексная математическая модель смесителей частот радиоэлектронной аппаратуры | |
|---|---|
| <p>Детерминированная математическая модель показателей назначения смесителей частот</p> <p>Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента:</p> $I(U) = f(U) = \sum_{k=0}^{k=M} a_k U^k$ <p>Смешивание частот сигнала и гетеродина</p> $\begin{cases} u_c(t) = U_c e^{2\pi f_c t} + U_c^* e^{-2\pi f_c t} \\ u_\Gamma(t) = U_\Gamma e^{2\pi f_\Gamma t} + U_\Gamma^* e^{-2\pi f_\Gamma t} \\ u_{\Pi\text{Ч}}(t) = U_{\Pi\text{Ч}} e^{2\pi f_{\Pi\text{Ч}} t} + U_{\Pi\text{Ч}}^* e^{-2\pi f_{\Pi\text{Ч}} t} \\ i_c(t) = I_c e^{2\pi f_c t} + I_c^* e^{-2\pi f_c t} \\ i_\Gamma(t) = I_\Gamma e^{2\pi f_\Gamma t} + I_\Gamma^* e^{-2\pi f_\Gamma t} \\ i_{\Pi\text{Ч}}(t) = I_{\Pi\text{Ч}} e^{2\pi f_{\Pi\text{Ч}} t} + I_{\Pi\text{Ч}}^* e^{-2\pi f_{\Pi\text{Ч}} t} \\ u(t) = u_c + u_\Gamma + u_{\Pi\text{Ч}} \\ i(t) = i_c + i_\Gamma + i_{\Pi\text{Ч}} \end{cases}$ <p>Коэффициент преобразования смесителя</p> $\gamma = \frac{\frac{ u_{\Pi\text{Ч}}^2 }{R_{\text{вых}}}}{\frac{ i_c^2 }{4g_{\text{вх}}}} = \frac{4 u_{\Pi\text{Ч}}^2 g_{\text{вх}}}{ i_c^2 R_{\text{вых}}}$ | <p>Вероятностная модель смесителей частот</p> <p>X – параметры конструкции σ_i - технологический разброс i-го параметра конструкции Y – показатели назначения</p> $\begin{aligned} X_i(x_{\text{ном}}, \sigma) &= f_i(x_{i_{\text{ном}}}, \sigma_i), \\ \bar{X}_{\text{СмЧ}}(\bar{x}_{\text{ном}}, \bar{\sigma}) &= \{f_1(x_{1_{\text{ном}}}, \sigma_1), \dots, f_N(x_{N_{\text{ном}}}, \sigma_N)\}, \\ Y_j(\bar{X}_{\text{СмЧ}}) &= g_j(X_1, \dots, X_N), \\ M\left(\frac{\Delta Y_j}{Y_j}\right) &= M\left(\frac{\Delta Y_j}{Y_j}\right) \pm \delta\left(\frac{\Delta Y_j}{Y_j}\right), \\ M\left(\frac{\Delta Y_j}{Y_j}\right) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{f} M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) = \sum_{i=1}^n A_i M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right), \\ \left(\frac{\Delta Y_j}{Y_j}\right) &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{f}\right)^2 \delta^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) + 2 \sum_{i < j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{f} \cdot r_{ij} \delta\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta x_j}{x_j}\right)}, \\ \bar{Y}_{\text{СмЧ}_k}(\bar{X}_{\text{СмЧ}_k}) &= \{Y_1(\bar{X}_{\text{СмЧ}_k}), \dots, Y_M(\bar{X}_{\text{СмЧ}_k})\} \\ \bar{Y}_{\text{СмЧ}}(\bar{x}_{\text{СмЧ}_{\text{ном}}}, \bar{\sigma}) &= \{\bar{Y}_{\text{СмЧ}_1}(\bar{X}_{\text{СмЧ}_1}(\bar{x}_{\text{СмЧ}_{\text{ном}}}, \bar{\sigma})), \dots, \bar{Y}_{\text{СмЧ}_K}(\bar{X}_{\text{СмЧ}_K}(\bar{x}_{\text{СмЧ}_{\text{ном}}}, \bar{\sigma}))\} \end{aligned}$ |
| Комбинированная математическая модель нелинейного элемента | |
| <p>Детерминированная математическая модель нелинейного элемента</p> <p>Математическая модель нелинейной проводимости</p> <p>Математическая модель паразитных параметров эквивалентной схемы</p> <p>Математическая модель технологического фактора воздействия высокой температуры на параметры эквивалентной схемы нелинейного элемента на этапе изготовления</p> | <p>Вероятностная модель нелинейного элемента</p> <p>Метод статистических испытаний</p> |

Рисунок 2. Состав комплексной математической модели СмЧ

Комплексная модель СмЧ основывается на методах теории линейных и нелинейных электрических цепей, электродинамического анализа микроволновых структур, позволяющих на основе параметров конструкции изделия

прогнозировать его показатели назначения и получать их статистические распределения с помощью метода вероятностного моделирования на основе данных о технологических разбросах параметров конструкции СмЧ. Данная модель может быть реализована как аналитически, так и численно с использованием прикладного программного обеспечения, в том числе САПР. Эквивалентная схема НЭ СмЧ состоит из нелинейной проводимости, определяющей форму ВАХ НЭ, и паразитных параметров: емкости, индуктивности и последовательного сопротивления потерь. Параметры эквивалентной схемы задаются пользователем на основе экспериментальных данных или результатов расчета.

Модель НЭ (рисунок 3) позволяет осуществлять численное моделирование токопереноса в НЭ и включает в себя соотношения, связывающие нелинейную проводимость и паразитные параметры диода с параметрами слоев активной области и топологии, и уравнения, описывающие диффузионные процессы, вызванные технологическим фактором воздействия высокой температуры и протекающие в слоях активной области на этапах формирования активной области и омических контактов НЭ.

| Детерминированная модель нелинейного элемента | |
|---|---|
| <p><u>Нелинейная проводимость активной области</u></p> <p><u>Туннельная прозрачность (метод матриц переноса)</u></p> $T(E, U) = \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} = \hat{M}_{N-1} \cdot \dots \cdot \hat{M}_0 \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \hat{M}_\Sigma \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}$ <p><u>Функция подачи электронов в активную область</u></p> $F(E, U) = \frac{1}{\beta * E_F} * \ln \left(\frac{1 + e^{\beta(E_F - E)}}{1 - e^{\beta(E_F - E - eU)}} \right); \beta = \frac{1}{k_B T};$ <p><u>Плотность тока через активную область (формула Цу-Есаки)</u></p> $J(U) = \frac{2m^* e k_B T}{(2\pi)^2 \hbar^3} \int_{\min(U_1, U_N)}^{\max(U_1, U_N)} T(E_z) * F(E_z) dE_z$ $I_{\text{НЭ}}(U) = J(U_{\text{полн.}}) * S_{\text{меза}}$ $U_{\text{полн.}} = U_{\text{смеш.}} + I_{\text{НЭ}}(U_{\text{смеш.}}) * R_S$ <p><u>Паразитные параметры</u></p> $R_S = R_{\text{верх_OK}} + R_{\text{ниж_OK}} + R_{\text{верх_ПКО}} + R_{\text{ниж_ПКО}} + 2(R_{\text{КП}} + R_{\text{ГМ}})$ $R_{\text{верх_OK}} = \frac{\rho_{\text{OK}}}{S_{\text{верх_OK}}}; R_{\text{ниж_OK}} = \frac{\rho_{\text{OK}}}{S_{\text{верх_OK}}}; R_{\text{верх_ПКО}} = \frac{t_{\text{верх_ПКО}}}{S_{\text{меза}} * e * n * \mu};$ $R_{\text{ниж_ПКО}} = \frac{t_{\text{ниж_ПКО}}}{S_{\text{меза}} * e * n * \mu}; R_{\text{КП}} = \frac{\rho_{\text{КП}}}{S_{\text{КП}}}; R_{\text{ГМ}} = \frac{\rho_{\text{ГМ}} * l_{\text{ГМ}}}{w_{\text{ГМ}} * t_{\text{ГМ}}}$ $C = \frac{S_{\text{меза}}}{\frac{t_{\text{яма}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{яма}}} + \frac{t_{\text{эмит_бар}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{эмит_бар}}} + \frac{t_{\text{колл_бар}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{колл_бар}}} + \frac{t_{\text{oc}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{oc}}}}$ $L_Q = \frac{\tau}{G}; G = \frac{dI}{dU}; \tau = \frac{\hbar}{\Delta E_n}; \Delta E_n = E_n e^{-2t_{\text{бар}} \sqrt{\frac{2m^* e_{\text{бар}} (E_{\text{бар}} - E_n)}{\hbar^2}}};$ $L_{\text{ГМ}} = \frac{\mu_0 l_{\text{ГМ}}}{2\pi} \left[\log \left(\frac{2l_{\text{ГМ}}}{w_{\text{ГМ}} + t_{\text{ГМ}}} \right) + \frac{1}{2} + \frac{2}{9} \left(\frac{w_{\text{ГМ}} + t_{\text{ГМ}}}{l_{\text{ГМ}}} \right) \right]$ | <p><u>Диффузионные процессы в приконтактных областях (диффузия Si) и в слоях активной области (диффузия Al) под влиянием технологического фактора воздействия высокой температуры</u></p> $D(T) = D_0 e^{-\frac{E_{\text{акт}}}{k_B T}} \left(\frac{n_{Si,Al}}{n_i} \right)^3; \frac{dc}{dt} = D \frac{d^2 c}{dz^2};$ $c(z, t) = c_1 + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^L (c_j - c_{j-1}) erfc(\frac{z_j - z}{2\sqrt{Dt}})$ <p><u>Индексы и обозначения</u></p> <p>T – температура; E – энергия носителя заряда; n – концентрация носителей заряда; μ – подвижность носителей заряда; n_{Si,Al} – концентрация легирующей примеси; n_i – концентрация собственных носителей заряда; S – площадь; c – концентрация диффузанта; τ – время жизни носителей заряда в активной области; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; Е_{акт} – энергия активации диффузационного процесса.</p> <p><u>Линейные размеры:</u> l – длина; w – ширина; t – толщина.</p> <p><u>Константы:</u> ε₀ – диэлектрическая постоянная; μ₀ – магнитная постоянная; ħ – постоянная Дирака; k_B – постоянная Больцмана; e – заряд электрона.</p> <p><u>Индексы:</u> OK – омические контакты; КП – контактные площадки; ГМ – гальванические мостики; ПКО – приконтактные области;</p> |

Рисунок 3. Детерминированная модель НЭ

При прогнозировании технологического выхода годных СмЧ необходимо учитывать технологический разброс ВАХ и паразитных параметров НЭ. Для этого разработана стохастическая составляющая комбинированной модели, полученная

посредством введения вероятностной меры параметров конструкции СмЧ и, как следствие, показателей назначения изделия, а также дополнения входных параметров значениями технологических разбросов параметров конструкции СмЧ и законами распределения, которым подчиняются распределения этих параметров.

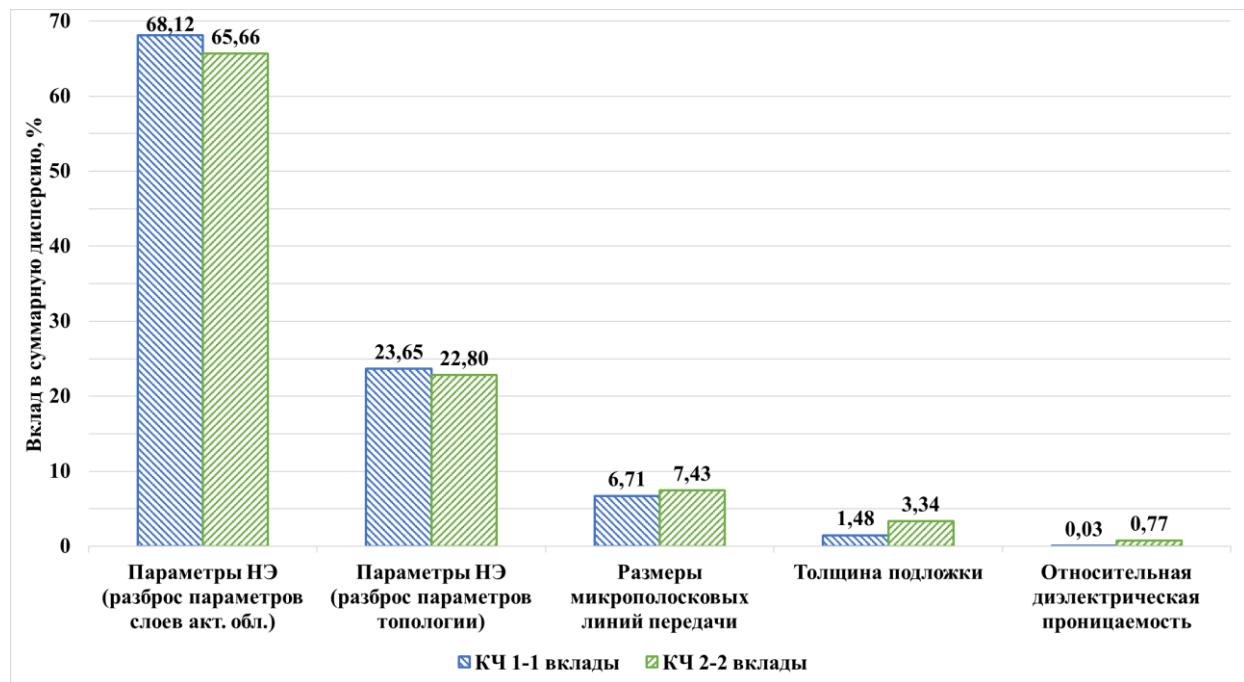
Разработанный на основе стохастической модели алгоритм прогнозирования технологического выхода годных СмЧ базируется на методе вероятностного моделирования, позволяет получать статистические распределения показателей назначения изделия под влиянием технологических разбросов параметров конструкции СмЧ. Данный алгоритм включает в себя вероятностное моделирование характеристик НЭ, проводимое с помощью стохастической составляющей модели НЭ, позволяющей получать статистические распределения параметров эквивалентной схемы под влиянием технологических разбросов параметров конструкции НЭ и оценивать технологический выход годных элементов.

На основе получаемых с помощью стохастической модели СмЧ распределений показателей назначения осуществляется прогнозирование технологического выхода годных изделий.

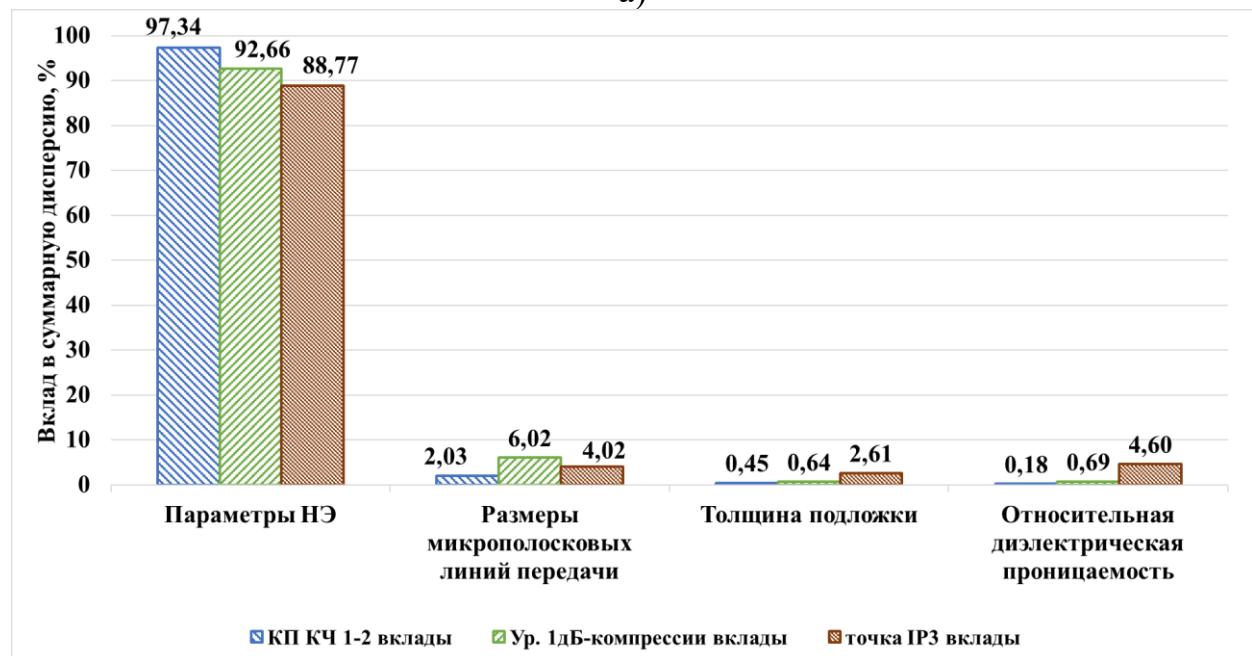
Проведенное сравнение результатов моделирования показателей назначения СмЧ посредством разработанной комбинированной модели изделия с экспериментальными данными показало, что теоретические результаты согласуются с результатами натурных экспериментов, что позволяет перейти к исследованию влияния технологии изготовления СмЧ на распределение их показателей назначения на примере балансного (БС) СмЧ диапазона 4...8 ГГц и субгармонического (СГС) СмЧ диапазона 10...11 ГГц. В качестве показателей назначения БС рассматриваются коэффициенты передачи комбинационных частот (КЧ) вида $mfc - nfg$ (m – число гармоник сигнала, n – число гармоник гетеродина) КЧ 1-1 и КЧ 2-2, в качестве показателей назначения СГС – коэффициент передачи промежуточной частоты $f_c - 2f_g = f_{p\chi}$ (КЧ 1-2) и верхняя граница динамического диапазона по уровню 1дБ-компрессии и интермодуляции (последняя определяется по положению точки IP3).

Установлено, что доминирующий вклад в технологический разброс показателей назначения исследуемых СмЧ вносят разбросы ВАХ и паразитных параметров НЭ под влиянием технологических погрешностей параметров конструкции НЭ. Вклады дисперсий показателей назначения БС и СГС под влиянием различных групп параметров конструкции СмЧ в суммарную дисперсию приведены на Рисунке 4.

Для установления доминирующих факторов, обуславливающих технологический разброс ВАХ и параметров эквивалентной схемы НЭ, с помощью разработанной комбинированной модели НЭ исследовано влияние технологии изготовления на распределение параметров эквивалентной схемы и величины тока в рабочей точке ВАХ НЭ. Для исследования влияния технологии изготовления на технологические разбросы параметров эквивалентной схемы параметры конструкции НЭ были сгруппированы по технологическим операциям, определяющим их технологические разбросы.



a)



б)

Рисунок 4. Вклады технологических разбросов различных групп параметров конструкции СмЧ в технологические разбросы показателей назначения смесителя: а) БС; б) СГС

Проведенное исследование показало, что наибольший вклад в разброс величин токов в рабочей точке ВАХ вносит технологический разброс толщин и химического состава слоев активной области, а в распределение паразитной емкости – разброс размеров мезы НЭ. Разброс химического состава и толщин слоев активной области обусловлен погрешностями технологических операций формирования активной области, разброс размеров мезы – технологическими погрешностями фотолитографии.

Для оценки адекватности результатов моделирования экспериментальным данным проведено сравнение смоделированных статистических распределений тока в рабочей точке ВАХ и параметров эквивалентной схемы НЭ с распределениями экспериментально измеренных параметров исследуемых НЭ. Сравнение показало, что результаты численного моделирования не противоречат экспериментальным данным.

Таким образом, в главе 2 разработана методика, позволяющая учитывать влияние технологии изготовления при прогнозировании показателей назначения СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства. Методика основывается на комплексной математической модели СмЧ приемной РЭА, состоящей из стохастической и детерминированной моделей, учитывающих доминирующий вклад параметров НЭ в формирование показателей назначения СмЧ и формализующих влияние на них технологических факторов. В результате проведенного исследования установлено, что доминирующий вклад (до 90%) в технологический разброс показателей назначения СмЧ вносят технологические разбросы электрических параметров эквивалентной схемы НЭ, обусловленные формированием параметров топологии элемента и слоев активной области заданной толщины и химического состава.

Полученные результаты позволяют перейти к решению проблемы обеспечения заданного уровня технологического выхода годных СмЧ приемной РЭА на этапе подготовки производства.

Третья глава посвящена разработке методики оптимизации параметров конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры для повышения технологического выхода годных изделий на этапе подготовки производства.

Основу данной методики составляет алгоритм оптимизации параметров конструкции СмЧ для повышения технологического выхода годных изделий в заданных условиях производства, при разработке которого принимается допущение об устойчивости технологического процесса изготовления СмЧ. Разработка данного алгоритма сопряжена с решением задачи обеспечения его быстродействия, обусловленной необходимостью использования ресурсоемкого метода вероятностного моделирования при прогнозировании технологического выхода годных в процессе оптимизации. Для этого решение задачи оптимизации разделено на шесть последовательных этапов.

1. Выбор номинальных значений параметров конструкции СмЧ и НЭ, требуемых для получения заданного уровня показателей назначения;
2. Оценка технологического выхода годных для полученного сочетания номинальных значений;
3. Коррекция номиналов показателей назначения СмЧ в пределах заданных допусков с целью повышения технологического выхода годных изделий.
4. Проверка статистической значимости полученного приращения технологического выхода годных. Если приращение значимо – к п. 5, иначе – к п. 3.

5. Целенаправленный выбор номинальных значений параметров конструкции СмЧ и НЭ, обеспечивающих скорректированные показатели назначения изделия.
6. Проверка полученного решения путем сравнения оценки технологического выхода годных изделий для оптимизированной конструкции СмЧ с полученным в п. 4. Если различие статистически не значимо – конец процедуры, иначе – к п. 3.

Описанный подход повышает быстродействие алгоритма оптимизации и снижает трудоемкость отработки конструкции НЭ и СмЧ на их основе на технологичность в процессе подготовки производства за счет минимизации использования метода вероятностного моделирования в процессе поиска конструкторско-технологического исполнения изделия, отвечающего заданным требованиям.

Задача обеспечения попадания номиналов показателей назначения СмЧ в заданные допуски с учетом технологических факторов, решаемая на первом и пятом этапах оптимизации, состоит из двух подзадач: определения параметров конструкции СмЧ, включая параметры эквивалентной схемы НЭ, обеспечивающих соответствие показателей назначения СмЧ заданным требованиям, и целенаправленного выбора параметров конструкции НЭ для обеспечения требуемых параметров эквивалентной схемы.

Первая подзадача решается посредством САПР, для реализации второй разработан алгоритм оптимизации параметров конструкции НЭ. Целевой функцией является степень отклонения формы ВАХ НЭ от требуемой, выраженная в виде нормированной площади между требуемой ВАХ и полученной на текущей итерации. Критерий оптимальности – минимум целевой функции, управляемыми параметрами оптимизации являются номинальные значения параметров конструкции НЭ, в качестве ограничений выступают требования к параметрам эквивалентной схемы и коэффициентам полинома, описывающего начальный участок целевой ВАХ. Разработанный алгоритм использует метод покоординатного спуска, для повышения быстродействия которого в алгоритм введен этап расчета влияния варьирования параметров конструкции НЭ на скорость приближения ВАХ элемента к оптимальной, позволяющий на каждой итерации выбрать наиболее значимый параметр, варьирование которого обеспечивает наискорейшее приближение к оптимуму.

Разработанный алгоритм повышения технологического выхода годных СмЧ апробирован на БС и СГС приемной РЭА, исследованных в главе 2. С помощью САПР AWRDE определены требования к форме ВАХ и параметрам эквивалентной схемы оптимизируемых СмЧ, для обеспечения которых с помощью разработанного алгоритма определены параметры конструкции рассматриваемых СмЧ и их НЭ. Технологический выход годных для оптимизированных параметров конструкции рассматриваемых СмЧ составил 93% для БС и 98% для СГС.

Таким образом, в главе 3 разработан и апробирован алгоритм оптимизации параметров конструкции СмЧ приемной РЭА с учетом влияния технологии

изготовления, позволяющий на этапе подготовки производства обеспечить заданный уровень технологического выхода годных изделий.

Четвертая глава посвящена разработке пакета прикладных программ, предназначенных для конструкторско-технологического проектирования СмЧ приемной РЭА. На основе предложенных в работе комплексной математической модели СмЧ приемной РЭА и алгоритма оптимизации параметров конструкции СмЧ приемной РЭА для обеспечения заданного уровня технологического выхода годных изделий разработаны две взаимосвязанные методики, реализованные виде программного обеспечения для конструкторско-технологического проектирования СмЧ:

1. Методика, позволяющая прогнозировать показатели назначения и технологический выход годных СмЧ приемной РЭА;
2. Методика оптимизации параметров конструкции СмЧ приемной РЭА для достижения заданного уровня технологического выхода годных изделий в заданных условиях производства.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Обоснованы актуальность, научная и практическая значимость проблемы обеспечения технологичности смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры на этапе подготовки производства.
2. Предложена обобщенная структурная схема процесса оптимизации конструкторско-технологических параметров смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры по критерию максимума технологического выхода годных, обосновывающая поэтапный подход к решению данной задачи.
3. Предложена комплексная математическая модель смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая учесть влияние технологии изготовления при прогнозировании показателей назначения и представляющая собой сочетание стохастической и детерминированной моделей, учитывающих доминирующий вклад параметров нелинейного элемента в формирование показателей назначения смесителя и формализующих влияние на них технологических факторов. Показано, что результаты численного моделирования, полученные с помощью разработанной модели, не противоречат экспериментальным данным.
4. Установлено, что доминирующий вклад (до 90%) в технологический разброс показателей назначения смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры вносят технологические погрешности электрических параметров нелинейного элемента. В свою очередь, технологические погрешности электрических параметров нелинейных элементов обусловлены процессами формирования параметров топологии элементов и слоев активной области с заданными толщинами и химическим составом.
5. Разработан алгоритм оптимизации параметров конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры с учетом влияния технологии изготовления, позволяющий на этапе подготовки производства повысить технологический выход годных изделий. Задача оптимизации решается путем

- ее разбиения на последовательно решаемые подзадачи: определение формы вольт-амперной характеристики и параметров эквивалентной схемы, обеспечивающих требуемый уровень показателей назначения; поиск конструкторско-технологического исполнения изделия, обладающего требуемыми параметрами эквивалентной схемы и формой вольт-амперной характеристики; прогнозирование технологического выхода годных изделий для найденного исполнения; коррекция номиналов показателей назначения для соответствия требованиям к уровню технологического выхода годных изделий; поиск конструкторско-технологического исполнения смесителя, соответствующего скорректированным требованиям к показателям назначения; проверка полученного решения.
6. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны прикладные программы для конструкторско-технологического проектирования смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры. Разработанные программы позволяют прогнозировать показатели назначения и технологический выход годных смесителей в заданных условиях производства, а также осуществлять рациональный выбор конструкторско-технологического исполнения изделия, отвечающего заданным требованиям.
 7. С помощью разработанного алгоритма оптимизации параметров конструкции смесителей частот приемной радиоэлектронной аппаратуры получены новые конструкторско-технологические решения, позволяющие повысить технологический выход годных смесителей в заданных условиях производства. Результаты внедрены в НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ имени Н. Э. Баумана, а также в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», магистров и бакалавров по направлению «Наноинженерия» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Список основных публикаций автора по теме диссертации:

1. Конструкторско-технологическая оптимизация электрических характеристик широкополосного балансного смесителя сверхвысокочастотного диапазона на базе резонансно-туннельных диодов / К. В. Черкасов [и др.] // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 6. С. 590-595. (0,37 п. л./0,2 п. л.) Автором разработан алгоритм целенаправленного выбора параметров конструкции резонансно-туннельных диодов для обеспечения требуемой для конкретного смесителя формы вольт-амперной характеристики, определены параметры конструкции нелинейного элемента исследуемого смесителя, которые обеспечивают требуемую форму ВАХ.
2. Программный комплекс расчета начального участка ВАХ резонансно-туннельного диода с возможностью проведения машинного статистического эксперимента / К.В. Черкасов, [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 28-36. (0,56 п.л./0,2 п. л.) Автором разработан программный комплекс, реализующий алгоритм компьютерного статистического эксперимента для прогнозирования распределений тока начального участка вольт-амперных характеристик РТД.
3. Анализ вероятностных характеристик электрических параметров

широкополосного балансного смесителя частот СВЧ радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов и оценка его надежности / К.В. Черкасов [и др.] // РЭНСИТ. 2021. Т. 13, № 1. С. 19-26. (0,50 п. л./ 0,17 п. л.) Автором получены статистические распределения показателей назначения смесителя и выполнена оценка его надежности.

4. Моделирование кинетики вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных диодов смесителей СВЧ радиосигналов под действием дестабилизирующих факторов / К.В. Черкасов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, №10. С. 929–940. (0,75 п. л./0,22 п. л.) Автором разработан высокоскоростной алгоритм прогнозирования кинетики вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных диодов в условиях воздействия эксплуатационных и технологических факторов.

5. Impact of technological errors of design parameters of broadband radio signals mixer based on resonant-tunneling diode on its electrical characteristics / K.V. Cherkasov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 971. P. 032076. (0,37 п. л./0,13 п. л.) Автором проведен компьютерный статистический эксперимент по оценке вкладов технологических разбросов параметров конструкции исследуемого смесителя в распределения его показателей назначения.

6. Kinetics of electrical characteristics of balanced SHF mixer based on resonant-tunnelling diodes under operational factors influence / K.V. Cherkasov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Ser. V. 1560. P. 012030. (0,37 п. л./0,2 п. л.) Автором проведен компьютерный эксперимент по прогнозированию кинетики показателей назначения балансного смесителя на основе резонансно-туннельных диодов.

7. Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O. The Software Package for Modeling and Optimizing the Electrical Characteristics of Non-Linear Frequency Converters of Radio Signals Based on Resonant Tunneling Diodes // 2020 Russian Automation Conference (RusAutoCon 2020). P. 664-669. (0,37 п. л./0,18 п. л.) Автором разработан программный комплекс для прогнозирования и оптимизации показателей назначения смесителей частот на основе резонансно-туннельных диодов.