

На правах рукописи

**ЗЕБЕК СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ**



**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ  
МЕТОДА ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.11.13 — Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Севастополь — 2020

Диссертационная работа выполнена в институте радиоэлектроники и информационной безопасности (ИРИБ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ).

Научный руководитель: **Гимпилевич Юрий Борисович**  
доктор технических наук, профессор, директор  
ИРИБ СевГУ, г. Севастополь

Официальные оппоненты: **Никулин Сергей Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное учре-  
ждение высшего образования «Нижегородский гос-  
ударственный технический университет имени  
Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

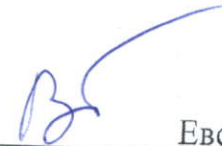
**Мартынов Олег Викторович**  
кандидат технических наук, старший научный со-  
трудник, Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Федеральный исследовательский  
центр «Морской гидрофизический институт РАН»,  
г. Севастополь

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Крымский федеральный университет имени  
В.И. Вернадского», г. Симферополь

Защита диссертации состоится 26 января 2021 г. в 11.00 на заседании объеди-  
ненного диссертационного совета Д 999.231.02 при Федеральном государственном  
бюджетном научном учреждении Институте природно-технических систем  
(ИПТС), Федеральном государственном автономном образовательном учреждении  
высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ)  
по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря ИПТС (или в биб-  
лиотеке СевГУ) и на сайте [www.ipts.rf](http://www.ipts.rf). Автореферат размещен на официальном  
сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки  
Российской Федерации [http:// vak.minobrnauki.gov.ru](http://vak.minobrnauki.gov.ru) / и на сайте [www.ipts.rf](http://www.ipts.rf).

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 999.231.02,  
кандидат физико-математических наук

  
Евстигнеев В.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современном мире микроволновая техника широко используется в народном хозяйстве. На ее основе строятся: системы космического телевидения, радиосвязи, радиолокации и навигации; приборы микроволнового встроенного контроля параметров технологических процессов и окружающей среды; медицинское оборудование и многое другое.

Для тестирования параметров и настройки этих систем и приборов на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации используют измерители комплексных параметров (коэффициентов отражения и передачи) узлов микроволнового тракта. Значительный вклад в развитие измерений комплексных параметров микроволновых узлов внесли российские и зарубежные ученые: Бова Н.Т., Бокринская А.А., Бондаренко И.К., Коротков К.С., Механиков А.И., Петров В.П., Никулин С.М., Чупров И.И., Гимпилевич Ю.Б., Савелькаев С.В., Рясный Ю.В., Пальчун Ю.А., Хворостов Б.А., Афонин И.Л., Beatty R.W., Engen G.F., Hoer C.A., Woods D., Somlo P.I., Williams M.L. и др.

Совершенствование метрологических и эксплуатационных характеристик измерителей комплексных параметров микроволновых узлов является стратегической задачей, стоящей перед радиоэлектронной отраслью.

В настоящее время для измерения комплексных параметров микроволновых узлов широкое применение находят так называемые векторные анализаторы цепей, которые серийно выпускаются в развитых странах (США, Германия, Япония, Россия, Китай, Великобритания и др.). Эти приборы обладают большой широкополосностью, многофункциональностью и высокими метрологическими характеристиками. Однако существенным недостатком этих приборов является их высокая стоимость, которая может достигать нескольких десятков миллионов рублей. Этот недостаток ограничивает применение таких анализаторов в промышленности, особенно на малых предприятиях, а также в образовательной сфере (колледжи, университеты). Кроме того, векторные анализаторы цепей обладают значительными габаритами и массой, что исключает их использование для целей встроенного микроволнового контроля параметров радиотехнических систем, а также параметров различных технологических процессов.

Для целей встроенного и технологического микроволнового контроля находят применение измерительные устройства, построенные на основе методов прямого детектирования с использованием квадратичных СВЧ диодов. Принцип действия этих устройств основан на анализе амплитудного распределения электромагнитной волны в линии передачи. Такие устройства обладают малыми габаритами и массой, что позволяет встраивать их в требуемом количестве в различных участках микроволнового тракта без существенного влияния на массогабаритные характеристики последнего. Недостатком таких устройств является невысокая точность измерений, поскольку применяемые для амплитудного детектирования СВЧ диоды имеют малый динамический диапазон квадратичного детектирования (порядка 30...40 дБ). Это приводит к существенной погрешности измерения, а также к резкому уменьшению точности (и даже невозможности проведения измерений) при изменении мощности в СВЧ линии передачи в широких пределах.

Таким образом, создание измерителей комплексных параметров микроволновых устройств, которые свободны от указанных выше недостатков, является важной и актуальной народно-хозяйственной задачей, решению которой посвящена диссертация.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование измерительных микроволновых устройств на основе метода прямого преобразования частоты, ориентированных на применение в условиях встроенного контроля пара-

метров СВЧ трактов радиотехнических систем и технологических процессов, которые обладают повышенной точностью, малыми габаритами и массой, а также низкой себестоимостью.

**Объектом исследования** является процесс распространения электромагнитной волны в рассогласованной линии передачи.

**Предметом исследования** являются квадратурный способ определения комплексных параметров микроволновых узлов, измерительные устройства и алгоритмы обработки информации, реализованные на основе этого способа.

**Основными задачами**, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, являются:

— анализ известных методов определения комплексных параметров микроволновых узлов с целью выбора направления исследований, обеспечивающего достижение поставленной цели;

— разработка и исследование нового способа измерения комплексного коэффициента отражения (ККО) микроволновых узлов, основанного на прямом преобразовании частоты путем квадратурного синхронного детектирования ответвляемых из первичной линии передачи сигналов;

— разработка математических моделей квадратурного способа измерения и измерительных устройств при однозондовом и двухзондовом анализе поля в линии передачи;

— разработка способов автоматизации измерительной процедуры и алгоритмов обработки измерительной информации, получаемой на выходах квадратурных демодуляторов;

— синтез цифровых резонаторов, обеспечивающих повышенную помехозащищенность измерительного канала, и оценка времени установления процессов на выходах этих резонаторов;

— оценка метрологических возможностей квадратурного способа измерения;

— разработка макетных образцов измерительного оборудования;

— проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения основных теоретических результатов.

В работе получены следующие **новые научные результаты**:

1. Предложен новый способ измерения комплексного коэффициента отражения, основанный на прямом преобразовании частоты путем квадратурного синхронного детектирования высокочастотных колебаний, ответвляемых из первичной линии передачи (квадратурный способ измерения). Способ защищен патентом РФ на изобретение.

2. Разработаны математические модели квадратурного способа измерения при однозондовом и двухзондовом анализе электромагнитного поля в линии передачи и получены основные соотношения для расчетов модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения на основе анализа как амплитудного, так и фазового распределений.

3. Разработаны новые измерительные устройства для определения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения, построенные на основе предложенного квадратурного способа. Новизна подтверждена патентом РФ на полезную модель.

4. Проведена оценка метрологических возможностей разработанного квадратурного способа измерения. При этом, получены соотношения для расчета методической погрешности измерения, вызываемой неидеальностью квадратурного детектора, а также проведено исследование влияния неидеальности зонда на фазовое распределение электромагнитной волны в линии передачи и оценены погрешности, вызываемые этим фактором.

5. Разработан спектральный алгоритм обработки измерительной информации на основе дискретного преобразования Фурье отсчетов амплитудного распределе-

ния поля в линии передачи и предложен метод коррекции мультипликативной погрешности с использованием четвертой гармоники спектра дискретного сигнала.

6. Предложены способы автоматизации измерительной процедуры на основе многозондовой измерительной линии и разработаны алгоритмы решения различных систем измерительных уравнений относительно искомых параметров. При этом, для случая использования двух квадратурных детекторов с инвариантными входами, получено аналитическое решение в предположении отсутствия невязок, а также показана возможность численного решения с минимизацией среднеквадратической ошибки в случае наличия невязок.

**Практическая значимость исследования** состоит в следующем:

1. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в работе, доказывают возможность создания на основе квадратурного способа измерения высокоточных измерительных микроволновых устройств, которые обладают конструктивной простотой, малыми габаритами, массой и низкой себестоимостью. Это открывает широкие возможности использования таких приборов в промышленности, образовательных организациях и делает их незаменимыми при реализации задач встроенного контроля параметров СВЧ трактов радиотехнических систем и задач мониторинга параметров технологических процессов и окружающей среды. Внедрение таких средств повышает эффективность использования радиотехнических систем и снижает затраты на ремонтно-восстановительные работы.

2. Полученные в работе аналитические зависимости, связывающие особенности амплитудного и фазового распределений электромагнитной волны в линии передачи с параметрами измеряемого микроволнового узла, а также исследования метрологических характеристик измерительных устройств, позволяют создать методики инженерного проектирования этих устройств, вплоть до миллиметрового диапазона волн.

3. Разработанные в диссертации алгоритмы обработки измерительной информации при практической реализации предполагают использование средств цифровой обработки (цифровых сигнальных процессоров, микроконтроллеров, программируемых логических интегральных схем и др.), что открывает возможность создания систем автоматического контроля и диагностики сложных микроволновых трактов с большим числом измерительных устройств (датчиков), размещенных в различных сечениях тракта. Это особенно актуально при решении задач дистанционного контроля и диагностики СВЧ трактов безэкипажных космических аппаратов, судов и других объектов, в том числе находящихся в агрессивных средах.

**Личный вклад.** Работа является самостоятельным исследованием. Основные результаты получены автором самостоятельно при методической помощи руководителя. Вклад автора состоит в постановке задач исследования, получении основных теоретических результатов, разработке алгоритмов и программ обработки измерительной информации, проведении моделирования, создании макетных образцов и проведении всех экспериментальных исследований. Соавторы в работах [18, 19] принимали участие в изготовлении элементов конструкций макетных образцов измерительных устройств, их настройке и в обработке результатов экспериментов.

**Методы исследования.** При выполнении работы использованы следующие методы:

- теория длинных линий;
- методы линейной алгебры;
- теория погрешностей;
- матричный метод анализа микроволновых схем;
- теория спектрального анализа дискретных сигналов;
- методы решения систем нелинейных уравнений;
- компьютерное моделирование;
- экспериментальные исследования.

**Достоверность** результатов работы обеспечивается адекватным применением математического аппарата и путем сравнения результатов теоретических исследований с результатами компьютерного моделирования и результатами экспериментальных исследований разработанных и изготовленных макетных образцов измерительных устройств. При этом экспериментальное определение погрешностей измерения осуществлялось с использованием образцовых мер полного сопротивления, дополнительно аттестованных с помощью высокоточного поверенного анализатора цепей в дискретных точках частотного диапазона, на которых проведены эксперименты.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации были представлены и обсуждались на следующих научно - технических конференциях: 24-й ... 29-й Международных научно - технических конференциях «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (Севастополь, КрыМиКо, 2014—2019); 8-ой...14-ой Международных молодежных научно-технических конференции “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (Севастополь, 2012—2018); 6-й ... 8-й Международных научно - технических конференциях «Проблемы телекоммуникаций» (Киев, 2012...2014); 16-м и 17-м Международных молодежных форумах «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 2012-2013).

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены на следующих предприятиях: ООО «Уранис» г. Севастополь; «Испытательный центр «Омега» — филиал ФГУП НИИ Радио, г. Севастополь; АО «КБ радиосвязи», г. Севастополь; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» при выполнении НИР в рамках проектной части госзадания «Разработка интегральной схемы микроволнового диапазона частот для диаграммообразующих модулей АФАР на основе кремниевой технологии» в инжиниринговом центре и в учебном процессе кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и информационной безопасности.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, в том числе: 5 статей в журналах и изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ и приравненных к ним (п.10 Постановления Правительства РФ №723 от 30.07.2014 г.); 17 работ в материалах Международных конференций, одна из которых индексирована в SCOPUS; 2 патента РФ.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Квадратурный способ измерения комплексного коэффициента отражения, основанный на прямом преобразовании частоты путем квадратурного синхронного детектирования ответвляемых из линии передачи микроволновых колебаний, обеспечивает расширение динамического диапазона изменения уровня мощности в тракте не менее чем на 30 дБ по отношению к известному способу, основанному на квадратичном амплитудном детектировании (получен патент РФ на способ измерения).

2. Микроволновые измерительные устройства и их математические модели, реализующие квадратурный способ измерения при однозондовом и двухзондовом анализе поля в линии передачи, обеспечивают методическую погрешность измерения модуля и аргумента ККО не превышающую 0,54% и 0,2<sup>0</sup> при фазовом анализе и 0,01% и 0,15<sup>0</sup> при амплитудном анализе, а также дополнительное повышение точности измерения из-за усреднения оценок за счет избыточности (получен патент РФ на полезную модель).

3. Метод автоматизации квадратурного способа измерения комплексных параметров микроволновых узлов на основе четырехзондовой измерительной линии и двух квадратурных детекторов с инвариантными входами, на которые попарно подаются сигналы с зондов, а результат измерения получают путем алгоритмической обработки выходных сигналов квадратурных детекторов, обеспечивает 1,5-2 кратное уменьшение габаритов и массы СВЧ части автоматических измерительных

устройств встроенного микроволнового контроля, используемых в промышленности, медицине, метрологии и др.

4. Спектрометрический алгоритм обработки измерительной информации, основанный на проведении дискретного преобразования Фурье с предварительной узкополосной фильтрацией дискретной последовательности, состоящей из отсчетов амплитудного распределения электромагнитного поля в линии передачи, получаемого в результате квадратурной обработки, устраняет мультипликативную погрешность и обеспечивает уменьшение СКО выходного шума не менее, чем в 4 раза.

5. Алгоритм аналитического решения системы измерительных уравнений позволяет определить модуль и аргумент комплексного коэффициента отражения и уровень падающей мощности в СВЧ тракте в автоматическом режиме по результатам квадратурного синхронного детектирования при отсутствии или незначительной величине (менее 1%) невязок.

6. Алгоритм численного решения системы измерительных уравнений позволяет определить модуль и аргумент комплексного коэффициента отражения, а также уровень падающей мощности в СВЧ тракте с минимизацией среднеквадратической ошибки при наличии существенных невязок (более 1%) и допускает нулевые начальные приближения для переменных.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации — 168 страниц, из них 138 основного текста, включая 48 иллюстрации и 8 таблиц. Библиографический список содержит 84 наименования.

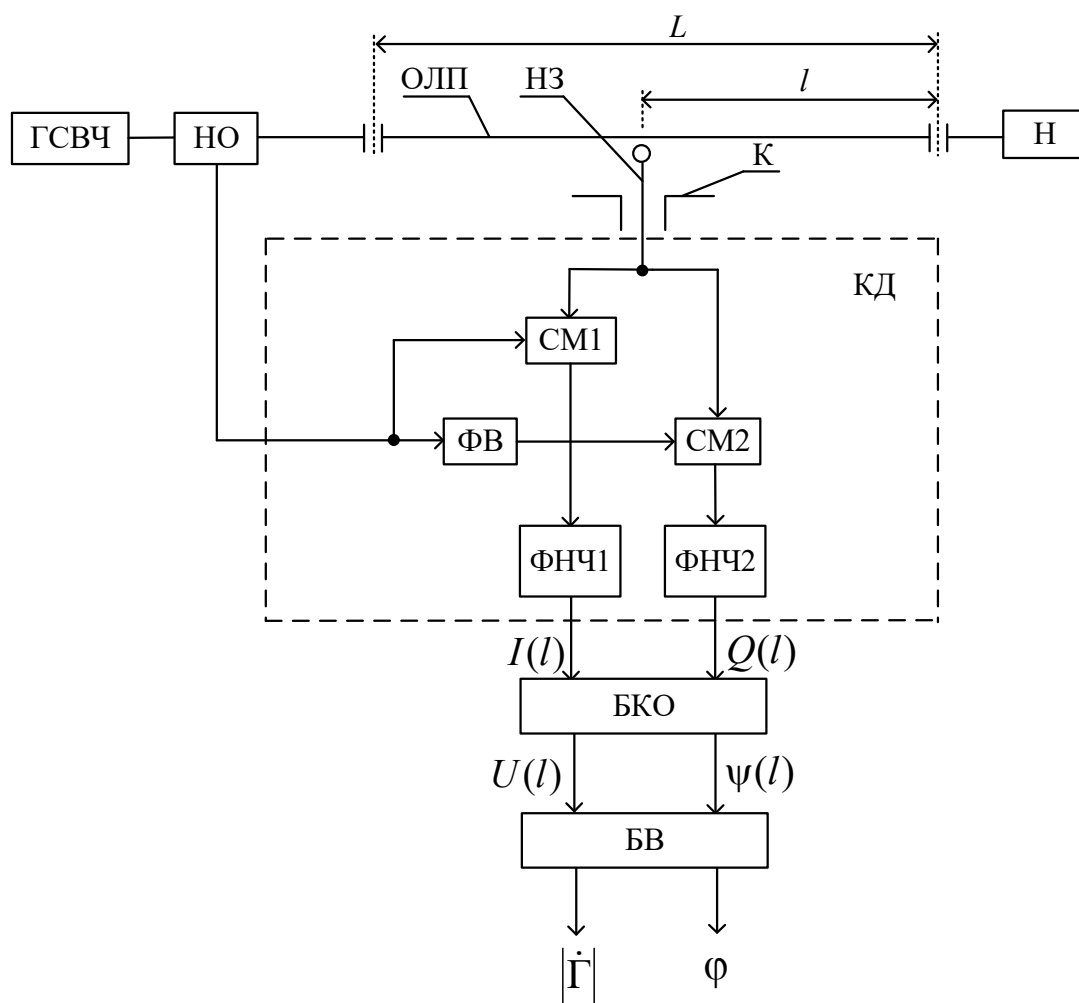
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, формулируется цель, ставятся задачи, отражаются научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

**Первый раздел** посвящен анализу известных методов определения комплексных параметров микроволновых узлов с целью выбора направления исследований, обеспечивающего достижение поставленной цели. Анализ показал, что наиболее полно требованиям, предъявляемым к измерительным устройствам встроенного микроволнового контроля, удовлетворяет интерференционный метод измерения, поскольку на его основе можно построить малогабаритные измерительные устройства и достичь полной автоматизация измерительного процесса. Также вскрыты основные недостатки известных технических решений, основанных на прямом детектировании ответвляемых сигналов, связанные с неквадратичностью ВАХ детекторных СВЧ диодов: малый динамический диапазон изменения уровня мощности в тракте и невысокая точность измерения. В заключении раздела выдвинута гипотеза о возможности разработки нового способа измерения ККО микроволновых устройств на основе прямого преобразования частоты путем квадратурного синхронного детектирования ответвляемых колебаний. Показано, что реализация этого способа позволит в значительной степени преодолеть указанные недостатки и улучшить метрологические характеристики приборов встроенного микроволнового контроля.

**Второй раздел** посвящен разработке и исследованию квадратурного способа измерения ККО. Структурная схема измерительного устройства для случая однозондового анализа распределения электромагнитного поля в линии передачи показана на рисунке 1. Гармоническое колебание от СВЧ генератора (ГСВЧ) через отрезок линии передачи (ОЛП) с продольной щелью, длиной  $L$ , в которую введен ненаправленный зонд (НЗ), поступает на нагрузку (Н), модуль и аргумент ККО которой необходимо определить. НЗ находится на некотором расстоянии  $l$  от Н и уста-

новлен на каретке (К), которая может перемещаться вдоль ОЛП. На выходе вторичного канала направленного ответвителя (НО) формируется сигнал той же частоты, что и сигнал, ответвляемый НЗ. Сигналы с НЗ и НО, подаются на входы смесителей СМ1 и СМ2. Причем сигнал с выхода НО, перед тем как попасть на вход СМ2 сдвигается по фазе на  $-90^0$  при помощи фазовращателя (ФВ). При этом в спектре тока смесителей СМ1 и СМ2 появляются комбинационные составляющие нулевой частоты, выделяемые фильтрами нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2. В результате этого обеспечивается двухканальное прямое преобразование частоты, то есть осуществляется квадратурное детектирование СВЧ сигнала, ответвляемого из ОЛП. Фазовращатель ФВ, смесители СМ1 и СМ2, фильтры ФНЧ1 и ФНЧ2 образуют квадратурный детектор (КД). На выходе КД при перемещении НЗ вдоль ОЛП формируются пара квадратурных составляющих  $I(l)$  и  $Q(l)$ .



**Рисунок 1 — Структурная схема однозондового измерительного устройства**

Эти сигналы далее поступают в блок квадратурной обработки (БКО), который может быть реализован на основе персонального компьютера либо микроконтроллера, где осуществляется расчет амплитуды и начальной фазы ответвленного сигнала. На выходах БКО получаем амплитудное и фазовое распределения поля в ОЛП. Далее эта информация попадает в блок вычислительный (БВ), в котором рассчитываются оценки модуля и аргумента ККО, а результаты измерения получают путем усреднения этих оценок.

Разработана математическая модель квадратурного способа измерения при однозондовом анализе поля в линии передачи и показано, что на выходе квадратурного детектора КД составляющие  $I(l)$  и  $Q(l)$  имеют вид:



$$I(l) = K_1 E_n^2 \sqrt{1 + |\dot{\Gamma}|^2 + 2|\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)} \cdot \cos \left( \psi_{\text{он}} + \beta L - \beta l + \arctg \frac{|\dot{\Gamma}| \sin(2\beta l - \varphi)}{1 + |\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)} \right); \quad (1)$$

$$Q(l) = K_1 E_n^2 \sqrt{1 + |\dot{\Gamma}|^2 + 2|\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)} \cdot \sin \left( \psi_{\text{он}} + \beta L - \beta l + \arctg \frac{|\dot{\Gamma}| \sin(2\beta l - \varphi)}{1 + |\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)} \right), \quad (2)$$

где  $K_1$  — сквозной коэффициент преобразования;  $E_n$  — амплитуда падающей волны;  $|\dot{\Gamma}|, \varphi$  — модуль и аргумент ККО;  $\beta = 2\pi/\lambda$  — фазовая постоянная;  $\lambda$  — длина волны в линии передачи;  $\psi_{\text{он}}$  — начальная фаза опорного колебания.

С использованием (1) и (2), получено следующее соотношение для информационной составляющей фазового распределения электромагнитного поля в линии передачи  $\Delta\psi(l)$ :

$$\Delta\psi(l) = \arctg \left( \frac{Q(l)}{I(l)} \right) - (\psi_{\text{он}} + \beta L - \beta l) = \arctg \frac{|\dot{\Gamma}| \sin(2\beta l - \varphi)}{1 + |\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)}. \quad (3)$$

Проведен анализ особенностей (экстремальных значений и положения нулей) функции  $\Delta\psi(l)$  (3) и получены следующие формулы для определения модуля и аргумента ККО на основе фазового распределения:

$$|\dot{\Gamma}| = \sin(\Delta\psi_{\text{max}}). \quad (4)$$

$$\varphi = -\pi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta l_{\psi}, \quad (5)$$

где  $\Delta\psi_{\text{max}}$  — максимальное значение функции  $\Delta\psi(l)$ ;  $\Delta l_{\psi}$  — величина смещения нулей  $\Delta\psi(l)$  при подключении в качестве нагрузки образцового короткозамыкателя.

С использованием (1) и (2), получено соотношения для амплитудного распределения электромагнитного поля в линии передачи  $U(l)$ :

$$U(l) = \sqrt{I(l)^2 + Q(l)^2} = K_1 E_n^2 \sqrt{1 + |\dot{\Gamma}|^2 + 2|\dot{\Gamma}| \cos(2\beta l - \varphi)}. \quad (6)$$

Проведен анализ особенностей (экстремальных значений и положения нулей) функции  $U(l)$  и получены следующие формулы для определения модуля и аргумента ККО на основе амплитудного распределения:

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{\frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}}; \quad (7)$$

$$\varphi = -\pi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta l_U, \quad (8)$$

где  $U_{\text{min}}, U_{\text{max}}$  — минимальное и максимальное значения функции  $U(l)$ ;

$\Delta l_U$  — величина смещения минимумов амплитудного распределения при подключении в качестве нагрузки образцового короткозамыкателя.

Таким образом, за один цикл измерения мы получаем две оценки модуля и две оценки аргумента, то есть двукратную избыточность. Это позволяет повысить точность измерения путем усреднения этих оценок. Процедура усреднения также осуществляется в блоке вычислительном БВ.

Недостатком однозондовой реализации квадратурного способа измерения ККО является то, что при перемещении каретки кабель, через который на квадратурный демодулятор подается опорный сигнал деформируется, что приводит к изменению как амплитуды, так и начальной фазы опорного сигнала, вследствие чего

понижается точность измерения. Исключить этот недостаток можно путем перехода к двухзондовой реализации измерительного устройства (рисунок 2).

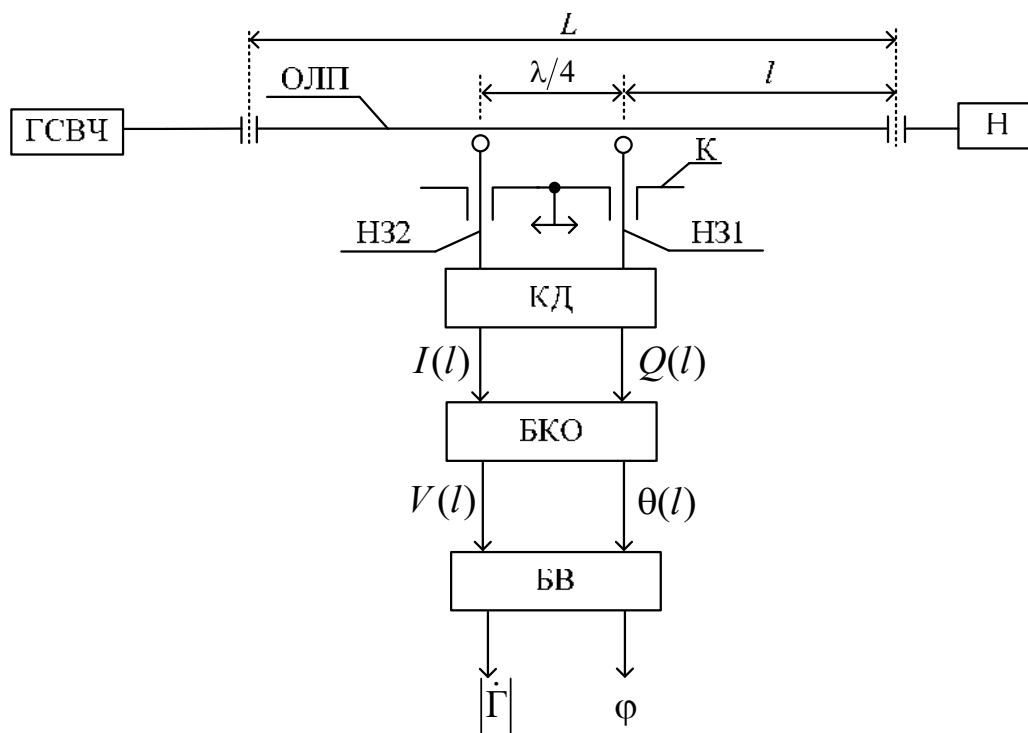


Рисунок 2 — Структурная схема двухзондового измерительного устройства

Через продольную щель в ОЛП введены два ненаправленных зонда НЗ1 и НЗ2. Оба зонда установлены на каретке (К), которая может перемещаться вдоль ОЛП. Расстояние между зондами выбрано равным  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волны в ОЛП. Ненаправленный зонд НЗ1 размещен на некотором расстоянии  $l$  от плоскости подключения измеряемой нагрузки Н. Сигналы с НЗ1 и НЗ2, подаются на входы квадратурного демодулятора КД. При этом из измерительной схемы исключаются направленный ответвитель и отрезок деформирующегося при движении каретки коаксиального кабеля, что позволяет повысить точность измерения, а также уменьшить габариты и массу измерительной установки.

Разработана математическая модель квадратурного способа измерения при двухзондовом анализе поля в линии передачи и показано, что составляющие  $I(l)$  и  $Q(l)$  на выходах квадратурного детектора КД в этом случае принимают вид:

$$I(l) = K_2 E_n^2 \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}|^2 (4 \cos^2(2\beta l - \varphi) - 2) + |\dot{\Gamma}|^4} \cdot \cos \left( \arctg \frac{2|\dot{\Gamma}| \sin(2\beta l - \varphi)}{1 - |\dot{\Gamma}|^2} + \frac{\pi}{2} \right); \quad (9)$$

$$Q(l) = K_2 E_n^2 \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}|^2 (4 \cos^2(2\beta l - \varphi) - 2) + |\dot{\Gamma}|^4} \cdot \sin \left( \arctg \frac{2|\dot{\Gamma}| \sin(2\beta l - \varphi)}{1 - |\dot{\Gamma}|^2} + \frac{\pi}{2} \right), \quad (10)$$

где  $K_2$  — сквозной коэффициент преобразования.

В результате квадратурной обработки составляющих (9) и (10), получено следующее выражение для функции  $\Delta\theta(l)$ , которая определяется только фазовым распределением поля:

$$\Delta\theta(l) = \operatorname{arctg}\left(\frac{Q(l)}{I(l)}\right) - \frac{\pi}{2} = \operatorname{arctg}\frac{2|\dot{\Gamma}|\sin(2\beta l - \varphi)}{1 - |\dot{\Gamma}|^2}. \quad (11)$$

Проведен анализ особенностей (экстремальных значений и положения нулей) функции (11). В результате анализа получены следующие формулы для определения модуля и аргумента ККО на основе фазового распределения:

$$|\dot{\Gamma}| = \operatorname{tg}\frac{\Delta\theta_{\max}}{2}; \quad (12)$$

$$\varphi = -\pi + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta l_{\theta}, \quad (13)$$

где  $\Delta\theta_{\max}$  — максимальное значение функции  $\Delta\theta(l)$ ;  $\Delta l_{\theta}$  — величина смещения нулей функции  $\Delta\theta(l)$  при подключении в качестве нагрузки образцового короткозамыкателя.

В результате квадратурной обработки составляющих (9) и (10), получено следующее выражение для функции  $V(l)$ , которая определяется только амплитудным распределением поля в ОЛП:

$$V(l) = \sqrt{I(l)^2 + Q(l)^2} = K_2 E_{\pi}^2 \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}|^2 (4\cos^2(2\beta l - \varphi) - 2) + |\dot{\Gamma}|^4}. \quad (14)$$

Проведен анализ особенностей (экстремальных значений и положений нулей) функции  $V(l)$ . В результате анализа и получены следующие формулы для определения модуля и аргумента ККО на основе амплитудного распределения:

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{\frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}}; \quad (15)$$

$$\varphi = -\pi + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta l_V. \quad (16)$$

Расчеты оценок модуля и аргумента ККО по формулам (12), (13) при использовании фазового распределения и по формулам (15), (16) при использовании амплитудного распределения осуществляются в блоке вычислительном БВ. В этом же блоке осуществляется усреднение этих оценок.

Во втором разделе также проведено исследование метрологических возможностей квадратурного способа измерения ККО.

Проведен анализ методической погрешности измерения, которая вызывается разбалансом амплитуд и разбалансом фаз каналов квадратурного демодулятора. Получены соотношения для квадратурных составляющих на выходах неидеального квадратурного демодулятора, что позволило провести точное моделирование методической погрешности измерения с использованием математического пакета прикладных программ. Моделирование основано на расчетах измеренных значений при использовании неидеального квадратурного демодулятора и сравнении этих результатов с истинными значениями. Моделирование проведено для случаев определения измеряемых величин при использовании как фазового, так и амплитудного распределений электромагнитного поля в СВЧ тракте. В процессе моделирования для различных значений разбаланса амплитуд и разбаланса фаз определялись относительная погрешность измерения модуля ККО и абсолютная погрешность измерения аргумента ККО. Показано, что при применении современного квадратурного демодулятора в интегральном исполнении методические погрешности измерения модуля и аргумента ККО (при  $|\dot{\Gamma}| = 0,33$ ) при фазовом анализе не превышают 0,54% и 0,2°, а при амплитудном анализе — 0,01% и 0,15° соответственно.

Кроме того, проведено исследование влияния зонда на фазовое распределение электромагнитной волны в линии передачи и оценены погрешности измерения модуля и аргумента ККО, вызываемые этим фактором. Для случая однозондового анализа получена формула для информационной составляющей фазового распределения в случае неидеального зонда в следующем виде

$$\Delta\psi(l) = -\argum\left(\frac{1 + (S_{21} - S_{11})\dot{\Gamma}e^{-j2\beta l}}{1 - S_{11}\dot{\Gamma}e^{-j2\beta l}}\right), \quad (17)$$

где  $S_{11}$  и  $S_{21}$  — элементы матрицы рассеяния шестиполосника, которой описывается неидеальный зонд.

С использованием формулы (17) проведено моделирование погрешностей измерения модуля и аргумента ККО, вызываемых неидеальностью зонда. При этом показано, что эти погрешности для практически важных случаев не превышают 0,5 % по модулю и 2 градуса по аргументу.

Во втором разделе также разработаны методы автоматизации квадратурного способа измерения ККО микроволновых двухполосников путем применения четырехзондовой измерительной линии. Предложены два варианта автоматических измерительных устройств: первый — с опорным каналом, одним квадратурным детектором и переключаемыми с помощью СВЧ коммутатора зондами; второй — без опорного канала с двумя квадратурными детекторами с инвариантными входами.

Разработаны математические модели измерительных процедур для этих вариантов. Для второго варианта эта модель представляет собой систему нелинейных относительно искомым параметров, измерительных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{I_1} = \frac{2|\dot{\Gamma}|\sin(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2}; \\ I_1^2 + Q_1^2 = K_3^2 \left[ (1 + |\dot{\Gamma}|^2)^2 - 4|\dot{\Gamma}|^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) \right]; \\ \frac{Q_2}{I_2} = \frac{2|\dot{\Gamma}|\cos(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2}; \\ I_2^2 + Q_2^2 = K_3^2 \left[ (1 + |\dot{\Gamma}|^2)^2 - 4|\dot{\Gamma}|^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) \right], \end{cases} \quad (18)$$

где  $I_1, Q_1$  и  $I_2, Q_2$  —  $I$  и  $Q$  составляющие на выходах первого и второго квадратурных детекторов соответственно;  $K_3$  — величина, пропорциональная мощности в СВЧ тракте;  $\varphi_0$  — удвоенный набег фазы от плоскости подключения нагрузки до плоскости подключения первого зонда.

**Третий раздел** посвящен разработке алгоритмов обработки измерительной информации.

Для автоматического измерительного устройства с опорным каналом разработан спектрметрический алгоритм обработки амплитудного распределения, который позволяет определить модуль и аргумент ККО путем определения амплитуды и начальной фазы первой гармоники отсчетов измерительного сигнала с помощью прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ), а коррекцию мультипликативной погрешности осуществлять с использованием четвертой гармоники этого сигнала. Проведен синтез цифровых узкополосных фильтров, настроенных на первую и четвертую гармоники дискретного сигнала, методом инвариантной импульсной характеристики. Оценена эффективность применения цифровых узкополосных фильтров, результат которой показал уменьшение СКО шума на выходе блока обработки измерительной информации не менее, чем в 4 раза.

Для автоматического измерительного устройства на основе двух квадратурных детекторов с инвариантными входами получено аналитическое решение системы уравнений (18) относительно измеряемых параметров. Алгоритм решения

строится на основе модификации системы измерительных уравнений (18) путем введения новых промежуточных переменных  $X$  и  $Y$  с последующим преобразованием и решением модифицированной системы уравнений. В результате решения получены следующие аналитические выражения для промежуточных переменных:

$$X = \frac{(Q_2/I_2) \left( \sqrt{1 + (Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} - 1 \right)}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2}; \quad Y = \frac{(Q_1/I_1) \left( \sqrt{1 + (Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} - 1 \right)}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2}, \quad (19)$$

где  $X = |\dot{\Gamma}| \cos(\varphi + \varphi_0)$ ,  $Y = |\dot{\Gamma}| \sin(\varphi + \varphi_0)$  — промежуточные переменные.

Это позволило рассчитать измеряемые параметры по формулам:

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad (20)$$

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{Y}{X} - \varphi_0; \quad (21)$$

$$K_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 + Q_1^2 + I_2^2 + Q_2^2}{2[1 + (X^2 + Y^2)]}}. \quad (22)$$

При значительных невязках в уравнениях системы (18), вызываемых погрешностями измерения квадратурных составляющих, применение формул (20)...(22) для определения искомых параметров становится неэффективным и может приводить к результатам, противоречащим физическому смыслу. Поэтому проведено исследование возможности численного решения модифицированной системы измерительных уравнений с использованием итерационной процедуры, обеспечивающей минимизацию среднеквадратической ошибки в случае наличия невязок в уравнениях системы. При этом в результате множественных численных экспериментов доказана возможность использования нулевых начальных приближений для промежуточных переменных  $X$  и  $Y$ . Приведены результаты численного анализа для случаев отсутствия и присутствия невязок и показана эффективность предложенного алгоритма.

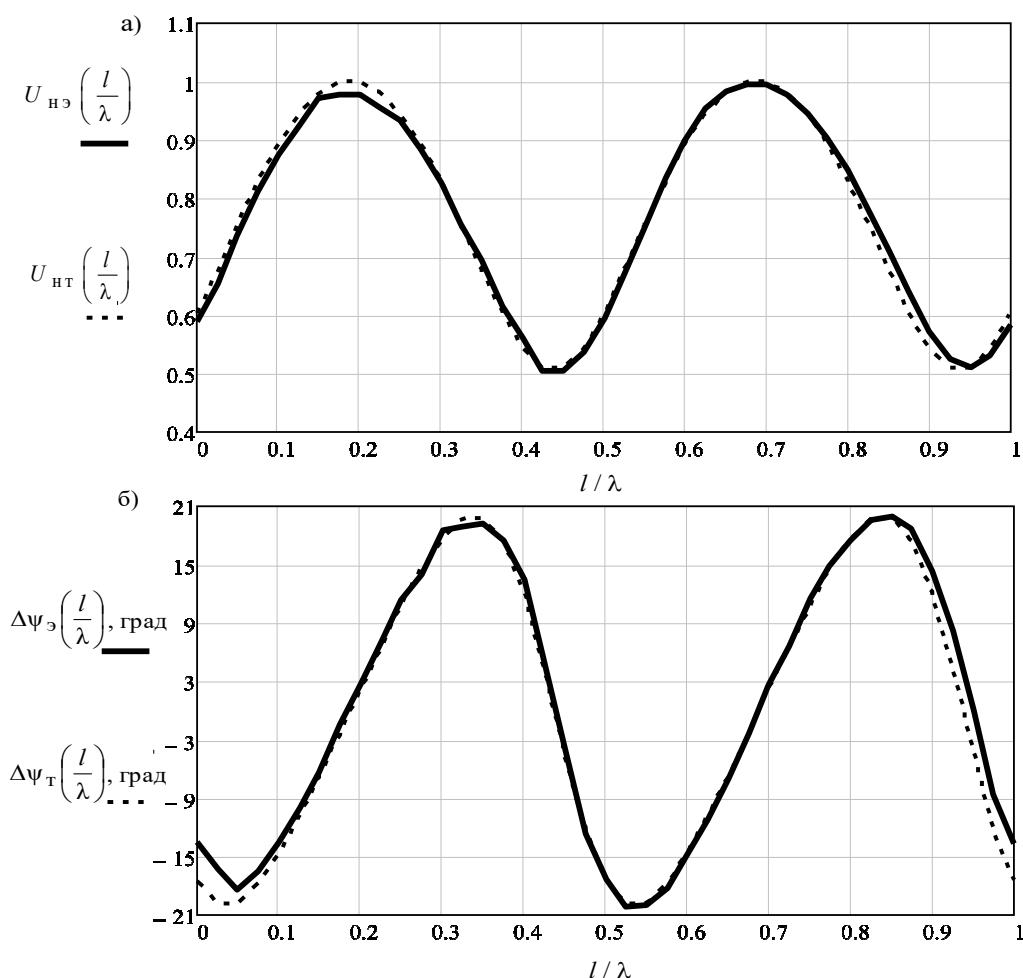
**В четвёртом разделе** представлены результаты экспериментальных исследований. Проведена разработка макетных образцов двух измерительных установок. Установки созданы на основе доработанной измерительной линии типа P1-17.

В первой установке реализован однозондовый принцип анализа амплитудного и фазового распределений поля в линии передачи. Доработка измерительной линии в этом случае заключалась в том, что из конструкции удалена детекторная секция с СВЧ диодом, высокочастотный сигнал подавался на измерительный вход квадратурного детектора, выполненного на интегральной схеме *ADL5382*, на второй вход которого подавался опорный сигнал с направленного ответвителя.

Во второй установке реализован двухзондовый принцип анализа амплитудного и фазового распределений волны в линии передачи. В этой установке отсутствует направленный ответвитель и отрезок коаксиального кабеля в опорном канале. В этом случае на единой каретке на расстоянии  $\lambda/4$  установлены два ненаправленных зонда. Высокочастотные сигналы с этих зондов поданы на входы специально разработанного и изготовленного квадратурного детектора с инвариантными входами, который реализован на основе перемножителей сигналов *ADL5391*.

С использованием разработанных установок проведены множественные измерения ККО различных образцовых нагрузок на основе как фазового, так и амплитудного распределений. В качестве образцовых нагрузок использовались меры КСВН второго разряда ЭК9-180, которые дополнительно были аттестованы с помощью высокоточного анализатора цепей *E5063A* производства компании *Keysight Technologies*. Результаты анализа обрабатывались с использованием персонального

компьютера. При этом осуществлялось сравнение с теоретическими зависимостями. Эксперименты проводились в диапазоне частот (0,7 — 2,5) ГГц. Ниже представлены некоторые результаты измерения модуля и аргумента ККО образцовой нагрузки с  $|\dot{\Gamma}| = 0,33$  на частоте  $f = 1,5$  ГГц ( $\lambda = 20$  см). Результаты однозондового анализа представлены на рисунке 4. На рисунке 4 сплошными линиями показаны графики нормированных относительно максимального значения амплитудных  $U_{нэ}(l/\lambda)$  и фазовых  $\Delta\psi_{э}(l/\lambda)$  распределений, полученные экспериментально. Пунктирными линиями изображены теоретические графики  $U_{нт}(l/\lambda)$  и  $\Delta\psi_{т}(l/\lambda)$ .



**Рисунок 4 — Амплитудное *a)* и фазовое *b)* распределения поля при  $|\dot{\Gamma}| = 0,33$**

Результаты измерений модуля  $|\dot{\Gamma}_и|$  и аргумента  $\varphi_и$  ККО образцовой нагрузки, а также результаты расчета относительной погрешности измерения  $\delta|\dot{\Gamma}|$  (в процентах) и абсолютной погрешности  $\Delta\varphi$  (в градусах) показаны в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 — Результаты однозондового анализа (амплитудное распределение)

Параметры образцовой нагрузки	Измеренное значение $ \dot{\Gamma}_и $	Измеренное значение $\varphi_и$ , град.	Относительная погрешность $\delta \dot{\Gamma} $ , %	Абсолютная погрешность $\Delta\varphi$ , град.
$ \dot{\Gamma}  = 0,333$ $\varphi = 107,5^\circ$	0,325	110,1	2,4	- 2,6

Таблица 2 — Результаты однозондового анализа (фазовое распределение)

Параметры образцовой нагрузки	Измеренные значения $ \dot{\Gamma}_n $	Измеренные значения $\varphi_n$ , град.	Относительная погрешность $\delta \dot{\Gamma} $ , %	Абсолютная погрешность $\Delta\varphi$ , град.
$ \dot{\Gamma} =0,333$ $\varphi = 107,5^\circ$	0,327	109,6	1,8	- 2,1

Результаты двухзондового анализа представлены на рисунке 5.

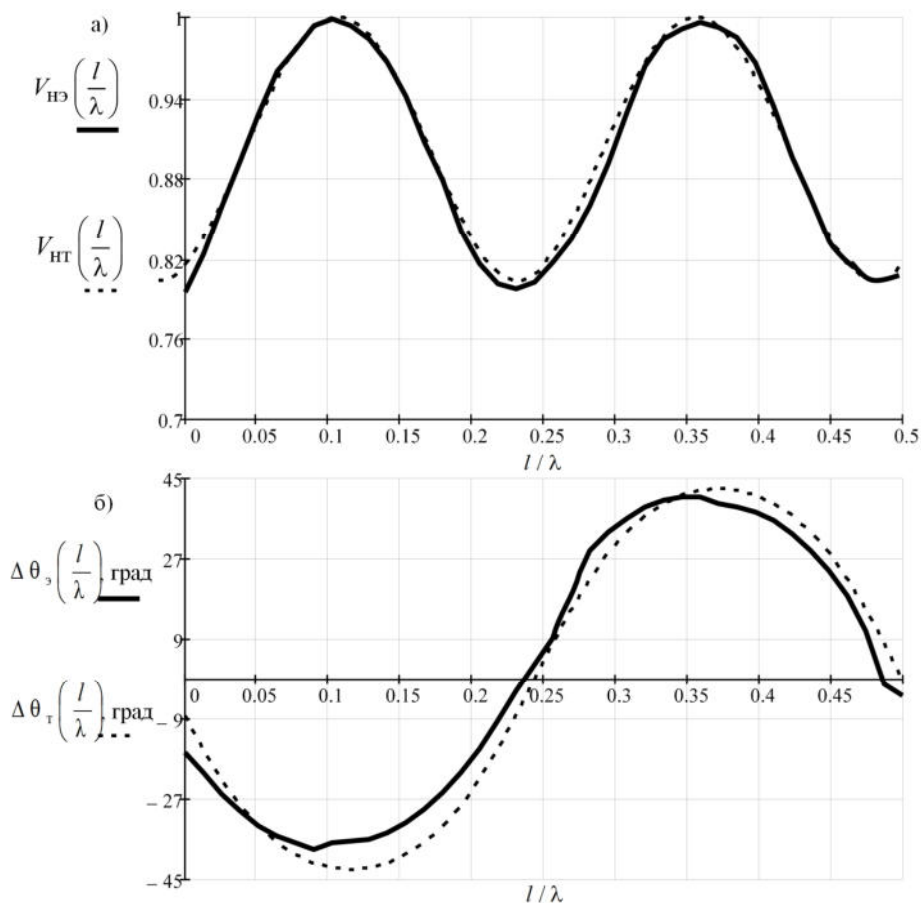


Рисунок 5 — Результаты двухзондового анализа при  $|\dot{\Gamma}| = 0,33$

Результаты измерения модуля  $|\dot{\Gamma}_n|$  и аргумента  $\varphi_n$  ККО образцовой нагрузки показаны в таблицах 3, 4.

Таблица 3 — Результаты двухзондового анализа (амплитудное распределение)

Параметры образцовой нагрузки	Измеренное значение $ \dot{\Gamma}_n $	Измеренное значение $\varphi_n$ , град.	Относительная погрешность $\delta \dot{\Gamma} $ , %	Абсолютная погрешность $\Delta\varphi$ , град.
$ \dot{\Gamma}  = 0,333$ $\varphi = 107,5^\circ$	0,326	105,3	2,1	2,2

Таблица 4 — Результаты двухзондового анализа (фазовое распределение)

Параметры образцовой нагрузки	Измеренное значение $ \dot{\Gamma}_n $	Измеренное значение $\varphi_n$ , град.	Относительная погрешность $\delta \dot{\Gamma} $ , %	Абсолютная погрешность $\Delta\varphi$ , град.
$ \dot{\Gamma}  = 0,333$ $\varphi = 107,5^\circ$	0,321	103,7	3,6	3,8

Представленные экспериментальные исследования с достаточной степенью точности соответствуют теоретическим результатам.

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы исследования.

В **приложениях** приведены результаты математического моделирования в программных пакетах, примеры решений уравнений итерационными методами, а также акты внедрения результатов диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлено теоретическое и практическое решение актуальной задачи создания измерительных микроволновых устройств на основе метода прямого преобразования частоты, ориентированных на применение в условиях встроенного контроля параметров СВЧ трактов радиотехнических систем и технологических процессов, которые обладают повышенной точностью, малыми габаритами и массой, а также низкой себестоимостью.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Проведен анализ методов измерения ККО и показано, что для целей встроенного и технологического контроля используют методы прямого детектирования. Показано, что эти методы обладают невысокой точностью измерений, поскольку применяемые для амплитудного детектирования СВЧ диоды имеют малый динамический диапазон квадратичного детектирования (порядка 30...40 дБ). Это приводит к существенной погрешности измерений, а также невозможности проведения измерений при изменении мощности СВЧ-генератора в широких пределах. Кроме того, применение амплитудного детектирования ограничивает возможности решения измерительной задачи на основе анализа только амплитудного распределения поля в линии передачи.

2. Предложен новый способ измерения ККО, основанный на прямом преобразовании частоты путем квадратурного синхронного детектирования ответвляемых из первичной линии передачи сигналов (квадратурный способ измерения). Способ обеспечивает расширение динамического диапазона изменения уровня мощности в тракте не менее чем на 30 дБ по отношению к известному способу, основанному на квадратичном амплитудном детектировании. Способ защищен патентом РФ.

3. Разработаны математические модели квадратурного способа измерения при однозондовом и двухзондовом анализе и получены аналитические соотношения, связывающие измеряемые параметры микроволнового двухполюсника с сигналами на выходах квадратурного детектора и блока квадратурной обработки информации, а также соотношения для расчета измеряемых параметров на основе анализа как амплитудного, так и фазового распределений электромагнитной волны в линии передачи.

4. Разработаны новые измерительные устройства для определения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения, которые обеспечивают методическую погрешность измерения модуля и аргумента ККО не превышающую 0,54% и 0,2° при фазовом анализе и 0,01% и 0,15° при амплитудном анализе, а также до-



полнительное повышение точности измерения из-за усреднения оценок за счет избыточности (получен патент РФ на полезную модель).

5. Проведен анализ методической погрешности квадратурного способа измерения и показано, что при применении современного квадратурного детектора в интегральном исполнении (при  $|\dot{\Gamma}| = 0,33$ ) методическая погрешность измерения модуля и аргумента ККО при фазовом анализе не превышают 0,54% и  $0,2^{\circ}$ , а при амплитудном анализе — 0,01% и  $0,15^{\circ}$  соответственно.

6. Проведено исследование влияния зонда на фазовое распределение электромагнитной волны в линии передачи и оценены погрешности измерения модуля и аргумента ККО, вызываемые этим фактором. В результате показано, что погрешности, которые вызываются влиянием зонда на структуру фазового распределения электромагнитной волны в линии передачи, для практически важных случаев не превышают 0,5 % по модулю и  $2^{\circ}$  по аргументу.

7. Предложены функциональные схемы и разработаны математические модели автоматических измерительных устройств на основе дискретного анализа амплитудно-фазового распределения поля в микроволновом тракте с помощью четырехзондовой измерительной линии для случая наличия опорного канала и для случая применения двух квадратурных детекторов с инвариантными входами.

8. Разработан спектрометрический алгоритм обработки результатов в автоматическом измерителе с опорным каналом, основанный на применении дискретного преобразования Фурье к сформированной особым образом дискретной последовательности, состоящей из отсчетов амплитудного распределения электромагнитного поля в линии передачи, получаемого в результате квадратурной обработки. Алгоритм основан на определении искоемых параметров с использованием первой и четвертой гармоник спектра и обеспечивает повышение помехозащищенности измерительного канала и повышение точности за счет коррекции мультипликативной погрешности.

9. Осуществлен синтез узкополосных полосно-пропускающих рекурсивных фильтров второго порядка, предназначенных для выделения первой и четвертой гармоник дискретного сигнала, в результате которого определены весовые коэффициенты, рассчитаны характеристики этих фильтров, а также проведено моделирование переходных процессов, позволившее оценить время установления выходных сигналов. Показано, что применение узкополосного фильтра для реализации спектрометрического алгоритма обработки обеспечивает уменьшение СКО выходного шума не менее, чем в 4 раза.

10. Разработан алгоритм обработки результатов дискретного фазового анализа в автоматическом измерителе с опорным каналом и получены аналитические соотношения, позволяющие определить модуль и аргумент ККО по дискретным отсчетам фазового распределения поля в линии передачи.

11. Разработан алгоритм аналитического решения системы измерительных уравнений для автоматического устройства с двумя квадратурными детекторами и получены соотношения, позволяющие определить модуль и аргумент ККО и уровень падающей мощности в тракте по результатам квадратурного детектирования при отсутствии или незначительной величине (менее 1%) невязок.

12. Разработан алгоритм численного решения системы измерительных уравнений, связывающих результаты квадратурного детектирования с измеряемыми параметрами, позволяющий определить модуль и аргумент ККО, а также уровень падающей мощности в СВЧ тракте при наличии существенных невязок. Алгоритм обеспечивает минимизацию среднеквадратической ошибки и работоспособен при задании нулевых начальных приближений для неизвестных.

13. Разработаны и изготовлены макетные образцы двух измерительных установок, в которых реализованы однозондовый и двухзондовый анализ амплитудного и фазового распределений электромагнитной волны в линии передачи.

14. Проведены экспериментальные исследования амплитудного и фазового распределений поля в рассогласованной линии передачи, полностью подтвердившие теоретические результаты, полученные на основе разработанной математической модели квадратурного способа измерения. Осуществлены множественные измерения параметров образцовых нагрузок и определены погрешности измерения (не более 4% по модулю и не более  $3^0$  по аргументу), подтвердившие возможность создания на основе предложенного квадратурного способа измерительных устройств микроволнового встроенного контроля и диагностики, обладающих высокой точностью измерений при малых габаритах, массе и себестоимости.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК

1. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Спектрометрический метод измерения комплексного коэффициента отражения микроволновых узлов // Вестник СевНТУ Серия: Информатика, электроника, связь. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014 — Вып. 149. — С. 44-48. (Вклад соискателя 80%).

2. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Квадратурный метод измерения комплексных параметров СВЧ-двухполюсников // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. — № 1. — С. 29-38. (Вклад соискателя 70%).

3. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Исследование измерителя параметров узлов СВЧ-тракта на основе квадратурного демодулятора с инвариантными входами // Телекоммуникации. 2019. — № 8. — С. 2-12. (Вклад соискателя 80%).

4. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Автоматизация процедуры определения комплексных параметров микроволновых устройств на основе квадратурного способа измерения // Журнал радиоэлектроники. 2019. — №8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/index.html>. (Вклад соискателя 70%).

5. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Моделирование погрешности квадратурного измерителя параметров СВЧ трактов радиоэлектронных систем // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 39 — С. 117-124 (Вклад соискателя 70%).

### Публикации, индексируемые в Scopus

6. Gimpilevich Yu.B., **Zebek S.E.** The mathematical Model of a Complex Reflection Coefficient Measuring Instrument based on a Method of direct Frequency Conversion // Proceedings of the 24th IEEE International Conference «Microwave & Telecommunication Technology». — Sevastopol, September 7—13, 2014. — Vol. 2. — P. 882-883. (Вклад соискателя 80%).

### Патенты

7. Патент 189436 Российская Федерация, МПК G01R 26/06. Устройство для измерения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения микроволнового двухполюсника / Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Заявитель и патентообладатель Севастопольский государственный университет. — № 2018128676; заявл. 03.08.2018; опубл. 22.05.19. Бюл. № 15. — 18 с. (Вклад соискателя 70%).

8. Патент 2683804 Российская Федерация, МПК G01R 27/28. Способ определения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения микроволнового двухполюсника / Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Заявитель и патентообладатель Севастопольский государственный университет. — № 2018108378; заявл. 06.03.2018; опубл. 02.04.19. Бюл. № 10. — 18 с. (Вклад соискателя 80%).

## Статьи в сборниках трудов научно-технических конференций

9. **Зебек С.Е.** Применение дискретного преобразования Фурье в задаче измерения комплексного коэффициента отражения // Материалы 8-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». Севастополь, 23 — 27 апреля 2012 г. — С. 296. (Вклад соискателя 80%).

10. **Зебек С.Е.** Повышение стабильности приборов встроенного контроля параметров микроволновых трактов // Материалы XVI Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Харьков, 17 — 19 апреля 2012 г. — С. 73. (Вклад соискателя 80%).

11. **Зебек С.Е., Гимпилевич Ю.Б.** Цифровой алгоритм определения комплексного коэффициента отражения и уровня мощности в микроволновом тракте // Материалы 6-ой Международной конференции «Проблемы телекоммуникаций». Киев, 24 — 27 апреля 2012 г. — С. 188. (Вклад соискателя 80%).

12. **Зебек С.Е.** Синтез цифрового фильтра для реализации спектрометрического алгоритма определения комплексного коэффициента отражения // Материалы XVII международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Харьков, 22— 24 апреля 2013 г. — С. 56. (Вклад соискателя 80%)

13. **Зебек С.Е.** Узкополосная коррекция мультипликативной погрешности цифрового алгоритма определения комплексного коэффициента отражения // Материалы 9-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». Севастополь, 22 — 26 апреля 2013 г. — С. 274. (Вклад соискателя 80%).

14. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Синтез цифровых резонаторов для задачи измерения комплексного коэффициента отражения и моделирование переходного процесса в них // Материалы 7-ой Международной конференции «Проблемы телекоммуникаций». Киев, 16 — 19 апреля 2013 г. — С. 197-199. (Вклад соискателя 90%).

15. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Микроволновый измерительный преобразователь на основе метода прямого преобразования частоты // Материалы 8-ой Международной конференции «Проблемы телекоммуникаций». Киев, 22 — 25 апреля, 2014 г. — С. 292. (Вклад соискателя 80%).

16. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е., Овчаров П.П.** Экспериментальное исследование амплитудно-фазового распределения поля в линии передачи с использованием квадратурной обработки // Материалы 25-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 6 — 12 сентября, 2015 г. — С. 857-859. (Вклад соискателя 90%).

17. **Зебек С.Е.** Спектрометрический алгоритм обработки информации в СВЧ измерителях прямого преобразования частоты // Материалы 11-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». Севастополь, 16 — 20 ноября 2015 г. — С. 131. (Вклад соискателя 90%).

18. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е., Таран С.Н.** Оценка систематической погрешности квадратурного метода измерения амплитудного и фазового распределений поля в СВЧ тракте // Материалы 12-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». Севастополь, 14 — 18 ноября 2016 г. — С. 116. (Вклад соискателя 70%).

19. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.**, Овчаров П.П., Таран С.Н. Двухзондовый метод измерения полного сопротивления на СВЧ с использованием квадратурной обработки // Материалы 26-ой Международной конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 4 — 10 сентября 2016 г. — С. 1913. (Вклад соискателя 70%).

20. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Квадратурный СВЧ демодулятор с инвариантными входами // Материалы 13-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». Севастополь, 23 — 27 октября 2017 г. — С. 177. (Вклад соискателя 80%).

21. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Математическая модель квадратурного метода измерения коэффициента отражения на основе демодулятора с симметричными входами // Материалы 27-ой Международной конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 10 — 16 сентября, 2017 г. — С. 1281-1287. (Вклад соискателя 80%).

22. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Автоматизация квадратурного метода измерения комплексных параметров микроволновых узлов // Материалы 28-ой Международной конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 9 — 15 сентября, 2018 г. — С. 1286-1292. (Вклад соискателя 75%).

23. Гимпилевич Ю.Б., **Зебек С.Е.** Автоматический измеритель комплексного коэффициента отражения на основе квадратурного метода // Материалы 14-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». Севастополь, 22 — 26 октября 2018 г. — С. 165. (Вклад соискателя 80%).

24. Gimpilevich Yu.B., **Zebek S.E.** Estimation of the microwave load parameters' measurement error, caused by imperfection of the probe, used for study of the electromagnetic wave's phase distribution in the transmission line // ITM Web of Conferences. 2019. — Vol. 30. 11005. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.itmconferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf\\_crimico2019\\_11005.pdf](https://www.itmconferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_11005.pdf). (Вклад соискателя 70%).