

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.317.772

**ГУСИНСКИЙ**  
**Александр Владимирович**

**СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА  
ДЛИН ВОЛН НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ  
МНОГОПОЛЮСНИКА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный консультант **Богущ Вадим Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ректор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Официальные оппоненты: **Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

**Савенко Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник 4 научно-исследовательского управления Государственного учреждения «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

**Гринчик Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории теплофизических измерений Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси».

Оппонирующая организация Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Защита состоится «28» апреля 2022 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «24» марта 2022 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



О.В. Бойправ

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиоэлектроника представляет собой обширную область науки и техники, которая стремительно развивается, охватывая новые сферы применения. При этом можно выделить следующие направления развития:

- разработка и создание новой элементной базы в уже освоенных частотных диапазонах;

- освоение новых частотных диапазонов, включая создание радиоэлектронных систем с новыми свойствами и характеристиками, а также элементной базы и средств метрологического обеспечения для них;

- широкое использование средств цифровой обработки сигналов и средств вычислительной техники в радиоэлектронных системах и средствах метрологического обеспечения для них;

- разработка новых научных и технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанной с радиоэлектроникой;

- совершенствование метрологического обеспечения в целях повышения эффективности управления современными изделиями радиоэлектроники.

Особое место в области радиоэлектроники занимают вопросы создания и применения радиоэлектронных сверхвысокочастотных средств и систем, в том числе миллиметрового диапазона длин волн. При этом важной задачей является инструментальный анализ сверхвысокочастотных средств и систем, который проводится на всех этапах их жизненного цикла и включает в себя проверку соответствия их характеристик и параметров специфическим требованиям.

Многообразие используемых в сверхвысокочастотных диапазонах типов линий передач, в том числе в миллиметровом диапазоне длин волн, обуславливает многообразие параметров и характеристик, описывающих их свойства и требующих экспериментального определения. Это приводит в свою очередь к необходимости решения разнообразных измерительных задач, что возможно только с помощью соответствующих средств измерений.

Современные методы анализа и проектирования сверхвысокочастотных устройств и систем в значительной мере базируются на том их представлении, что они изображаются некими эквивалентными многополюсниками, описываемыми определенной системой сигналов и параметров. При исследовании сверхвысокочастотных устройств и систем важно знать, насколько качественно и без потерь обеспечивается передача через них сигналов, несущих полезную информацию. Поэтому измерение параметров сверхвысокочастотных сигналов (мощность, флуктуации) и характеристик цепей (усиление, ослабление, характеристики рассогласования) является актуальной научно-практической задачей, решение которой имеет важное научное и практическое значение для создания автоматизированных средств измерений.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) темами**

Работы выполнялись в рамках следующих государственных научно-технических программ (далее – ГНТП), государственных программ прикладных исследований (далее – ГППИ), контрактов и хоздоговорных работ: ГППИ «Приборостроение», план НАН Беларуси, задание 3.15, договор № 04-3015 от 12.01.2004 г.; ГНТП «Радиоэлектроника-2», задание РС21 «Синтезатор», договор № 12-1068Б от 14.12.2012 г.; ГНТП «Оптиэл», задание 11, договор № 14-1079Б от 30.05.2014 г.; ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Научные приборы», задание 2.02, договор № 08-1136Б от 01.09.2008 г.; ГНТП «Эталоны и научные приборы 2016–2020», подпрограмма «Уникальное научное оборудование», задание 2.1; ГНТП «Приборы для научных исследований», план НАН Беларуси, задание 2.02, договор № 99-11287 от 01.07.1999 г.; ГНТП «Приборы для научных исследований», план НАН Беларуси, задание 2.10, договор № 04-1045 от 12.10.2004 г.; ГНТП «Радиоэлектроника-2», задание РС10, договор № 11-1143 от 29.09.2011 г.; ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Эталоны Беларуси», постановление СМ Республики Беларусь № 5 от 04.01.2009 г.; ГНТП «Оптиэл», задание 3, договор № 11-1112Б от 15.06.2011 г.; ГНТП «Приборы для научных исследований», договор № 01-1093 от 24.10.2001 г.; ГППИ «Приборостроение», план НАН Беларуси, задание 12.7 МПФИ «Мониторинг», договор № 04-3016 от 27.01.2004 г.; ГБЦ № 05-3053 от 01.01.2005 г.; контракт № RCI/BSUIR/2/99, договор № 99-1132 от 22.12.1999 г.; контракт № RCI/BSUIR/3/99, договор № 99-1133 от 01.07.1999 г.; хоздоговор № 02-1120 от 11.10.2002 г.; контракт № YES/BSUIR/01/03, задание 3.12, договор № 03-1035 от 15.03.2003 г.; контракт № DEAL/BSUIR/MWM/04/04, договор № 03-1105 от 01.09.2003 г.; контракт PSRB/BSUIR/01/01, задание 3.15, договор № 04-1005 от 04.10.2003 г.; контракт № V002-10DOCX/S47003BS/BSUIR/MWM/01/10/01, договор № 10-1132К от 08.02.2010 г.; контракт № V002-10DOCX/S47003BS/BSUIR/MWM/01/10, договор № 10-1134К; контракт № TUB/MWM/ 0511 от 26.04.2011 г., договор № 11-1049К.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является решение комплексной научно-технической проблемы, заключающейся в концептуальном развитии основ проектирования, разработки и изготовления современных автоматизированных

средств измерений миллиметрового диапазона длин волн, а именно: генераторов качающейся частоты, скалярных и векторных анализаторов цепей, измерителей мощности и флуктуаций, рабочих эталонов; усовершенствование средств измерений, рабочих эталонов – расширение пределов измерений и уменьшение их погрешностей, расширение частотного диапазона, обеспечение возможности дистанционного контроля метрологических характеристик, расширение многофункциональности средств измерений.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи.

1. Провести анализ особенностей миллиметрового диапазона длин волн при решении измерительных задач и сформулировать с учетом этих особенностей требования к современным автоматизированным средствам измерений данного диапазона.

2. Провести математическое моделирование процессов калибровки и непосредственного измерения для четырехполюсников и многополюсников как объектов измерения, в которых учтены особенности измерений на миллиметровых волнах.

3. Разработать принципы и новые методы измерений, использование которых позволяет усовершенствовать средства измерений миллиметрового диапазона длин волн.

4. Разработать базовые структуры построения рабочих эталонов и средств измерений с учетом особенностей миллиметровых волн, с использованием результатов математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения и предложенных принципов, новых методов измерений с целью усовершенствования рабочих эталонов и средств измерений.

5. Изготовить несерийные средства измерений в отдельных частотных поддиапазонах миллиметрового диапазона длин волн и провести исследования по определению их метрологических характеристик с использованием результатов математического моделирования и разработки базовых структур построения рабочих эталонов и средств измерений.

6. Изготовить серийные средства измерений миллиметрового диапазона длин волн и провести исследования по определению их метрологических характеристик, внести средства измерений в Государственные реестры Республики Беларусь и Российской Федерации с использованием результатов, полученных при изготовлении несерийных средств измерений.

## Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена универсальная 16-параметрическая математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров четырехполосника как объекта измерения, разработанная на основе матричного анализа и отличающаяся от известных тем, что в ней в матрицу рассеяния погрешностей включены параметры, позволяющие учесть использование векторного анализатора цепей с кольцевым измерительным трактом и особенности миллиметрового диапазона длин волн для случаев позиционирования микросборок и наличия адаптеров (зондов-переходников) при подключении к входам микросборок. Предложена и обоснована замена матрицы рассеяния погрешностей на матрицу передачи в виде клеточных матриц, получены в матричном виде уравнения калибровки и восстановления действительных (исправленных) значений измеряемых параметров, в общем виде приведены пути решения этих уравнений.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров объектов измерения в виде многополосников ( $2n$ -полосников), разработанная на основе матричного анализа. Для нее получены в матричном виде уравнения калибровки и восстановления действительных (исправленных) значений измеряемых параметров, в общем виде показаны пути решения этих уравнений при использовании операторов перемещения и  $RS$ -операторов для отдельных матриц, кронекеровского произведения двух матриц, метода исключения Гаусса.

3. Предложен экспериментально подтвержденный принцип коммутации модулированных сигналов в сверхвысокочастотных измерительных трактах путем совместного применения амплитудной модуляции сигналов и вентиляного эффекта, который реализуется в амплитудном модуляторе-вентиле с расположенными под углом  $\pi/4$  относительно друг друга входными и выходными волноводами. При подаче на обмотку управления тока, соответствующего повороту плоскости поляризации на  $\pi/4$ , сверхвысокочастотный сигнал будет проходить через модулятор с минимальными потерями, а при значении тока управления, соответствующего повороту плоскости поляризации на  $\pi/2$ , сигнал будет проходить через модулятор с максимальными потерями, что позволяет при изменении значения тока управления в соответствующем интервале получить коммутацию модулированных сверхвысокочастотных сигналов

без применения электромеханических сверхвысокочастотных переключателей, развязка которых между отдельными каналами ниже (порядка 20 дБ), чем при реализации предложенного принципа (порядка 30 дБ).

4. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден новый метод с дискретным во времени получением квадратурных сигналов путем фазовой манипуляции опорного сверхвысокочастотного сигнала, позволяющей получить восемь комбинаций фазового сдвига в пределах от 0 до минус  $\pi/2$ , и измерений после балансного смешивания напряжений, причем на входы смесителя подаются опорный и измерительный сверхвысокочастотные сигналы. Предложенный метод за счет комбинационной фазовой манипуляции и разработанного алгоритма обработки измерительной информации позволяет обеспечить калибровку дискретного фазовращателя в широкой полосе частот миллиметрового диапазона длин волн без применения дорогостоящих мер фазового сдвига и реализует коррекцию составляющей погрешности воспроизведения фазового сдвига минус  $\pi/2$  – погрешности из-за частотного хода, которая составляет для формирователей квадратурных сигналов от  $\pm\pi/12$  до  $\pm\pi/6$ .

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Базовые структуры построения средств измерений и рабочих эталонов миллиметрового диапазона длин волн, отличающиеся учетом специальных требований к сверхвысокочастотным измерительным трактам (простота и жесткость конструкции, минимальное количество фланцевых соединений) из-за особенностей измерений на миллиметровых волнах (большие потери энергии в линиях передачи, значительное возрастание фазовых погрешностей, необходимость точного соблюдения геометрических размеров и форм поперечного сечения волноводов, существенное возрастание требований к стыкуемым поверхностям фланцев, большие значения погрешностей рассогласования); использованием результатов математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения (параметров матрицы погрешностей и уравнений калибровки, восстановления) при выборе структур построения и контроле точностных характеристик средств измерений, рабочих эталонов; введением унифицированных, т. е. применимых во всех частотных поддиапазонах составных частей; реализацией возможности дистанционного контроля метрологических характеристик, заключающегося в пересылке транспортабельных рабочих эталонов в удаленную лабораторию к месту эксплуатации средств измерений и проведении дистанционных измерений по стандартным линиям связи, что исключает необходимость демонтажа

и транспортировки средств измерений в калибровочную лабораторию, обеспечивает возможность проведения исследований в рабочих условиях применения средств измерений.

2. Структура построения генераторов качающейся частоты с формированием стабильных по уровню сигналов с малыми флуктуациями в отдельных поддиапазонах миллиметровых волн и в широком спектре диапазонов частот (метровом, дециметровом, сантиметровом, миллиметровом), отличающаяся введением опорного задающего генератора в виде синтезатора частот в диапазоне от 5 до 20 ГГц, умножителей частоты, унифицированного микропроцессорного блока управления, балансных смесителей в блоках расширения, что обеспечивает выбор необходимого поддиапазона частот и позволяет уменьшить на два порядка приведенную погрешность установки и отсчета частоты генерируемых сигналов до уровня не более  $\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$  и их кратковременную нестабильность – до уровня не более  $\pm 5,0 \cdot 10^{-7}$ .

3. Методика проведения калибровки, измерения и алгоритмы обработки измерительной информации для скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн, отличающаяся от известных применением в ней разработанных мер фазового сдвига и использованием результатов разработки универсальной 16-параметрической математической модели (параметров матрицы погрешностей и уравнений калибровки, измерений), что позволяет расширить пределы измерений модулей коэффициентов отражения от 0 до минус 32 дБ и передачи от 0 до минус 40 дБ и уменьшить погрешности измерения от не более  $\pm 0,3$  дБ до  $\pm 1,3$  дБ для нижних и верхних пределов измерений модулей коэффициентов отражения и от не более  $\pm 0,2$  дБ до  $\pm 1,0$  дБ – для нижних и верхних пределов измерений модулей коэффициентов передачи.

4. Базовая структура построения двунаправленных гомодинных векторных анализаторов цепей, отличающаяся тем, что сверхвысокочастотный измерительный тракт конструктивно расположен в двух отдельных блоках и содержит два амплитудных модулятора-вентилей, разработанных на базе предложенного принципа коммутации модулированных сигналов путем совместного применения амплитудной модуляции сигналов и вентиляющего эффекта, что позволяет наряду с возможностью измерения параметров объектов измерения любых геометрических размеров обеспечить автоматизацию измерений всего комплекса  $S$ -параметров без использования электромеханических сверхвысокочастотных переключателей.

5. Методика проведения калибровки и измерения, основанная на использовании параметров матрицы погрешностей и уравнений калибровки, измерений универсальной 16-параметрической математической



модели и введения в состав эталонной установки разработанных векторных анализаторов цепей, измерений с их помощью комплексных коэффициентов отражения в измерительном сверхвысокочастотном тракте со стороны генератора качающейся частоты и входа приемного преобразователя измерителя мощности, внесения корректирующих поправок, содержащих результаты измерений комплексных коэффициентов отражения, что позволяет в миллиметровом диапазоне длин волн при воспроизведении единицы мощности и передаче ее размера уменьшить составляющую погрешности измерения – погрешность рассогласования, которая при отсутствии корректирующих действий достигает уровня  $\pm 12\%$ , до уровня от  $\pm 0,15$  до  $\pm 0,6\%$ .

6. Базовая структура построения средств калибровки измерителей флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн, отличающаяся от известных структур введением двух высокоточных поляризационных аттенюаторов, комбинированное использование которых с разработанным алгоритмом измерения позволяет повысить точность воспроизведения индексов амплитудной, частотной и фазовой модуляций сверхвысокочастотных сигналов в 2–3 раза.

7. Базовая структура построения измерителей флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн, отличающаяся от известных структур тем, что в ней, во-первых, за счет ввода источников токов смещения и варьирования их уровней реализуется смещение характеристики балансного смесителя и расширение его функциональных возможностей (он может работать как однодиодный амплитудный детектор в режиме измерения амплитудных флуктуаций и как фазовый детектор в режиме измерения частотных или фазовых флуктуаций), и, во-вторых, путем введения двух волноводных переходов, позволяющих изменять конфигурацию измерительного тракта, появляется возможность на базе единого сверхвысокочастотного измерительного тракта измерять весь комплекс флуктуаций (амплитудных, частотных, фазовых) при использовании разработанного средства калибровки в миллиметровом диапазоне длин волн, где серийные измерители флуктуаций и средства их калибровки отсутствуют, при полосе анализа 100 кГц амплитудных флуктуаций до минус 160 дБ/Гц, частотных флуктуаций до минус 130 дБ/Гц, вносимых фазовых флуктуаций до минус 150 дБ/Гц при погрешности измерения не более  $\pm 3,0$  дБ.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Личный вклад соискателя заключается в выборе направлений и постановке задач научных исследований, анализе и интерпретации результатов исследований, выдвижении и проверке идей и гипотез, а также в непосредственном выполнении основных исследований. Основными соавторами публикаций автора являются В. А. Богуш, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин, А. Я. Бельский, которые принимали участие в определении целей и постановке задач исследований, в выборе методов исследований, планировании работ и обсуждении их результатов. Совместно с А. Б. Дзисяком проводились исследования, связанные с особенностями измерения флуктуаций при обеспечении электромагнитной совместимости сверхвысокочастотных устройств. Совместно с Т. К. Зезюлина (девичья фамилия – Т. К. Толочко) проводились исследования при использовании частного случая дистанционного контроля – дистанционной калибровки. Все остальные соавторы участвовали в разработке методов оценки погрешностей и неопределенностей результатов измерений, разработке и изготовлении автоматизированных средств измерений, экспериментальных исследованиях по определению метрологических характеристик. Результаты, принадлежащие другим соавторам, в диссертационную работу не вошли.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Современные средства связи» (Минск, 1999 – 2004 гг.); «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Украина, Крым, Севастополь, 2002 – 2006 гг.); «International Traveling Summer School on microwaves and lightwaves, ITSS-2002» (Minsk, 2002 г.); «II МНТК по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения», (Минск, 2005 г.); «Информационные системы и технологии, ИТС-2007», (Россия, Нижний Новгород, 2007 г.); «Технические средства защиты информации», (Минск–Нарочь, 2005 г.); «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», (Россия, Московская обл., г. Повединки, 2002 г.); Международной научной конференции «Метрология и измерительная техника», (Украина, г. Харьков, 2005 г.); конференциях БГУИР, (Минск, 2003 г., 2004 г., 2008–2010 гг., 2017–2019 гг.).

## **Опубликование результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы отражены в 21 статье, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, – 6,4 авторских листов; в 1 статье в других рецензируемых научных изданиях – 0,4 авторского листа; 6 монографиях – 151,6 авторских листов; 26 статьях, опубликованных в изданиях, не включенных в перечень ВАК Беларуси, – 3,0 авторских листов; 7 патентах на изобретение. Общее количество опубликованных материалов – 161,4 авторских листов.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, списка публикаций автора и приложений. Полный объем работы составляет 279 страниц, из них 32 страницы занимают 63 иллюстрации, на 7 страницах приведено 14 таблиц, 29 страниц занимают 6 приложений. Библиографический список состоит из 279 наименований на 23 страницах, из которых 61 – публикации соискателя.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** на основании анализа литературных источников приведены свойства миллиметрового диапазона длин волн, обуславливающие особый интерес к данному диапазону; основные направления разработок на миллиметровых волнах, связанные с созданием систем и аппаратуры научного, промышленного и военного назначений; особенности измерений в миллиметровом диапазоне длин волн.

Анализ показал, что специфическими факторами при измерениях в данном диапазоне являются: большие потери энергии в линиях передачи; значительное возрастание фазовых погрешностей измерений из-за неточности и неповторяемости установленных частот при калибровках и измерениях; необходимость точного соблюдения геометрических размеров и формы поперечного сечения волноводов измерительных трактов, ужесточение этих требований с увеличением рабочих частот; существенное возрастание требований к присоединительным размерам, точности исполнения каналов и качеству обработки стыкуемых поверхностей фланцев, причем неидеальность фланцевых соединений приводит к существенному

возрастанию погрешностей рассогласования; часто на миллиметровых волнах объекты измерения имеют сложную структуру, что приводит к необходимости учета большого числа влияющих величин, из-за которых возникают дополнительные погрешности измерений; недостаточная обеспеченность эталонными средствами, программами и методиками метрологической аттестации, а также средствами и методиками проведения поверки, калибровки в процессе их эксплуатации.

Основными средствами измерений, используемыми в миллиметровом диапазоне длин волн, являются источники сверхвысокочастотных сигналов (генераторы качающейся частоты), измерители характеристик сверхвысокочастотных цепей (скалярные и векторные анализаторы цепей), измерители параметров сверхвысокочастотных сигналов (измерители мощности и флуктуаций).

Основой для усовершенствования измерений на миллиметровых волнах является реализация следующих требований к средствам измерений:

- требований, учитывающих особенности миллиметрового диапазона длин волн;

- традиционных требований: расширение пределов измерений, повышение точности измерений, обеспечение многофункциональности средств измерений, использование средств вычислительной техники, минимизация стоимости средств измерений;

- требований, связанных с применением основ стандартизации: разработка структур построения, имеющих одинаковые по функциональному назначению составные части для разных частотных поддиапазонов – базовых структур построения, и введение в структуры составных частей, которые являются одинаковыми для разных частотных диапазонов – унифицированных составных частей;

- специфических требований, связанных с конкретными видами измерений.

Анализ вышеприведенных требований позволил сформулировать следующие направления исследований для средств измерений миллиметрового диапазона длин волн:

- расширение номенклатуры учитываемых параметров в миллиметровом диапазоне длин волн при математическом моделировании процессов калибровки и непосредственном измерении вместе с разработкой новых подходов к алгоритмам коррекции результатов измерений;

- разработка системы дистанционного контроля метрологических характеристик средств измерений;

- выбор базовых структур построения средств измерений с учетом особенностей миллиметровых волн и реализуемых точностных характеристик по видам измерений;

- разработка мер, позволяющих усовершенствовать средства измерений: расширение диапазонов по частоте, расширение пределов измерений, автоматизация процесса измерений, упрощение конструкции составных частей средств измерений, расширение функциональных возможностей этих средств, улучшение метрологических характеристик.

Во **второй главе** приведены результаты математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения параметров четырехполюсников и многополюсников (общий случай) на базе матричного анализа. При этом для моделирования погрешностей измерений четырехполюсника используется восьмиполюсник погрешностей, а многополюсника ( $2n$ -полюсника) –  $4n$ -полюсник погрешностей.

Использование 16 параметров восьмиполюсника погрешностей позволяет учесть связи (утечки, паразитные передачи) из-за двунаправленности передачи СВЧ сигналов и из-за подключения специфических переходных устройств (зондов, пробников и т. п.), объединяющих входы объектов измерений (выполненных, например, на микрополосках) с измерительными входами. В свою очередь параметры  $4n$ -полюсника погрешностей используются при осуществлении измерений параметров сложного объекта измерений с помощью множества средств измерений.

Выявлено, что использование вместо 16-параметрической матрицы рассеяния  $[E]$ , описывающей восьмиполюсник погрешностей, клеточной матрицы передачи  $[T]$  позволило получить в матричном виде два уравнения, связывающие между собой матрицы рассеяния калибровочных мер  $[S_x^k]$  или объекта измерения  $[S_x]$  и матрицы рассеяния результатов калибровки  $[S_n^k]$  и результатов измерений при подключении объекта измерения  $[S_n]$ :

$$[S_n^k] = ([T_{bb}][S_x^k] + [T_{ba}])([T_{ab}][S_x^k] + [T_{aa}])^{-1}; \quad (1)$$

$$[S_x] = ([T_{bb}] - [S_n][T_{ab}])^{-1}([S_n][T_{aa}] - [T_{ab}]), \quad (2)$$

где  $[T_{aa}]$ ,  $[T_{bb}]$ ,  $[T_{ab}]$ ,  $[T_{ba}]$  – клеточные матрицы  $[T]$ .

Уравнение (1) является в матричном виде уравнением калибровки, а уравнение (2) – уравнением восстановления действительных (исправленных) значений параметров  $[S_x] - S_{11x}, S_{12x}, S_{21x}, S_{22x}$ .

Получена система уравнений (3), основанная на уравнении калибровки (1), которая позволяет при использовании известных значений  $[S_x^k]$  и измеренных результатов  $[S_n^k]$  найти миноры, необходимые для определения параметров передачи матрицы  $[T]$ :

$$S_{11n}, S_{12n}, S_{21n}, S_{22n} = (-1)^r \cdot [S_{11x}^k \cdot M_{kl,14}(T) - S_{12x}^k \cdot M_{kl,24}(T) + S_{21x}^k \cdot M_{kl,13}(T) - S_{22x}^k \cdot M_{kl,23}(T) - M_{kl,34}(T) - \Delta S_M^k \cdot M_{kl,12}(T)] / \Pi_1, \quad (3)$$

где для  $S_{11n}$   $r=0, \kappa=1, l=4$ ; для  $S_{12n}$   $r=1, \kappa=2, l=4$ ; для  $S_{21n}$   $r=0, \kappa=1, l=4$ ; для  $S_{22n}$   $r=1, \kappa=2, l=3$ ;  $M_{kl,vq}$  – миноры второго порядка матрицы  $[T]$ , полученные вычеркиванием  $\kappa$ -й,  $l$ -й строк и  $v$ -го и  $q$ -го столбцов;

$$\Delta S_x^k = S_{11x}^k \cdot S_{22x}^k - S_{12x}^k \cdot S_{21x}^k;$$

$$\Pi_1 = -S_{11x}^k \cdot M_{34,14}(T) + S_{12x}^k \cdot M_{34,24}(T) - S_{21x}^k \cdot M_{34,13}(T) + S_{22x}^k \cdot M_{34,23}(T) + M_{34,34}(T) + \Delta S_x^k \cdot M_{34,12}(T).$$

В свою очередь получены выражения (4), основанные на уравнении восстановления (2), которые позволяют при использовании известных миноров матрицы  $[T]$  и измеренных результатов  $[S_n]$  найти действительные (исправленные) значения параметров объекта измерения  $[S_x]$ :

$$S_{11x}, S_{12x}, S_{21x}, S_{22x} = (-1)^h \cdot [-S_{11n} \cdot M_{23,vq}(T) - S_{12n} \cdot M_{13,vq}(T) + S_{21n} \cdot M_{24,vq}(T) + S_{22n} \cdot M_{14,vq}(T) + M_{12,vq}(T) + \Delta S_n \cdot M_{34,vq}(T)] / \Pi_2, \quad (4)$$

где для  $S_{11x}$   $h=1, v=2, q=3$ ; для  $S_{12x}$   $h=1, v=1, q=3$ ; для  $S_{21x}$   $h=0, v=2, q=4$ ; для  $S_{22x}$   $h=0, v=1, q=4$ ;  $\Delta S_n = S_{11n} \cdot S_{22n} - S_{12n} \cdot S_{21n}$ ;

$$\Pi_2 = -S_{11n} \cdot M_{23,12}(T) - S_{12n} \cdot M_{13,12}(T) + S_{21n} \cdot M_{24,12}(T) + S_{22n} \cdot M_{14,12}(T) + M_{12,12}(T) + \Delta S_n \cdot M_{34,12}(T).$$

Разработана обобщенная математическая модель измерения параметров матрицы рассеяния  $[S_x]$  для произвольного многополюсника ( $2n$ -полюсника), в которой матрица погрешностей описывается  $2n^2$  параметрами. При использовании матричных методов анализа получены уравнения калибровки и восстановления действительных значений параметров матрицы  $[S_x]$  которые аналогичны соответствующим уравнениям для случая четырехполюсника. При этом, как и для случая четырехполюсника, вместо матрицы рассеяния  $[E]$  используется матрица передачи  $[T]$  в виде четырех клеточных матриц  $[T_{aa}]$ ,  $[T_{ab}]$ ,  $[T_{ba}]$ ,  $[T_{bb}]$ . Показано, что из-за появления клеточной матрицы  $[T_{ab}]$  в матричном произведении «сэндвичного» типа  $[S_i] \cdot [T_{ab}] \cdot [S_x]$  решение уравнений возможно при использовании кронекеровского произведения двух матриц  $[A] \otimes [B]$ , оператора перемещения  $S[A]$  матрицы  $[A]$  и  $RS$ -оператора матрицы  $[A]$ , а также метода исключения Гаусса. Кроме того, при решении уравнения восстановления действительных значений матрицы  $[S_x]$  целесообразно использовать матрицу  $[R]$ , инверсную к матрице передачи  $[T]$ .

Предложены алгоритмы коррекции результатов измерений с использованием результатов математического моделирования: параметров матрицы погрешностей и уравнений калибровки, восстановления. Варианты используемых алгоритмов зависят от видов измерений: измерения комплексных параметров, когда объект измерения непосредственно подключается к векторному анализатору; измерения комплексных параметров, когда объект измерения подключается через дополнительный, внешний по отношению к анализатору и объекту измерения сверхвысокочастотный измерительный тракт; измерения комплексных параметров с использованием устройства автокалибровки, входящего в состав анализатора; измерения параметров, характеризующих генерацию сигналов и измерители мощности; измерение параметров, характеризующих измерители амплитудных параметров и измерители флуктуаций сигналов. Разработана программная реализация алгоритмов, связанных с решением уравнений калибровки и воспроизведения (программа коррекции результатов измерений «Модель»), которая позволяет осуществлять точностную оценку результатов измерений при выборе базовых структур построения средств измерений и эталонных средств измерений (рабочих эталонов); определять значения метрологических характеристик разработанных средств измерений; проводить коррекцию результатов измерений с учетом параметров математической модели.

Усовершенствование метрологического обеспечения средств измерений миллиметрового диапазона длин волн возможно при использовании дистанционного контроля метрологических характеристик этих средств.

Разработана система такого контроля, в качестве основных компонентов которой выступают эксплуатируемые средства измерений, эталонные средства измерений и калибровочные меры, средства вычислительной техники (персональные компьютеры), средства связи и программное обеспечение, позволяющее реализовать совместную работу и дистанционное управление средств измерений. Разработан алгоритм проведения дистанционного контроля метрологических характеристик, который включает в себя пересылку транспортабельных эталонных средств измерений и/или калибровочных мер, построение схемы проведения метрологических исследований, установку связи между персональными компьютерами метрологической и удаленной лаборатории, проведение измерений с целью дистанционного контроля метрологических характеристик, обработку результатов измерений.

Сформулированы основные условия (технические, метрологические и программные) реализации системы дистанционного контроля: все средства измерений должны быть автоматизированными и иметь возможность сопряжения с персональным компьютером удаленной лаборатории; эталонные средства измерений и калибровочные меры, предназначенные для транспортировки, должны обладать небольшими массогабаритными размерами; обеспечивать необходимый запас по точности эталонных средств измерений и калибровочных мер по отношению к эксплуатируемым средствам измерений; наличие программного обеспечения у средств измерений, входящих в систему дистанционного контроля, и специализированного программного обеспечения для реализации процесса дистанционного контроля.

Разработаны принципы построения программного обеспечения для реализации дистанционного контроля метрологических характеристик, которое включает в себя блоки управления при метрологических исследованиях, функционирования канала общего пользования, математической обработки результатов измерений, сервисных функций. Основой программного обеспечения является технология «клиент – сервер», которая включает в себя драйвер, клиентскую и серверную части. Приведены алгоритмы обеспечения связи между персональными компьютерами системы со стороны серверной и клиентской частей.

**Третья глава** посвящена усовершенствованию источников сигналов миллиметрового диапазона длин волн – генераторов качающейся частоты.

В предложенной модернизированной структуре построения генераторов на базе ламп обратной волны введено в качестве унифицированной составной части микропроцессорное устройство, которое наряду с другими функциями обеспечивает выполнение корректирующих поправок для повышения



точности установки, отсчета частоты и расширения линейного участка ее перестройки. Учитывая, что решающее влияние на точность установки частоты, и ее стабильность в таких генераторах оказывает перестраиваемый источник питания замедляющей системы, были разработаны и проанализированы несколько вариантов его построения (они имеют приблизительно одинаковые характеристики). При этом установлено, что использование управляющих напряжений непосредственно в плате источника питания и дополнительных элементов (эллиптических фильтров) позволяет уменьшить уровень пульсаций напряжения питания. По результатам метрологических исследований модернизация позволила при пределах относительной погрешности установки, отсчета частоты не более  $\pm 0,002$  уменьшить уровень нестабильности частоты в 2 раза (с  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  до  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ ).

Разработана базовая структура построения твердотельных генераторов на основе набора умножителей частоты для работы в отдельных поддиапазонах миллиметровых волн, в которой за счет использования унифицированной составной части – микропроцессорного блока управления – реализуется выбор необходимого поддиапазона при соответствующей комбинации умножителей частоты, расширение линейных участков перестройки частоты до уровней ширины поддиапазонов и высокие точностные параметры (пределы относительной погрешности частоты не более  $\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$ , нестабильность частоты не более  $\pm 5,0 \cdot 10^{-8}$ ).

Показана возможность реализации широкодиапазонного по частоте генератора, перекрывающего не только миллиметровый диапазон длин волн, но и более высокие по частоте диапазоны.

В структуру построения такого генератора входят перестраиваемый по частоте источник сигнала 0,01–5 ГГц, содержащий синтезатор частот СЧ1 на базе кварцевого резонатора с шагом, задаваемым сигналом управления формирователя ФСУ; опорный генератор ОГ; управляемые усилитель и ключ К1, опорный первый блок расширения 5–20 ГГц, содержащий делитель частот ДЧ с переключаемым коэффициентом деления; синтезатор частот СЧ2; управляемые усилитель У2, ключ К2; фазовращатель ФВ; последующие, соединенные последовательно блоки расширения, имеющие одинаковый состав – фиксированный умножитель частоты УЧ на два, управляемые усилитель У3 и ключ К3, а также балансный смеситель БС, выходы которого подключены к фильтру высокой частоты ФВЧ, амплитудному детектору АД, первому усилителю постоянного тока УПТ1 и к фильтру низкой частоты ФНЧ, второму усилителю постоянного тока УПТ2. Выбор диапазона частот осуществляется формирователем ФСУ, который формирует сигналы управления ключами генератора и мультиплексором Мп, осуществляющим выбор сигнала управления фазой для соответствующего блока расширения.

В блоках расширения обеспечивается формирование стабильных по уровню сигналов с малыми флуктуациями фазы за счет использования балансных смесителей. Конструктивное исполнение отдельных элементов следующее. В качестве фазовращателя ФВ можно использовать фазовращатель на варакторных диодах в микрополосковом исполнении. В качестве балансных смесителей БС блоков расширения используются смесители на базе диодного моста в волноводной или в микрополосковой реализации. Разделение мощности реализуется в резистивном, коаксиальном, волноводном, микрополосковом исполнениях.

**В четвертой главе**, которая посвящена усовершенствованию скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн, предложена базовая структура построения таких анализаторов. В данной структуре минимизация количества фланцевых соединений, конструктивная простота и жесткость обусловлены отказом от внешнего по отношению к генератору качающейся частоты ГКЧ сверхвысокочастотного измерительного тракта.

Анализатор состоит из главного и выносного измерительных блоков. Главный измерительный блок включает в себя вентили В1 – В3, служащие для развязки сверхвысокочастотного измерительного тракта; направленные ответвители НО1 и НО2, ориентированные на падающую и отраженные волны; детекторы Д1 и Д2 с малошумящими усилителями МШУ1 и МШУ2 для падающего и отраженного СВЧ сигналов; блок обработки информации БОИ; персональный компьютер ПК. Возможность измерения параметров объектов измерения с любыми геометрическими размерами обеспечивается с помощью выносного измерительного блока, который включает в себя ферритовый вентиль В4; направленный ответвитель НО3, ориентированный на прошедшую через объект измерения волну; детектор Д3 с малошумящим усилителем МШУ3 для прошедшего сверхвысокочастотного сигнала.

Унифицированной составной частью анализатора, используемой во всех поддиапазонах миллиметровых волн, является блок обработки информации, который помимо остальных функций служит для реализации программно-алгоритмического способа коррекции отклонения квадратичной характеристики детекторов.

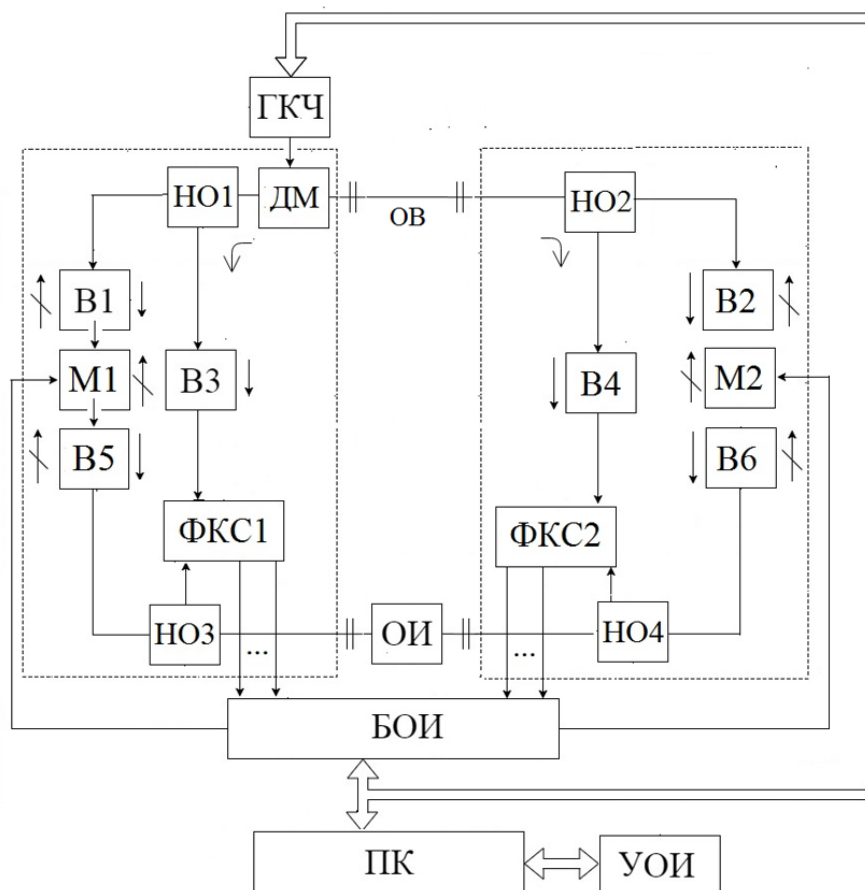
С целью улучшения точностных параметров анализаторов при измерении малых и больших значений коэффициентов отражений, а также при измерениях параметров передачи сверхвысокочастотных модулей (микросборок), когда к входным фланцам объектов измерения приходится подключать дополнительные переходные устройства (зонды, пробники и т. п.), связывающие входы объектов измерения с измерительными входами анализаторов, и могут возникать большие погрешности из-за паразитных утечек, предложено использовать при калибровке анализаторов не только

стандартный набор эталонных нагрузок (короткозамыкатель; согласованная нагрузка; нагрузка с фиксированными значениями  $K_{ctu}$ , равными 1,4 и 2,0) и поляризационный аттенуатор, но и наборы мер фазового сдвига. Метрологическая аттестация таких мер в виде двух отрезков волновода с фиксированной разностью длин осуществляется при использовании косвенного метода измерения: проводятся прямые измерения ширины канала меры  $a_k$ , длины  $l$ , высоты неровностей поверхности фланцев мер по десяти точкам  $R_z$ . Расширенная неопределенность ( $U$ ) воспроизведения фазовых сдвигов  $\pi/2$  и  $\pi$  на средней частоте диапазона определяется стандартными неопределенностями, обусловленными неточностью измерения разности  $l$  между длинами измерительного тракта на первом и втором этапах воспроизведения фазовых сдвигов –  $u_l$ , неточностью установки рабочей частоты генератора  $f - u_f$ , неточностью воспроизведения ширины канала  $a_k - u_{a_k}$ , шероховатостью поверхности фланцев  $R_z - u_{R_z}$ . Результаты метрологических исследований показали, что при воспроизведении геометрических размеров мер с допусками  $\pm 0,005$  мм или  $\pm 0,01$  мм, при высоте неровностей поверхности фланцев по десяти точкам измерения не более 0,002 мм и допустимых относительных погрешностях установки частоты не более  $\pm 0,2$  % или  $\pm 0,5$  % неопределенности воспроизведения фазовых сдвигов не превышают  $\pm(2-5)$  град. Отмечен большой вклад, который вносит неопределенность, обусловленная неточностью установки рабочей частоты генератора. В случае использования твердотельных генераторов при существенном увеличении точности установки частоты расширенная неопределенность  $U$  может быть уменьшена до  $\pm 1,0$  град.

Применение мер фазового сдвига при проведении калибровок скалярных анализаторов цепей и измерений с их помощью позволяет изменять фазовые сдвиги между векторными величинами, которые характеризуют измеряемые параметры и параметры, влияющие на погрешности, благодаря чему удается перейти от векторного представления измерительной информации к скалярному. Была разработана методика калибровки и измерения с использованием традиционных рабочих эталонов и мер фазового сдвига, что позволяет расширить пределы измерений и повысить точность измерений. Методика основана на учете при калибровке и непосредственном измерении параметров  $E_D$  (характеризует погрешность из-за ограниченной направленности),  $E_S$  (характеризует погрешность рассогласования со стороны источника сверхвысокочастотного сигнала),  $E_M$  (характеризует погрешность развязки).

В пятой главе, посвященной усовершенствованию векторных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн, приведены базовые структуры построения двунаправленных гомодинных анализаторов

с кольцевым сверхвысокочастотным измерительным трактом (рисунок 1) и однонаправленных гетеродинных анализаторов. На рисунке 1 обозначено: ГКЧ – генератор качающей частоты; ДМ – делитель мощности; НО1–НО4 – четыре направленных ответвителя; В1–В6 – шесть вентилях; УОИ – устройство отображения информации; ОИ – объект измерения.



**Рисунок 1. – Базовая структура построения двунаправленных гомодинных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн**

В структуре построения гомодинных анализаторов учтены особенности миллиметровых волн и реализован предложенный принцип коммутации модулированных сверхвысокочастотных сигналов путем совместного применения амплитудной модуляции и вентиляльного эффекта. Двублочность конструкции анализаторов позволяет избавиться от недостатков, присущих всем моноблочным конструкциям гомодинных и гетеродинных анализаторов, невозможность автоматизированного измерения всех  $S$ -параметров объектов измерения с любыми геометрическими размерами и наличие присоединительных волноводов, ограничивающих точность измерений.

Реализация предложенного принципа заключается в использовании двух разработанных сверхвысокочастотных модуляторов-вентилей М1 и М2, в которых под углом  $\pi/4$  относительно друг друга расположены входные и выходные волноводы, что позволяет при изменении значения тока

управления в соответствующем интервале получить коммутацию модулированных сверхвысокочастотных сигналов без применения электромеханических сверхвысокочастотных переключателей. Развязка между каналами кольцевого тракта при использовании переключателей ниже (не менее 20 дБ), чем при реализации предложенного принципа (не менее 30 дБ).

Центральными элементами в структуре анализаторов являются формирователи квадратурных сигналов (ФКС1 и ФКС2). Были предложены модернизированные и новый метод формирования квадратурных сигналов в гомодинных анализаторах.

Разработан модернизированный вариант аппаратного метода формирования квадратурных сигналов, при этом используется кольцевое гибридное соединение (квадратурный мост), в котором было предложено изменять длину и ширину  $H$ -плоскостных изгибов таким образом, чтобы на соответствующем выходе сигналы складывались не синфазно, а квадратурно. Показано, что в этом случае расчет квадратурного моста сводится к определению конструктивно реализуемых коэффициентов  $\alpha$  и  $\eta$ , характеризующих изменения длины и ширины, при которых минимизируется величина отличия фазового сдвига  $\delta\varphi$  от  $\pi/2$  в заданном диапазоне частот:

$$\delta\varphi = \pm 2\pi \frac{1}{\lambda_k} \left\{ (1 + \eta) - \left[ 1 - \alpha(2 + 3\alpha) \left( \frac{\lambda_k}{2a_k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} - \pi / 2, \quad (5)$$

где  $\lambda_k$  – длина волны в волноводе сечением  $(a_k \times b_k)$ , соответствующая одной из двух крайних частот рабочего диапазона.

Модернизированный вариант метода позволяет уменьшить погрешность из-за частотного хода до уровня не более  $\pm\pi/12$ .

В рамках реализации аппаратурно-программного метода формирования квадратурных сигналов был предложен модернизированный алгоритм обработки информации при реализации преобразования Гильберта. Модернизация основана на применении аналитического решения преобразования Гильберта, что позволяет уменьшить погрешность нахождения мнимой части аналитического сигнала в

2–3 раза. Анализ этой погрешности показал, что наибольшие погрешности будут на краях частотного диапазона. Поэтому для достижения допустимого уровня погрешности необходимо сужать частотный диапазон приблизительно на 20 % путем отбрасывания точек в начале и конце частотного диапазона.

Разработан новый метод формирования квадратурных сигналов, основанный на применении дискретного фазовращателя, в котором

используются последовательно соединенные ячейки фазового сдвига. Каждая ячейка представляет собой отрезок волноводно-щелевой линии с последовательно включенными  $p-i-n$ -диодами, расположенными на фиксированных расстояниях друг от друга. Конструктивные элементы выбраны таким образом, чтобы на средней частоте рабочего диапазона сдвиг фаз составлял приблизительно минус  $\pi/6$  при переключении  $p-i-n$ -диодов из закрытого состояния в открытое и обратно. Фазовая манипуляция позволяет получить восемь комбинаций фазовых сдвигов в пределах от 0 до минус  $\pi/2$ , при этом измеренные значения напряжения на выходе балансного смесителя описываются следующим выражением:

$$U_i = Re(t_0 \cdot t_{1i} \cdot t_{2i} \cdot t_{3i} \cdot S_x) = \frac{1}{2} \left\{ [Re(t_0) + Im(t_0)] \cdot [Re(t_{1i}) + Im(t_{1i})] \cdot [Re(t_{2i}) + Im(t_{2i})] \cdot [Re(t_{3i}) + Im(t_{3i})] \cdot [Re(S_x) + Im(S_x)] + [Re(t_0) - Im(t_0)] \cdot [Re(t_{1i}) - Im(t_{1i})] \cdot [Re(t_{2i}) - Im(t_{2i})] \cdot [Re(t_{3i}) + Im(t_{3i})] \cdot [Re(S_x) - Im(S_x)] \right\}, \quad (6)$$

где  $t_0$  – комплексная величина, характеризующая фазовращатель при исходном закрытом состоянии  $p-i-n$ -диодов;

$t_{1i}, t_{2i}, t_{3i}, i = 1, \dots, 8$  – комплексные величины, характеризующие фазовращатель в зависимости от состояний  $p-i-n$ -диодов ячеек.

Разработан алгоритм, который позволяет на основании измеренных напряжений, описываемых выражением (6), определить измеренные значения  $S$ -параметров, причем новый метод позволяет устранить погрешности из-за частотного хода фазового сдвига.

При использовании результатов разработки универсальной 16-параметрической математической модели (параметров матрицы погрешностей и уравнений калибровки, восстановления) разработан алгоритм обработки измерительной информации для случая применения пяти калибровочных мер. Алгоритм носит универсальный характер и может применяться для любого количества учитываемых параметров матрицы погрешностей.

**Шестая глава** посвящена усовершенствованию измерителей мощности миллиметрового диапазона длин волн. Показано, что в рабочих измерителях мощности в качестве приемных преобразователей целесообразно использовать диодные и термоэлектрические преобразователи. В диодном преобразователе реализован плавный переход с прямоугольного волновода на волноводно-щелевую линию, к концу которой подключен рабочий сверхвысокочастотный диод. При этом в целях термокомпенсации в преобразователе установлен опорный сверхвысокочастотный диод,

на который мощность не подается, а для калибровочных данных используется модуль энергонезависимой памяти. В термоэлектрических преобразователях преобразование сверхвысокочастотной мощности происходит непосредственно в нитевидных термопарах и в них реализован плавный переход с прямоугольного волновода на П-образный, к концу которого посредством заглушки прижимается вставка с двумя термопарами.

Унифицированной составной частью измерителей мощности является разработанный измерительный блок, который можно использовать как в отдельных поддиапазонах миллиметровых волн, так и в сантиметровом диапазоне длин волн. Измерительный блок включает в себя малошумящий усилитель постоянного тока, процессор, 24-разрядный блок, аналого-цифровой преобразователь, калибратор напряжения переменного тока. Структура блока предусматривает цифровое управление работой измерителя и цифровую обработку информации; применение автоматической калибровки нулевого показания; автоматическое выполнение математических операций, связанных с обработкой результатов измерений; возможность осуществления контроля и протоколирования результатов измерения; возможность управления по внешним интерфейсам.

Учитывая необеспеченность измерителей мощности миллиметрового диапазона длин волн возможностью проведения поверок и калибровок, разработана структура построения эталонных установок для воспроизведения единицы мощности в этом диапазоне и передачи ее размера нижестоящим по точности средствам измерений.

Особенностью эталонных установок (измерительных комплексов для проведения калибровки) является использование калориметрических приемных преобразователей ПП с сухой нагрузкой и автокомпенсационным транзисторным преобразователем, которые вместе с вентилем В и направленным ответвителем НО образуют калибраторы мощности для различных поддиапазонов миллиметровых волн. Частотная характеристика калибратора, зависящая от параметров направленного ответвителя НО, снимается предварительно при использовании векторных анализаторов цепей и заносится во внутреннюю энергонезависимую память. Благодаря подключению к персональному компьютеру ПК с помощью интерфейсов удастся полностью автоматизировать процесс проведения калибровки. Программное обеспечение установок позволяет указывать частотные точки в пределах рабочего диапазона частот калибруемого измерителя мощности, в которых необходимо определить калибровочные коэффициенты; устанавливать на генераторах качающейся частоты ГКЧ необходимые частоты и снимать показания мощности; вычислять коэффициенты эффективности калибруемого измерителя мощности.

Одной из доминирующих составляющих погрешности при измерении мощности в сверхвысокочастотном диапазоне является погрешность из-за отличия волновых сопротивлений измерительного тракта и приемного преобразователя – погрешность рассогласования может составлять от  $\pm 3$  до  $\pm 12$  %. Для уменьшения этой составляющей погрешности можно использовать разработанные и изготовленные скалярные или векторные анализаторы цепей миллиметрового диапазона длин волн. При этом скорректированные значения мощности находятся по формуле

$$P = P_n \cdot \mu, \quad (7)$$

где  $P_n$  – результат измерения мощности;

$\mu$  – поправочный множитель.

Для случая использования скалярных анализаторов цепей поправочный множитель  $\mu_1$  имеет вид

$$\mu_1 = \frac{1}{(1 - |\Gamma_{\text{ПП}}|^2)}, \quad (8)$$

где  $|\Gamma_{\text{ПП}}|$  – измеренный модуль коэффициента отражения приемного преобразователя. Введение  $\mu_1$  позволяет уменьшить систематическую погрешность до значений от  $\pm 2,0$  до  $\pm 8,0$  %.

Для случая использования векторных анализаторов цепей поправочный множитель  $\mu_2$  имеет вид

$$\mu_2 = \frac{(1 - \Gamma_{\text{ППС}}\Gamma_{\text{ИТС}} + \Gamma_{\text{ППS}}\Gamma_{\text{ИТС}})^2 + (\Gamma_{\text{ППС}}\Gamma_{\text{ИТС}} + \Gamma_{\text{ППS}}\Gamma_{\text{ИТС}})^2}{1 - \Gamma_{\text{ППС}}^2 - \Gamma_{\text{ППS}}^2}, \quad (9)$$

где  $\Gamma_{\text{ППС}}$ ,  $\Gamma_{\text{ППS}}$ ,  $\Gamma_{\text{ИТС}}$ ,  $\Gamma_{\text{ИТС}}$  – значения действительных и мнимых частей коэффициентов отражений приемного преобразователя и измерительного тракта. Введение  $\mu_2$  позволяет уменьшить систематическую погрешность до значений от  $\pm 0,15$  до  $\pm 0,6$  %.

**В седьмой главе** рассмотрены результаты исследований, позволяющие усовершенствовать средства измерений флуктуаций сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн.

При этом, учитывая особенности измерений флуктуаций в миллиметровом диапазоне длин волн (ограниченная мощность сигналов, значительные потери в сверхвысокочастотном тракте), нецелесообразно



применять корреляционный и гетеродинный методы измерения. При измерениях амплитудных флуктуаций используется метод непосредственного детектирования, при измерениях частотных флуктуаций – метод преобразования частотных флуктуаций в фазовые с подавлением несущей, построенный на широкополосном циркуляторе Ц и перестраиваемом высокочастотном резонаторе отражательного типа ОР, при измерениях фазовых флуктуаций – метод фазового детектирования.

Разработана базовая структура построения измерителей флуктуаций на базе единого сверхвысокочастотного измерительного тракта, в котором благодаря изменению конфигурации с помощью первого и второго волноводных переходов ВП1, ВП2, которые конструктивно вынесены за пределы корпуса измерителя, а также варьирования уровней смещения на входе «+ смещение» и выходе балансного смесителя БС, реализуется три режима измерения параметров флуктуаций: амплитудных, частотных и фазовых.

Процессу измерения параметров флуктуаций сигналов предшествует калибровка измерителей с помощью формирователя сверхвысокочастотных сигналов (калибратора) с известными индексами амплитудной  $m_{\text{АМК}}(F)$ , частотной  $m_{\text{ЧМК}}(F)$  и фазовой  $m_{\text{ФМК}}(F)$  модуляций на частоте анализа  $F$ . Относительные спектральные плотности мощности амплитудных  $S_{\text{АФ}}(F)$ , частотных  $S_{\text{ЧФ}}(F)$ , фазовых  $S_{\text{ФФ}}(F)$  флуктуаций рассчитываются по формулам:

$$S_{\text{АФ}}(F) = 10 \cdot \lg \frac{m_{\text{АМК}}^2(F) \cdot U_{\sim\text{АФ}}^2(F) \cdot U_{=\text{АМК}}^2(F)}{4 \cdot (\Delta F_{\text{эфф}} / \Delta F_1) \cdot U_{\sim\text{АМК}}^2(F) \cdot U_{=\text{АФ}}^2(F)}; \quad (10)$$

$$S_{\text{ЧФ}}(F) = 10 \cdot \lg \frac{m_{\text{ЧМК}}^2(F) \cdot U_{\sim\text{ЧФ}}^2(F)}{4 \cdot (\Delta F_{\text{эфф}} / \Delta F_1) \cdot U_{\sim\text{ЧМК}}^2(F)}; \quad (11)$$

$$S_{\text{ФФ}}(F) = 10 \cdot \lg \frac{m_{\text{ФМК}}^2(F) \cdot U_{\sim\text{ФФ}}^2(F)}{4 \cdot (\Delta F_{\text{эфф}} / \Delta F_1) \cdot U_{\sim\text{ФМК}}^2(F)}. \quad (12)$$

В формулах (10)–(12)  $U_{=\text{АМК}}, U_{\sim\text{АМК}}, U_{\sim\text{ЧМК}}, U_{\sim\text{ФМК}}, U_{=\text{АФ}}, U_{\sim\text{АФ}}, U_{\sim\text{ЧФ}}, U_{\sim\text{ФФ}}$  – уровни постоянной и переменной составляющих сигналов при калибровке и измерении;  $\Delta F_{\text{эфф}}$  – эффективная полоса частоты анализа;  $\Delta F = 1$  Гц.

Измерители флуктуаций включают в себя сверхвысокочастотный измерительный тракт, блок обработки измерительной информации БОИИ и персональный компьютер ПК. Блок БОИИ является унифицированной составляющей частью измерителей флуктуаций, которая может

использоваться для различных поддиапазонов миллиметрового диапазона длин волн. В блоке осуществляется усиление, частотная селекция сигналов постоянной и переменной составляющих выходных напряжений, переключение каналов для этих сигналов, их аналого-цифровое преобразование. Кроме того, в блоке осуществляется формирование необходимых воздействий для управления работой измерителей во всех режимах при инициализации от персонального компьютера ПК.

Точность измерений флуктуаций зависит от способов калибровки измерителей флуктуаций. Учитывая ограниченные по точности характеристики используемых при калибровке сверхвысокочастотных анализаторов спектра, был предложен способ, при реализации которого вместо прямой градуировки по показаниям сверхвысокочастотных анализаторов спектра используется метод замещения с использованием высокоточных регулируемых поляризационных сверхвысокочастотных аттенюаторов  $A_{т1}$  и  $A_{т2}$ .

Методика градуировки формирователя состоит из двух этапов. На первом этапе определяются показания регулируемого фазовращателя ФВ, при которых выполняются условия формирования амплитудной или угловой модуляций сверхвысокочастотных сигналов (значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ). На втором этапе при выставленном показании фазовращателя ФВ  $\varphi_1$  (условие формирования амплитудной модуляции сверхвысокочастотного сигнала), вносимых ослаблениях аттенюаторов  $A_{т2}$   $A_1$  (в дБ) и  $A_{т1}$   $A_2$  (в дБ) индекс амплитудной модуляции сверхвысокочастотных сигналов  $m_{AMK}$  находится по формуле:

$$m_{AMK} = 10^{\frac{A_2 - A_{2к} - A_1}{20}}, \quad (13)$$

где  $A_{2к}$  – зафиксированное значение ослабления  $A_{т1}$ , при котором будут равны по амплитуде несущая и боковые модуляционные составляющие сверхвысокочастотного сигнала.

При выставленном показании ФВ  $\varphi_2$  (условие формирования угловой модуляции сверхвысокочастотного сигнала), вносимых ослаблениях  $A_1$  и  $A_2$  индекс угловой модуляции сверхвысокочастотного сигнала  $m_{УМК}$  в радианах находится по формуле

$$m_{УМК} = \arctg \left( 10^{\frac{A_2 - A_{2к} - A_1}{20}} \right). \quad (14)$$

Точность воспроизведения индексов модуляции сверхвысокочастотного сигнала при таком способе определяется главным образом точностью воспроизведения вносимых ослаблений с помощью высокоточных поляризационных аттенуаторов АтТ1 и АтТ2.

В третьей, четвертой, пятой, шестой, седьмой главах показана методика определения точностных характеристик средств измерений, калибровки миллиметрового диапазона длин волн на этапах их разработки и изготовления, основанная на математическом моделировании процессов калибровки и непосредственного измерения. При этом в соответствии с выбранными структурами построения средств измерений и калибровки применяются следующие параметры 16-параметрической модели: для генераторов качающейся частоты –  $[E_S, E_L, E_T]_{ГКЧ}$ ; для скалярных анализаторов цепей –  $[E_D, E_M, E_S, E_L, E_T, E_R]_{САЦ}$ ; для гомодинных двунаправленных векторных анализаторов цепей –  $[E_D, E_{DR}, E_M, E_{MR}, E_S, E_{SR}, E_L, E_{LR}, E_{TR}, E_R, E_{RR}]_{ГОМ}$ ; для гетеродинных однонаправленных векторных анализаторов цепей –  $[E_D, E_M, E_S, E_L, E_T, E_R]_{ГЕТ}$ ; для измерителей мощности –  $[E_M, E_S, E_L, E_T]_{ИМ}$ ; для измерителей флуктуаций и средств калибровки для них (формирователей сигналов с известными индексами модуляций) –  $[E_D, E_M, E_Q, E_V, E_S, E_L, E_T, E_R]_{ИФ, ФС}$ .

В рамках отдельных ГНТП, ГПНИ, договоров и контрактов были изготовлены несерийные средства, в которые с целью их усовершенствования внедрены результаты проведенных исследований. Для этих средств измерений проведены метрологические исследования (метрологическая аттестация или калибровка), что явилось основой для серийного производства определенных типов средств измерений после проведения государственных испытаний и внесения в Государственные реестры средств измерений.

В качестве примера серийно изготавливаемого генератора качающейся частоты на основе ламп обратной волны можно привести генератор типа Г4-217, который имеет следующие основные метрологические характеристики:

- рабочий диапазон перестройки частоты – от 25,86 до 37,5 ГГц;
- минимальная полоса перестройки частоты – не менее 1,0 ГГц;
- выходная мощность – от 1,0 до 10 мВт;
- уровень выходной мощности – некалиброванный;
- пределы допускаемой погрешности установки и отсчета частоты – не более  $\pm 0,002 \cdot f_{\max}$ , где  $f_{\max}$  – максимальное значение частоты в полосе перестройки;
- кратковременная нестабильность частоты за 10 мин работы – не более  $\pm 1 \cdot 10^{-4} \cdot f_{\max}$ ;
- КСВН выхода генератора качающейся частоты – не более 1,5.

Серийно изготавливаемые твердотельные генераторы качающейся частоты типа Г4-МВМ (рисунок 2), основанные на умножении частоты и в которых обеспечивается высокая точность установки и стабильности частоты в отдельных поддиапазонах миллиметрового диапазона длин волн, имеют следующие основные метрологические характеристики:

- рабочий диапазон частот – от 25,95 до 37,5 ГГц (Г4-МВМ-37); от 37,5 до 53,57 ГГц (Г4-МВМ-53); от 53,57 до 78,33 ГГц (Г4-МВМ-78); от 78,33 до 118,1 ГГц (Г4-МВМ-118); от 118,1 до 178,4 ГГц (Г4-МВМ-178);

- пределы допускаемой основной погрешности установки и отсчета частоты по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ ;

- нестабильность частоты выходного сигнала генератора (за 15 мин) по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ ;

- выходная мощность – не менее 10 мВт;

- диапазон регулирования выходной мощности – 30 дБ;

- неравномерность уровня выходной мощности – не более  $\pm 1,0$  дБ;

- КСВН волноводного выхода – не более 1,5.



Рисунок 2. – Внешний вид генератора качающейся частоты типа Г4-МВМ

Серийно изготавливаемые скалярные анализаторы цепей (панорамные измерители КСВН и ослабления) типа Р2-МВМ (рисунок 3) имеют следующие основные метрологические характеристики:

- рабочий диапазон частот – от 25,95 до 37,50 ГГц (Р2-МВМ-37); от 37,50 до 53,57 ГГц (Р2-МВМ-53); от 53,57 до 78,33 ГГц (Р2-МВМ-78); от 78,33 до 118,1 ГГц (Р2-МВМ-118); от 118,1 до 178,4 ГГц (Р2-МВМ-178);

- пределы допускаемой основной погрешности установки и отсчета частоты по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ;

- нестабильность частоты выходного сигнала генератора (за 15 мин) по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ ;

- диапазон измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  – от 0 до минус 32 дБ;
- диапазон индикации КСВН – от 1,05 до 15;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  – не более  $\pm(0,2 + 0,03 \cdot |S_{11}|)$  дБ;
- диапазон измерения модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$  – от 0 до минус 40 дБ;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$  – не более  $\pm(0,2 + 0,02 \cdot |S_{21}|)$  дБ;
- КСВН волноводного выхода измерителя – не более 1,3.

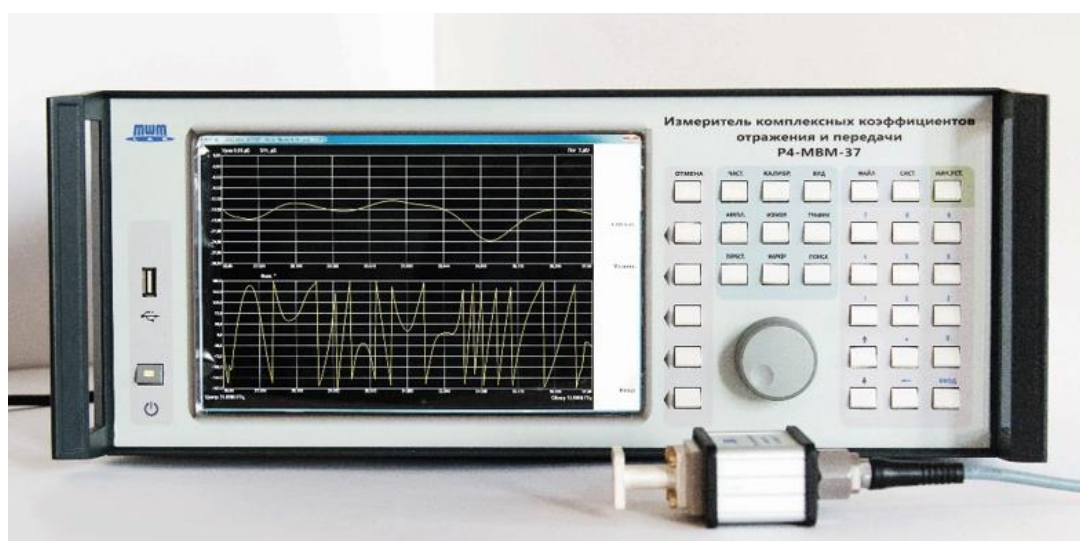


**Рисунок 3. – Внешний вид скалярного анализатора цепей (панорамного измерителя КСВН и ослабления) типа P2-MVM**

Серийно изготавливаемые векторные анализаторы цепей (измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи) типа P4-MVM (рисунок 4) имеют следующие основные метрологические характеристики:

- рабочие диапазоны частот – от 25,95 до 37,50 ГГц (P4-MVM-37); от 37,50 до 53,57 ГГц (P4-MVM-53); от 53,57 до 78,33 ГГц (P4-MVM-78); от 78,33 до 118,1 ГГц (P4-MVM-118); от 118,1 до 178,4 ГГц (P4-MVM-178);
- пределы допускаемой основной погрешности установки и отсчета частоты по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ;
- нестабильность частоты выходного сигнала генератора (за 15 мин) по отношению к  $f_{\max}$  – не более  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ ;
- диапазон измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  – от 0 до минус 32 дБ;
- диапазон индикации КСВН – от 1,05 до 15;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$ :
  - не более  $\pm(0,3 + 0,04 \cdot |S_{11}|)$  дБ для частот от 25,95 до 78,33 ГГц,
  - не более  $\pm(0,4 + 0,05 \cdot |S_{11}|)$  дБ для частот от 78,33 до 178,4 ГГц;
- диапазон измерения модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$  – от 0 до минус 60 дБ;

- пределы допускаемой основной погрешности измерения модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$ :
- не более  $\pm(0,2 + 0,03 \cdot |S_{21}|)$  дБ для частот от 25,95 до 78,33 ГГц,
- не более  $\pm(0,3 + 0,045 \cdot |S_{21}|)$  дБ для частот от 78,33 до 178,4 ГГц;
- диапазон измерения фазы коэффициента отражения  $|S_{11}|$  и передачи  $|S_{21}|$  – от 0 до 360 град ( $\pm 180$  град);
- пределы допускаемой основной погрешности измерения фазы коэффициента отражения  $|S_{11}|$  – не более  $\pm(4,0 + 0,20 \cdot |S_{11}|)$  град;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения фазы коэффициента передачи  $|S_{21}|$  – не более  $\pm(4,0 + 0,15 \cdot |S_{21}|)$  град.



**Рисунок 4. – Внешний вид векторного анализатора цепей (измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи) типа Р4-МВМ**

Серийно изготавливаемые измерители мощности типа М2-МВМ (рисунок 5) имеют следующие основные метрологические характеристики:

- рабочие диапазоны частот – от 25,95 до 37,50 ГГц (М2-МВМ-37); от 37,50 до 53,57 ГГц (М2-МВМ-53); от 53,57 до 78,33 ГГц (М2-МВМ-78); от 78,33 до 118,1 ГГц (М2-МВМ-118); от 118,1 до 178,4 ГГц (М2-МВМ-178);
- диапазоны измеряемых значений мощности – от 0,001 до 10 мВт;
- разрешающая способность – 1 мкВт;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения мощности – не более  $\pm[6+0,1 \cdot (P_v/P-1)]$  %, где  $P_v$ , мВт – значение верхнего предельного значения поддиапазона, на котором проведено измерение;  $P$ , мВт – измеренное значение мощности.
- КСВН волноводного выхода измерителя:
  - не более  $\pm 1,3$  для частот от 25,95 до 78,33 ГГц; не более  $\pm 1,4$  для частот от 78,33 до 178,4 ГГц.



Рисунок 5. – Внешний вид измерителя мощности типа M2-MBM

В качестве примера измерителей флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн можно привести измеритель флуктуаций MNM 25-37 (рисунок 6), который имеет следующие основные метрологические характеристики:

- рабочий диапазон частот – от 25,86 до 37,50 ГГц;
- диапазон частот анализа – от 0,02 до 1000 кГц;
- пределы измерения амплитудных флуктуаций – минус 140 дБ/Гц на частоте анализа 1 кГц; минус 150 дБ/Гц на частоте анализа 10 кГц; минус 160 дБ/Гц на частоте анализа 100 кГц;
- пределы измерения частотных флуктуаций – минус 80 дБ/Гц на частоте анализа 1 кГц; минус 105 дБ/Гц на частоте анализа 10 кГц; минус 135 дБ/Гц на частоте анализа 100 кГц;
- пределы измерения фазовых флуктуаций – минус 110 дБ/Гц на частоте анализа 1 кГц; минус 130 дБ/Гц на частоте анализа 10 кГц; минус 150 дБ/Гц на частоте анализа 100 кГц;
- погрешность измерения флуктуаций – не более  $\pm 3,0$  дБ;
- допускаемый уровень мощности входного сигнала – не менее 7,0 дБм.



Рисунок 6. – Внешний вид измерителя флуктуаций MNM 25-37

Метрологические характеристики средства калибровки измерителей флуктуаций (формирователя сигналов с известными индексами модуляции) в рабочем диапазоне перестройки частоты от 25,86 до 37,50 ГГц следующие:

- погрешность установки значения фазового сдвига сверхвысокочастотного сигнала в пределах от 0 до 360 град составляет не более  $\pm 0,2$  град;

- погрешность установки значения ослабления боковых модуляционных составляющих спектра сверхвысокочастотного сигнала в пределах от 0 до 70 дБ составляет не более  $\pm 0,5$  дБ;

- значение амплитудной модуляции устанавливается с помощью поляризационных аттенуаторов в пределах от минус 32 до минус 110 дБ; степень подавления амплитудной модуляции в режиме формирования фазовой модуляции составляет не менее 49 дБ;

- погрешность установки и воспроизведения сверхвысокочастотных сигналов с известной амплитудной, частотной или фазовой модуляцией составляет не более  $\pm 1,5$  дБ.

В приложениях представлены выражения для миноров матрицы [Г] адаптера ошибок (Приложение А), выражения некоторых миноров матрицы [Е] (Приложение Б), дополнение к списку договорных работ, связанных с результатами научных исследований (Приложение В), перечень договоров, контрактов, государственных программ и НИОКР, выполненных в период 2004–2020 гг. под научным руководством Гусинского А.В. (Приложение Г), общее количество серийных приборов, произведенных и реализованных в рамках тиражирования после выполнения ГНТП в период 2014 по 2020 гг. под научным руководством Гусинского А.В. (Приложение Д), копия акта, подтверждающего практическое использование результатов диссертационной работы (Приложение Е).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

На основании теоретических и экспериментальных исследований диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработаны универсальная и обобщенная математическая модели процессов калибровки, непосредственного измерения параметров четырехполюсников и  $2n$ -полюсников как объектов измерения, получены в матричном виде уравнения калибровки, восстановления и алгоритмы решения этих уравнений [2, 6, 23, 24, 28].

2. Разработаны алгоритмы коррекции результатов измерений для средств измерений с использованием уравнений калибровки и восстановления [6, 42].

3. Предложена модернизация структуры построения генераторов качающейся частоты на базе ламп обратной волны, позволяющая уменьшить погрешности установки и отсчета частоты. Разработана базовая структура



построения генератора на основе набора умножителей частоты, в которой реализуется выбор необходимого поддиапазона частот при соответствующей комбинации умножителей частоты и расширение линейных участков перестройки частоты [10, 11, 26, 43, 46, 51, 54].

4. Разработана структура построения широкодиапазонного по частоте генератора с базовым синтезатором частоты от 4 до 20 ГГц и одинаковых по составу блоков расширения, что позволяет реализовать увеличение количества диапазонов перестройки частоты в одном генераторе с формированием стабильных по уровню сигналов с малыми флуктуациями [26, 61].

5. Разработана базовая структура построения скалярных анализаторов цепей, в которой обеспечивается учет особенностей миллиметровых волн и используется программно-алгоритмический способ коррекции отклонения квадратичной характеристики детекторов. Это позволяет расширить динамические диапазоны измерений [22, 32, 37].

6. Для скалярных анализаторов цепей разработана методика калибровки и измерений, алгоритмы обработки измерительной информации, основанные на использовании не только стандартных наборов эталонных нагрузок и поляризационных аттенюаторов, но и дополнительно разработанных, аттестованных наборов мер фазового сдвига. Это позволяет расширить пределы измерений анализаторов и уменьшить пределы погрешностей измерения [22, 38, 40].

7. Разработана базовая структура построения двунаправленных гомодинных векторных анализаторов цепей, в которой наряду с учетом особенностей миллиметровых волн реализованы возможность измерений для объектов с любыми геометрическими размерами и использование предложенного принципа совмещения амплитудной модуляции с вентиляльным эффектом. Это позволяет осуществить автоматизацию измерений всего комплекса  $S$ -параметров без использования сверхвысокочастотных электромеханических переключателей [1, 2, 7, 20, 29, 55].

8. Разработана базовая структура построения однонаправленных гетеродинных векторных анализаторов цепей, в которой наряду с учетом особенностей миллиметровых волн реализуется использование смесителей с субгармонической накачкой. Это позволяет упростить конструкцию сверхвысокочастотного измерительного тракта [1, 2, 6].

9. Для формирователей квадратурных сигналов в гомодинных анализаторах цепей разработаны структуры построения и алгоритм необходимых расчетов для реализации модернизированного варианта аппаратного метода на базе квадратурного моста; модернизированный алгоритм программной реализации преобразования, связывающего действительную и мнимую части аналитического сигнала при реализации аппаратно-программного метода; структура построения и алгоритм обработки измерительной информации в рамках нового предложенного метода, основанного на дискретном во времени получении квадратурных

сигналов путем фазовой манипуляции опорного сверхвысокочастотного сигнала [2, 4, 6, 25, 60].

10. Разработан на основе универсальной 16-параметрической модели алгоритм обработки измерительной информации для гомодинных и гетеродинных векторных анализаторов цепей при использовании пяти калибровочных мер (эталонных стандартов) [2, 6, 21].

11. Разработана базовая структура построения измерителей мощности с диодными и термоэлектрическими приемными преобразователями, в которой наряду с учетом особенностей миллиметровых волн обеспечивается автоматизация определения при калибровке значений коэффициентов эффективности в зависимости от частоты или введение значения вручную с использованием клавиатуры; автоматическая калибровка нуля [5, 15].

12. С целью метрологического обеспечения измерителей мощности разработана структура построения эталонной (калибровочной) установки воспроизведения и передачи единицы мощности, в которой наряду с возможностью реализации высоких точностных характеристик удается полностью автоматизировать при калибровке процесс определения и внесения в память калибруемых измерителей мощности значений рассчитанных коэффициентов эффективности в частотных точках, при этом разработана методика калибровки и измерения, позволяющая уменьшить погрешность рассогласования [5, 17, 27, 41, 47].

13. Разработана базовая структура построения средств калибровки измерителей флуктуаций (формирователей сигналов с известными индексами модуляций), в которых реализовано повышение точности воспроизведения индексов амплитудной, частотной и фазовой модуляций эталонных сверхвысокочастотных сигналов [9, 12, 33, 34, 35, 37, 39, 50, 59].

14. Разработана базовая структура построения измерителей флуктуаций, в которой реализована возможность на базе единого сверхвысокочастотного измерительного тракта измерять весь комплекс флуктуаций (амплитудных, частотных, фазовых) [8, 30, 31, 35, 36, 44, 48, 49, 56].

15. Разработана система дистанционного контроля метрологических характеристик средств измерений, в рамках которой контроль метрологических характеристик осуществляется дистанционно при управлении с персонального компьютера калибровочной лаборатории. При дистанционном контроле наряду с экономическими и временными достоинствами (исключается необходимость демонтажа и транспортировки средств измерений в калибровочную лабораторию, сокращается время проведения метрологических исследований) обеспечивается возможность проведения исследований в рабочих условиях применения средств измерений, тем самым повышая точность измерений [13, 14, 16, 18, 19, 45, 52, 53, 57, 58].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные при математическом моделировании процессов калибровки и непосредственного измерения (параметры матриц погрешностей и уравнения калибровки, восстановления), внедрены в реализованную программу коррекции результатов измерений «Модель», которая использовалась при разработке базовых структур построения средств измерений миллиметрового диапазона длин волн и может быть использована для аналогичных работ в более высоких частотных диапазонах; при проведении метрологических исследований по определению характеристик изготовленных несерийных и серийных средств измерений; при коррекции результатов измерений в процессе тестирования интегральных схем с характеристикой их параметров; при отборе интегральных схем по критерию «годен/не годен»; при измерениях с использованием компланарных пробников с большим числом выводов, размещенных на металлических или керамических полотнох с избыточным монтажом [2, 6].

Разработанные и изготовленные в рамках ГППИ, ГНТП, контрактов и договорных работ несерийные средства измерений прошли различные виды метрологических исследований (метрологическую аттестацию, калибровку, поверку), а серийные средства измерений – государственные приемочные испытания, внесены в Государственные реестры средств измерений Республики Беларусь и Российской Федерации (генераторы качающейся частоты Г4-МВМ, скалярные анализаторы цепей Р2-МВМ, векторные анализаторы цепей Р4-МВМ, измерители мощности РМ 0,01–37,5 и М2-МВМ) [3, 10, 11, 56].

Разработанные и изготовленные средства измерений можно использовать в следующих областях науки и техники: медицина, биология, зондирование атмосферы в метеорологии, строительство, транспорт, радиоастрономия, радиоспектроскопия, исследование свойств материалов, разработка и создание компонентов в области электроники и микроэлектроники, а также в областях военного назначения – радиосвязь, радиолокация, радионавигация, радиоуправление, радиотелеметрия, радионаведение, радиопротиводействие и др.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богуш, Т. В. Борботько, А. В. Гусинский, Л. М. Лыньков, А. А. Тамело. – Минск : Бестпринт, 2003. – 406 с.

2. Гусинский, А. В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: в 3 ч. / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – Минск : БГУИР, 2008. – 909 с.

3. Гусинский, А. В. Введение в статистическую метрологию: в 2 ч. / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – Минск : Бестпринт, 2010. – 616 с.

4. Гусинский, А. В. Анализ и преобразования сигналов / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – Минск : Бестпринт, 2012. – 454 с.

5. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И. Ф. Бурак, А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. В. Ворошень, А. Н. Луферов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 328 с.

6. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / В. А. Богуш, А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2019. – 656 с.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, соответствующих  
пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении  
ученых званий в Республике Беларусь**

7. Елизаров, А. С. Гомодинные анализаторы для исследований цепей СВЧ в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А. С. Елизаров, А. М. Кострикин, А. В. Гусинский // Электроника СВЧ. – 1996. – Т. 41, № 5. – С. 602–610.

8. Автоматический измеритель флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2003. – № 1. – С. 64–71.

9. Калибровка измерителей флуктуаций и проведение измерений в миллиметровом диапазоне длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. Электроника. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 5–12.

10. Гусинский, А. В. Новые средства радиоизмерений в миллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, А. Б. Дзисяк // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 1. – С. 38–42.

11. Гусинский, А. В. Разработка и метрологическое обеспечение измерительной аппаратуры в миллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Гусинский, М. Ю. Дерябина, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2004. – № 2 (6). – С. 195–203.

12. Особенности калибровки измерителей флуктуаций сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Вести Академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2005. – № 2. – С. 53–59.

13. Толочко, Т. К. Дистанционная калибровка измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения VNA25-37 / Т. К. Толочко, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Вести БНТУ. – 2007. – № 5. – С. 29–35.

14. Толочко, Т. К. Дистанционная калибровка средств измерений / Т. К. Толочко, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2008. – № 1 (31). – С. 38–43.
15. Измеритель поглощаемой мощности РМ 0,01–20 ГГц / Ю. Е. Гурло, А. В. Ворошень, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2008. – № 1. – С. 68–72.
16. Зезюлина, Т. К. Разработка и внедрение метода дистанционной калибровки в аккредитованных лабораториях / Т. К. Зезюлина, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2010. № 2 (48). – С. 37–42.
17. Создание эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц на базе белорусских радиоизмерительных приборов / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, А. В. Галыго, А. Н. Луферов, Д. А. Кондрашов, А. В. Ворошень, С. С. Гурский, А. П. Белошицкий, М. С. Свирид, Т. К. Зезюлина // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 3 (50). – С. 12–20.
18. Гусинский, А. В. Оценка неопределенностей результатов измерений на СВЧ при дистанционной калибровке / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Т. К. Зезюлина // Вестник БНТУ. – 2010. – № 3. – С. 57–63.
19. Гусинский, А. В. Программное обеспечение систем дистанционной калибровки / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Т. К. Зезюлина. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2 (14). – С. 96–100.
20. Цифровая фильтрация квадратурных сигналов векторных анализаторов цепей / Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. С. Свирид // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5 (107). – С. 13–18.
21. Гусинский, А. В. Выбор оптимальной комбинации эталонных мер и алгоритм обработки измерительной информации для полной 16-параметрической математической модели восьмиполосника погрешностей / А. В. Гусинский, А. П. Белошицкий // Метрология и приборостроение. – 2018. – № 1. – С. 26–33.
22. Гусинский, А. В. Скалярные анализаторы цепей миллиметрового диапазона длин волн и способы повышения точности измерения модулей коэффициентов отражения и передачи / А. В. Гусинский // Доклады БГУИР. – 2018. – № 3 (113). – С. 80–87.
23. Копшай, А. А. Математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения  $S$ -параметров с помощью векторного анализатора цепей миллиметрового диапазона длин волн / А. А. Копшай, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2018. – № 1 (111). – С. 95–98.
24. Гусинский, А. В. Обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров многополосников / А. В. Гусинский // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 96–105.
25. Гусинский, А. В. Формирование квадратурных сигналов в векторных анализаторах цепей миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский,

Д. А. Кондрашов, В. А. Богуш // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 2 (85). – С. 34–40.

26. Гусинский, А. В. Генераторы качающейся частоты миллиметрового диапазона длин волн с умножением частоты / А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, А. С. Волюнец // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 98–102.

27. Гусинский, А. В. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Гусинский // Доклады БГУИР. – 2019. – № 6. – С. 50–54.

### **Статьи в других рецензируемых научных изданиях**

28. Гусинский, А. В. Полная 16-параметрическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров четырехполосников / А. В. Гусинский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 69–76.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

29. Гусинский, А. В. Гомодинные анализаторы СВЧ цепей в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, А. Б. Дзисяк // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы IV Международ. науч.-техн. конф., Минск, 1999 г. – Минск, 1999. – № 1 (7). – С. 41–44.

30. Высокочувствительные схемы измерителей флуктуаций СВЧ сигналов трехмиллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, А. Я. Бельский, А. Б. Дзисяк // Известия Белорусской инженерной академии. Спец. выпуск. Современные средства связи: материалы V Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. – Минск, 2000. – № 1 (9)/2. – С. 172–174.

31. Оценка шумовых параметров элементной базы измерителей флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы VI Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2001 г. – Минск, 2001. – № 1 (11)/3. – С. 220–221.

32. Скалярный анализатор цепей коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин, А. А. Филиппов // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XII Международ. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2002 г. – Севастополь, 2002. – С. 521–522.

33. Особенности калибровки измерителей флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XII Международ. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, 2002 г. – Севастополь, 2002. – С. 532–533.

34. Функционирование и калибровки измерителей флуктуаций сигналов трехмиллиметрового диапазона длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, сентябрь 2002 г. – Минск, 2002. – № 29 (40/2). – С. 20–22.

35. Измерители амплитудных, частотных и фазовых флуктуаций сигналов трехмиллиметрового диапазона длин волн и их калибровка / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Россия, г. Поведники, 2002 г. – Поведники, 2002. – Ч. 1. – С. 67–70.

36. Microwave meter of amplitude, frequency and phase noise of millimeter wavelength range signal / A. B. Dzisiak, A. V. Gusinskiy, D. A. Kondrashov, A. M. Kostrikin // National Academy of Sciences of Belarus. XII International Traveling Summer School on microwaves and lightwaves, ITSS-2002, Minsk, 2002. – Minsk, 2002. – P. 260–265.

37. Гусинский, А. В. Измеритель коэффициентов передачи и отражения трехмиллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, сентябрь – октябрь 2002 г. – Минск, 2002. – № 2 (14). – С. 18–19.

38. Гусинский, А. В. Меры фазового сдвига миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, И. И. Алябьева // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2003 г. – Минск, 2003. – № 1 (15)/4. – С. 154–156.

39. Устройство для калибровки измерителей флуктуаций сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2003 г. – Минск, 2003. – № 1 (15)/4. – С. 150–151.

40. Гусинский, А. В. Метрологические исследования мер фазового сдвига в миллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. С. Свирид // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2003 г. – Севастополь, 2003. – С. 668–670.

41. Руховец, О. В. Эталон мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 37,50–178,60 ГГц / О. В. Руховец, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2003 г. – Минск, 2003. – № 1 (15)/4. – С. 152–154.

42. Свирид, М. С. Устройство автоматической калибровки векторного анализатора цепей / М. С. Свирид, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи:

материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2004 г. – Минск, 2004. – № 2 (18)/2. – С. 97–98.

43. Ворошень, А. В. Синтезатор частоты 8-миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Ворошень, А. В. Гусинский // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2004 г. – Севастополь, 2004. – С. 633–634.

44. Гусинский, А. В. Исследование амплитудного детектора измерителя флуктуаций сигналов КВЧ / А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, П. А. Стамбул // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2005 г. – Севастополь, 2005. – С. 736–738.

45. Гусинский, А. В. Исследование метрологических характеристик измерительных систем, реализующих метод дистанционных измерений / А. В. Гусинский, Т. К. Толочко // Метрология и измерительная техника: материалы Междунар. науч. конф., Харьков, 2005 / ХНУРЭ. – Харьков, 2005 г. – Т. 7. – С. 116–119.

46. Ворошень, А. В. Ряд СВЧ синтезаторов качающейся частоты миллиметрового СВЧ диапазона длин волн / А. В. Ворошень, А. В. Гусинский // Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологии двойного применения, Минск, май 2005 г. – Минск, 2005. – С. 98–99.

47. Измеритель флуктуаций миллиметрового диапазона длин волн / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. М. Кострикин // Технические средства защиты информации: тез. докл. III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Нарочь, 23–27 мая 2005 г. – Минск, 2005. – С. 21–22.

48. Формирование калибровочного сигнала КВЧ для измерителя флуктуаций / А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. В. Ворошень, М. С. Свирид // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2005 г. – Севастополь, 2005. – С. 759–760.

49. Синтезатор частоты 6-миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Ворошень, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, П. А. Стамбул // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2005 г. – Севастополь, 2005. – С. 787–788.

50. Гусинский, А. В. Калибратор для поверки ваттметров малой мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. Ю. Дерябина, О. В. Руховец // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, 2006 г. – Севастополь, 2006. – С. 809–810.

51. Оценка неопределенности измерения коэффициента эффективности ваттметров поглощаемой мощности / Т. К. Толочко, А. В. Ворошень, А. В. Галыго, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // СВЧ техника



и телекоммуникационные технологии: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, 2006 г. – Севастополь, 2006. – С. 815–816.

52. Система дистанционной калибровки автоматических анализаторов цепей / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. Ю. Дерябина, Ю. А. Гусынина, Т. К. Толочко // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Украина, Крым, Севастополь, 2006 г. – Севастополь, 2006. – С. 807–808.

53. Оценка шумовых характеристик гетеродина НКШ миллиметрового диапазона / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. Б. Дзисяк, А. Н. Ярмолич // Информационные системы и технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. ИТС-2007, Россия, Нижний Новгород, 2007 г. – Нижний Новгород, 2007. – С. 59.

54. Измерительная аппаратура миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, С. С. Гурский, М. Ю. Дерябина // 45 лет МРТИ : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 64–65.

### Патенты

55. Измеритель комплексных параметров СВЧ устройств : пат. ВУ 6193 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. – Оpubл. 30.06.2004.

56. Измеритель флуктуаций сигналов активных устройств миллиметрового диапазона длин волн : пат. RU 2367967 / А. Б. Дзисяк, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. – Оpubл.: 20.09.2009.

57. Способ дистанционного контроля метрологических характеристик автоматизированных радиоизмерительных приборов диапазона СВЧ : пат. ВУ 12574 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Т. К. Толочко. – Оpubл. 30.10.2009.

58. Способ дистанционного контроля метрологических характеристик радиоизмерительных приборов на примере измерителя комплексных параметров СВЧ устройств: пат. RU 2379699 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Т. К. Толочко. – Оpubл. 20.01.2010.

59. Формирователь СВЧ сигналов с известными индексами модуляций : пат. ВУ 14894 / А. Б. Дзисяк, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. – Оpubл. 30.10.2011.

60. Способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ устройств: пат. ВУ 22074 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Д. А. Кондрашов, А. В. Сайков, В. П. Липатников, Н. А. Певнева. – Оpubл. 30.08.2018.

61. Широкодиапазонный генератор сигналов: пат. 036472 ЕА / А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, С. М. Лапшин, Д. А. Кондрашов, А. С. Волынец, А. М. Кострикин. – Оpubл. 30.09.2019.

## РЭЗІЮМЭ

Гусінскі Аляксандр Уладзіміравіч

### **Аўтаматызаваныя сродкі вымярэнняў міліметравага дыяпазону даўжынь хваль на аснове абагульненай мадэлі многополюсніка**

**Ключавыя словы:** міліметровы дыяпазон даўжынь хваль, матэматычная мадэль працэсаў каліброўкі і непасрэднага вымярэння, генератар хісткай частоты, скалярны аналізатар ланцугоў, вектарны аналізатар ланцугоў, вымяральнік магчымасці, вымяральнік флуктуацый свёрхвысокачастотных сігналаў, дыстанцыйны кантроль метралагічных характарыстык.

**Мэта працы:** мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца рашэнне комплекснай навукова-тэхнічнай праблемы, якая складаецца ў развіцці тэарэтычных і практычных асноў праектавання, распрацоўкі і вырабу сучасных аўтаматызаваных сродкаў вымярэнняў міліметравага дыяпазону даўжынь хваль, удасканаленне іх з улікам асаблівасцяў названага дыяпазону даўжынь хваль, рашэнне пытанняў іх метралагічнага забеспячэння.

**Метады даследавання:** у працы выкарыстоўваліся метады даследавання, якія носяць тэарэтычны і эксперыментальны характар з выкарыстаннем агульнай тэорыі ланцугоў (матрычных метадаў), тэорыі арыентаваных графаў, тэорыі аналізу ЗВЧ ланцугоў, тэорыі пераўтварэння сігналаў, тэорыі спектральнага аналізу, тэорыі аптымізацыі, агульнай тэорыі хібнасцяў і выразы нявызначанасці вынікаў вымярэнняў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Вырашаная важная навукова-тэхнічная праблема, звязаная з развіццём аўтаматызаваных сродкаў вымярэнняў міліметравага дыяпазону даўжынь хваль. Навізна, атрыманая ў выніках тэарэтычных даследаванняў, заключаецца: у прынцыпах пабудовы сродкаў вымярэнняў з улікам асаблівасцяў міліметравага дыяпазону даўжынь хваль; ў магчымасці выкарыстання матэматычнага мадэлявання працэсаў каліброўкі і непасрэднага вымярэння для поўнага комплексу параметраў, якія апісваюць хібнасці вымяральных сістэм; ў магчымасці ўдасканалення сродкаў вымярэнняў ў наступных напрамках – пашырэнне дыяпазонаў па частаце, пашырэнне межаў вымярэнняў, аўтаматызацыя працэсу вымярэнняў, спрашчэнне канструкцыі складовых частак сродкаў вымярэнняў, пашырэнне функцыянальных магчымасцяў гэтых сродкаў, паляпшэнне метралагічных характарыстык.

**Рэкамендацыі па выкарыстанню і галіне ужывання.** Праектаванне, распрацоўка, выраб і эксплуатацыя сучасных аўтаматызаваных сродкаў вымярэнняў міліметравага дыяпазону даўжынь хваль, а таксама іх метралагічнае забеспячэнне.

## РЕЗЮМЕ

Гусинский Александр Владимирович

### **Автоматизированные средства измерений миллиметрового диапазона длин волн на основе обобщенной модели многополюсника**

**Ключевые слова:** миллиметровый диапазон длин волн, математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения, генератор качающейся частоты, скалярный анализатор цепей, векторный анализатор цепей, измеритель мощности, измеритель флуктуаций сверхвысокочастотных сигналов, дистанционный контроль метрологических характеристик.

**Цель работы:** целью диссертационной работы является решение комплексной научно-технической проблемы, заключающейся в развитии теоретических и практических основ проектирования, разработки и изготовления современных автоматизированных средств измерений миллиметрового диапазона длин волн, усовершенствование их с учетом особенностей указанного диапазона длин волн, решение вопросов их метрологического обеспечения.

**Методы исследования:** в работе использовались методы исследования, которые носят теоретический и экспериментальный характер, с применением общей теории цепей (матричных методов), теории ориентированных графов, теории анализа СВЧ цепей, теории преобразования сигналов, теории спектрального анализа, теории оптимизации, общей теории погрешностей и выражения неопределенности результатов измерений.

**Полученные результаты и их новизна.** Решена важная научно-техническая проблема, связанная с развитием автоматизированных средств измерений миллиметрового диапазона длин волн. Новизна, полученная в результатах теоретических исследований, заключается в принципах построения средств измерений с учетом особенностей миллиметрового диапазона длин волн; возможности использования математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения для полного комплекса параметров, описывающих погрешности измерительных систем; возможности совершенствования средств измерений в следующих направлениях – расширение диапазонов по частоте, расширение пределов измерений, автоматизация процесса измерений, упрощение конструкции составных частей средств измерений, расширение функциональных возможностей этих средств, улучшение метрологических характеристик.

**Рекомендации по использованию и область применения.** Проектирование, разработка, изготовление и эксплуатация современных автоматизированных средств измерений миллиметрового диапазона длин волн, а также их метрологическое обеспечение.

## SUMMARY

Gusinsky Alexander Vladimirovich

### **Automated measuring instruments millimeter wavelength range based on the generalized multipole model**

**Keywords:** millimeter wavelength band, mathematical model of calibration and direct measurement processes, oscillating frequency generator, scalar network analyzer, vector network analyzer, power meter, microwave frequency fluctuation meter, remote control of metrological characteristics.

**Objectives:** the aim of the thesis is to solve a complex scientific and technical problem, which consists in developing the theoretical and practical bases for designing, developing and manufacturing modern automated tools for measuring the millimeter wavelength range, improving them taking into account the peculiarities of the specified wavelength range, solving their metrological issues of security.

**Research methods:** we used research methods that are theoretical and experimental in nature using the general theory of circuits (matrix methods), the theory of oriented graphs, the theory of analyzing microwave circuits, the theory of signal conversion, the theory of spectral analysis, optimization theory, general theory of errors and expressing the uncertainty of measurement results.

**The results and their novelty.** An important scientific and technical problem related to the development of automated tools for measuring the millimeter wavelength range has been solved. The novelty obtained in the results of theoretical studies is: in the principles of construction of measuring instruments, taking into account the characteristics of the millimeter wavelength range; the possibility of using mathematical modeling of calibration processes and direct measurement for the full range of parameters describing the errors of measuring systems; in the possibility of improving measuring instruments in the following areas – expanding the frequency ranges, extending the measurement range, automating the measurement process, simplifying the design of the component parts of the measuring instrument, expanding the functionality of these tools, improving metrological characteristics.

**Application area.** Design, development, manufacture and operation of modern automated tools measuring the millimeter wavelength range, as well as their metrological support.

**Гусинский Александр Владимирович**

**СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО  
ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ  
МОДЕЛИ МНОГОПОЛЮСНИКА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы

---

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16 Бумага офисная.  
Печать офсетная. Отпечатано на ризографе Усл. печ. л.  
Уч. изд. л. . Тираж экз. Заказ .

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск