

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи

ИГНАТКОВ Кирилл Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНЫХ АВТОДИННЫХ
МОДУЛЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Носков Владислав Яковлевич

Екатеринбург – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	16
1.1. Конструктивные особенности гибридно-интегральных автодинных модулей СВЧ и КВЧ диапазонов на твердотельных активных элементах	16
1.2. Автодины с одноконтурной колебательной системой	24
1.3. Автодины с двухконтурной колебательной системой	28
1.4 Выводы.....	29
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОДИНОВ С ОДНОКОНТУРНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ. ОСНОВНЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	31
2.1. Эквивалентная схема и основные уравнения для анализа автодинных генераторов.....	31
2.2. Анализ устойчивости автодинных генераторов.....	38
2.3. Основные параметры автодинов	39
2.4. Автодинные характеристики СВЧ и КВЧ генераторов.....	43
2.5. Особенности амплитудно-частотных характеристик автодинов	49
2.7. Выводы.....	55
ГЛАВА 3. ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОДИНОВ	57
3.1. Основные уравнения для анализа шумовых параметров и характеристик автодинных генераторов	57
3.2. Шумовые параметры автономных генераторов.....	59
3.3. Автодинные и шумовые характеристики	61
3.4. Динамический диапазон автодинов	66
3.5. Выводы.....	68
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОДИНОВ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ВНЕШНИМ ВЫСОКОДОБРОТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ.....	70
4.1. Основные выражения для анализа стабилизированных по частоте автодинов.....	70
4.2. Автодинные параметры и характеристики при точной настройке резонатора	77
4.3. Влияние расстройки резонатора на автодинные параметры и характеристики	82
4.4. Анализ «нелинейности по амплитуде» автодинных характеристик.....	85
4.5. Шумовые параметры стабилизированных генераторов.....	87
4.6. Автодинные и шумовые характеристики	90

4.7. Динамический диапазон.....	92
4.8. Выводы.....	93
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОДИННЫХ МОДУЛЕЙ	96
5.1. Экспериментальный стенд и оборудование	96
5.2. Исследование параметров и характеристик обычных автодинов	99
5.3. Сравнение характеристик обычных и стабилизированных автодинов	103
5.4. Влияние расстройки резонатора на автодинные параметры и характеристики	107
5.5. Особенности сигналов стабилизированных автодинов с учётом нелинейности по амплитуде	108
5.6. Шумовые характеристики автономных генераторов	109
5.7. Шумовые характеристики автодинов	111
5.8. Выводы.....	114
ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ	116
6.1. Определение внутренних параметров и характеристик СВЧ и КВЧ генераторов	116
6.2. Эффективность применения стабилизированных по частоте автодинов.....	120
6.3. Автодинный измеритель параметров движения вагонов на сортировочной горке	122
6.4. Применение автодинов в радиоволновых датчиках вибраций.....	127
6.5. Автодинный приёмо-ответчик для аэрологических радиозондов	133
6.6. Выводы.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
Рекомендации по итогам диссертационного исследования.....	143
ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	146
СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	147
ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Автодины являются простейшими приёмо-передающими устройствами, функционально представляющими собой лишь совокупность автогенератора и средств выделения автодинного отклика. Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте, состоящем в изменениях параметров колебаний генератора под воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения или информационного излучения от стороннего источника. Автогенератор в этих устройствах выполняет одновременно функции радиопередающего устройства и приёмника. Простота конструкции автодинов обеспечивают низкую стоимость, малые габариты и массу приёмо-передающих модулей.

Отмеченные качества автодинов являются привлекательными для их применения во многих областях человеческой деятельности. Поэтому за более чем столетнюю историю становления и развития теории и техники автодинов к ним наблюдается устойчивый интерес большого числа исследователей. Количество публикаций, посвящённых изучению автодинного эффекта в различных генераторах и применению автодинов в решении прикладных задач, неуклонно растёт. В последние десятилетия вышло в свет большое число монографий и учебных пособий [1 – 6].

Первым исследовал «автодинный метод приёма» и описал работу этого устройства в своей заявке на изобретение инженер английской компании «Marconi's Wireless Telegraphy» Генри Раунд (Henry Joseph Round) в 1913 г. Следующим наиболее значительным этапом развития автодинов явилось их использование в качестве датчика близости цели для неконтактных взрывателей боеприпасов в годы Второй мировой войны. Данное применение автодинов явилось мощным толчком к развитию целых направлений в электронной технике, освоению новых передовых технологий в приборостроении и военной техники, теоретической базы автодинов, а также проложило путь к миниатюризации, которая вошла в электронную промышленность и создала предпосылки для нынешней эры интегральных схем.

Возможности использования автодинов в продукции как военного (например, в радиовзрывателях), так и гражданского, в том числе в медицине и на транспорте, открывает перспективы массового производства автодинных приёмо-передающих модулей. За прошедшие десятилетия автодинная тематика сложилась в самостоятельное динамично развивающееся научное направление, которое во всех промышленно развитых странах постоянно поддерживается на высоком уровне. В последние десятилетия появился интерес к автодинной

тематике также в странах бывшего «третьего мира», таких как: Бразилия, Индия, Южная Корея и Иран.

Среди отечественных учёных основоположниками данного научного направления являются Е.К. Алахов, Л.И. Берштейн, Е.К. Завойский, С.И. Зилитинкевич, И.М. Коган, О.В. Лосев и А.Ф. Терещенко. Значительный вклад в развитие данной тематики в нашей стране внесли научные коллективы под руководством Е.М. Гершензона, В.М. Богачёва, В.В. Болознева, В.Я. Носкова, С.М. Смольского, Б.Н. Туманова, Д.А. Усанова, Ю.Л. Хотунцева, Б.И. Шахтарина и других. Наиболее известными учёными ближнего зарубежья являются: Ю.Е. Гордиенко, Г.П. Ермак и К.А. Лукин (Украина) [7].

Научная проблема, решению ряда задач которой посвящена настоящая диссертационная работа, связана с проведением исследований автодинных приёмо-передающих устройств миллиметрового (крайне высокочастотного – КВЧ, от 30 до 300 ГГц) диапазона. Данные устройства по сравнению с автодинами диапазона СВЧ (от 3 до 30 ГГц), имеют качественные отличия в своём функционировании, а также в подходах к их анализу.

Первые же результаты исследований автодинов КВЧ диапазона, полученные на рубеже 70 – 80-х годов прошлого века, обнаружили новое явление в виде ангармонических искажений сигналов, которое не вписывалось в существовавшие в то время теоретические представления [8, 9]. Поэтому данное явление вызвало оживлённую дискуссию в научном сообществе, результаты которой выявили потребность в разработке новой теории автодинов, учитывающей специфику их работы в КВЧ диапазоне [10]. В настоящее время работа над этой теорией ещё не завершена.

В связи с этим актуальность решения указанной проблемы обусловлена потребностями дальнейшего развития и обобщения теории работы автодинных приёмо-передатчиков КВЧ диапазона. Данная теория необходима для анализа и расчёта параметров и характеристик этих устройств, включая методику инженерных расчётов с нахождением режимов наилучшей работы, поиска оптимальных режимов работы и новых схемотехнических решений, а также правильного их использования в перспективных системах радиолокации, дистанционного зондирования атмосферы, связи, метрологии и других. Решение этой проблемы находится в соответствии с общими тенденциями развития радиоэлектроники, направленными на освоение КВЧ и более высокочастотных диапазонов, а также миниатюризацию компонентов и устройств [11, 12].

В русле указанных тенденций к настоящему времени зарубежными фирмами создана широкая номенклатура радиокомпонентов СВЧ и КВЧ диапазонов для систем связи и радиолокации, среди которой значительную долю составляют генераторные и генераторно-

излучающие (автодинные) модули, в том числе, в виде готовых микросхем для поверхностного монтажа. Схемные и конструкторские решения этих модулей защищены большим числом патентов в наиболее развитых странах мира: Японии, ЕС, США и Китае.

В нашей стране в соответствие с планами конверсии производства СВЧ техники на рубеже 80-90-х годов прошлого века в НИИПП (г. Томск) были созданы первые образцы гибридных интегральных схем (ГИС) автодинных модулей 5-мм диапазона типа «Тигель-05» [13]. Данные модули благодаря созданию нового типа активного элемента [14], выполненного на базе мезапланарных ганновских структур, и развитию физико-технологических основ их производства по своим параметрам и характеристикам в те годы не уступали лучшим зарубежным образцам. В последующие годы эти модули, несмотря на объективные трудности девяностых годов, были усовершенствованы, появлялись новые типы и их разновидности («Тигель-08», «Тигель-08М»), расширился частотный диапазон работы [15, 16]. Несомненная заслуга в создании этих модулей, проведении комплекса исследований и поиске их практического использования в различных областях науки и техники принадлежит С.Д. Воторопину [17].

За прошедшие годы выполнен большой объём исследований различных автодинных генераторов КВЧ диапазона, в том числе в гибридно-интегральном исполнении. В публикациях, посвящённых автодинам, рассмотрены особенности формирования сигнальных характеристик в различных режимах работы этих устройств, исследованы условия регистрации автодинного отклика в цепи питания генератора, а также при использовании внешнего детектирования [18, 19]. Изучены особенности работы автодинов в режимах с амплитудной [20], частотной [21], радиоимпульсной и комбинированными видами модуляции [22] излучения. Выполненные исследования позволили создать большое число различных микроволновых датчиков, измерителей параметров технологических процессов и устройств контроля качества материалов, систем ближней радиолокации (СБРЛ) для транспорта, промышленности и научных исследований [23 – 27].

Однако, несмотря на большой объём выполненных исследований, основные параметры и характеристики автодинов до настоящего времени с общих позиций влияния на них внутренних параметров генераторов изучены недостаточно. При этом сами параметры генераторов, которые необходимы для адекватного описания поведения автодинов в диапазоне КВЧ, до настоящего времени полностью не определены. Большое практическое значение при решении задачи применения автодинов в СБРЛ имеют также результаты исследований формы автодинного отклика и разности фаз между сигналами, шумовых параметров и характеристик, а также условий устойчивости автодинов в зависимости от внутренних параметров используемых

генераторов, режима работы и множество других. Кроме того, в плане поиска технических решений для дальнейшего улучшения параметров и расширения области применения автодинов представляется перспективным исследование стабилизированных по частоте КВЧ генераторов посредством внешнего высокочастотного резонатора.

Таким образом, тема диссертации, посвящённая исследованиям указанных выше аспектов функционирования автодинных гибридно-интегральных модулей КВЧ диапазона, находится в русле общих тенденций развития теории и техники автодинов и является актуальной. Результаты этих исследований представляют научный и практический интерес и являются востребованными при создании новых типов автодинных ГИС и модулей, а также их использовании в перспективных системах ближней радиолокации, связи, метрологии и радиозондирования атмосферы.

Цель работы и задачи исследования

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы: выполнить теоретические и экспериментальные исследования сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик обычных и стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором автодинных модулей, изготовленных с применением гибридно-интегральной технологии на основе мезопланарных диодов Ганна КВЧ диапазона, необходимых для выработки рекомендаций по созданию перспективных автодинных модулей и методики их расчёта, а также найти применение полученным результатам исследований в системах радиолокации, связи, метрологии и зондирования атмосферы.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

Выполнить анализ современного состояния теории и техники автодинных систем, обобщить полученные данные и накопленный опыт предшествующих исследований с целью выбора наиболее адекватного описания физических процессов в исследуемых генераторах.

Разработать математическую модель одноконтурных КВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения и источника внутренних шумов малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний и выполнить теоретический анализ сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик.

На основе разработанной модели автодинного генератора со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором выполнить анализ особенностей сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик этих генераторов.

С целью проверки основных выводов теоретического анализа выполнить сравнительные экспериментальные исследования обычных и стабилизированных по частоте автодинных

модулей.

Прикладной задачей диссертации являются разработка, создание и испытание автодинных датчиков для контроля параметров движения отражающих объектов, использующих результаты диссертационных исследований, и выработка основных рекомендаций по созданию перспективных автодинных модулей КВЧ диапазона и их использованию в различных системах ближней радиолокации, связи и радиозондирования атмосферы.

Основные методы исследований

Для формирования математической модели автодина использован метод эквивалентных схем. Для решения полученных нелинейных уравнений для мгновенных значений токов и напряжений использованы методы, известные в теории нелинейных колебаний как медленно меняющихся амплитуд, усреднения, квазилинейный, метод бифуркаций. Исследование устойчивости автодинного генератора, находящегося под воздействием собственного отражённого излучения, выполнено с применением метода Ляпунова. При анализе автодинов в условиях слабого воздействия на генератор отражённого излучения и шумов использованы методы возмущений, состоящие в линеаризации нелинейных характеристик системы в окрестности стационарного режима. При анализе флуктуационных характеристик использованы методы статистической радиотехники. Решение сложных систем уравнений находилось численными методами с использованием компьютерного математического пакета Mathcad. При проведении экспериментальных исследований использовались методы лабораторного и натурного эксперимента, полунатурного моделирования, простейшие методы аналоговой и цифровой обработки сигналов, с привлечением компьютерной обработки сигналов с помощью виртуальных приборов, создаваемых в среде программирования LabVIEW.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Автодинный генератор, находящийся под воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения, по отношению к изменениям режима стационарных колебаний может быть представлен в виде системы с внутренней и внешней обратной связью, в которой внешняя обратная связь обусловлена запаздывающим воздействием отражённого излучения, а внутренняя обратная связь – неизодромностью и неизохронностью генератора.

1.1. Необходимым условием устойчивости автодинной системы, кроме известного требования к знаку прочности предельного цикла генератора (он должен быть положительным), являются требования к величинам параметров внешней и внутренней обратной связи: они

должны быть не более единицы.

1.2. Основные параметры автодинной системы, такие как коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования, зависят не только от прочности предельного цикла, добротности колебательной системы и коэффициента амплитудного детектирования соответственно, но и параметров внутренней обратной связи автодина, которые в случае положительного значения коэффициента обратной связи имеют дополнительное (регенеративное) усиление.

1.3. Степень ангармонических искажений сигнальных характеристик автодина зависит не только от величины параметра внешней обратной связи (с увеличением этого параметра они растут), но и от внутренних параметров генератора, которые оказывают влияние также на относительное фазовое смещение этих характеристик.

2. В случае сильной обратной связи, когда величина параметра внешней обратной связи соизмерима с единицей, в автодине за счёт мультипликативного преобразования частотного шума генератора наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения нестационарность уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающей поверхности. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю слабой обратной связи могут заметно снижаться, а в других – значительно расти, причём увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики автодина, а его уменьшению – более пологие.

2.1. Среднее значение уровня шума за период автодинного сигнала во всех случаях, как слабой, так и сильной обратной связи, сохраняется практически неизменным и равным уровню шумов автономного генератора.

3. Стабилизация частоты автодинного генератора с помощью внешнего высокодобротного резонатора обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра автодинной СБРЛ, как динамический диапазон. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ.

3.1. Ангармонические искажения сигналов стабилизированного автодина, которые наблюдаются при увеличении уровня отражённого излучения, в отличие от обычных (нестабилизированных) автодинов, обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы в окрестности собственной частоты стабилизирующего резонатора.

4. При проведении вибрационных измерений с помощью автодинных датчиков в условиях

сильной обратной связи из-за наличия ангармонических искажений сигнальных характеристик необходимо учитывать не только значительные отличия величины чувствительности датчика к перемещениям и ширины динамического диапазона его работы в различных рабочих точках, но и отличия уровня шума в них.

Достоверность защищаемых положений и результатов

Достоверность защищаемых положений и результатов диссертации обеспечивается качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математических моделей, использованием стандартной измерительной аппаратуры и подтверждается успешным практическим использованием в реализованных устройствах и системах. Полученные результаты теоретического анализа проверялись на сходимость с результатами предшествующих исследований. Точность экспериментальных результатов обеспечивается использованием стандартной контрольно-измерительной аппаратуры и методов измерений. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, а также публикациями в рецензируемых журналах.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

1. При анализе математической модели автодинного генератора показано, что одновременный учёт неизохронности и неизодромности генератора эквивалентен наличию в автодинной системе *внутренней обратной связи* [28 – 31]. В связи с этим запаздывающая на время распространения излучения до отражающего объекта и назад в генератор обратная связь в автодинной системе названа *внешней* [31].

Учёт внутренней обратной связи в модели автодина позволил установить дополнительное условие (внутренней) устойчивости автодинной системы [29, 32, 33], показать влияние этой обратной связи на основные параметры (коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования) [29, 30, 33] и на особенности формирования автодинных характеристик [29, 33, 34].

Выполнено исследование особенностей формы АЧХ и ХАЧ, а также поведения изображающей точки на этих характеристиках в зависимости от внутренних параметров генератора и параметров внешней обратной связи автодинной системы [30]. Показана возможность инженерного расчета внутренних параметров автодинов на основе

аппроксимационных характеристик активного элемента [35].

2. Разработана математическая модель автодинной системы, учитывающая одновременное воздействие на генератор отражённого от объекта излучения и собственных шумов [31, 33, 36, 37]. Предложен метод анализа, позволивший установить основные закономерности формирования автодинных и шумовых характеристик при различных условиях, объяснить экспериментально наблюдающуюся периодическую нестационарность уровня шумов и рассчитать динамический диапазон автодинной системы [31, 33, 36, 37].

3. На основе полученных соотношений для анализа автодинного эффекта в генераторе, стабилизированном внешним высокочастотным резонатором, проведено рассмотрение широкого круга вопросов, связанных с особенностями формирования автодинных и шумовых характеристик, которые позволили определить возможности и перспективы дальнейшего развития теории и практики автодинов КВЧ диапазона в данном направлении [33, 38 – 45].

4. Выполненные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинов позволили найти решения ряда прикладных задач с применением автодинных модулей КВЧ диапазона. К ним относятся:

- автодинный измеритель скорости скатывания вагонов на сортировочной горке [46, 47];
- автодинный радиолокатор для измерения скорости и направления перемещения вагонов на парковых путях сортировочной станции [48];
- применение автодинного генератора в качестве бортового приёмо-ответчика для аэрологических радиозондов [49 – 51];
- исследование нелинейных искажений сигналов и шумовых характеристик автодинных датчиков вибраций [36, 52, 53];
- исследование вопросов эффективности и особенностей применения двухконтурных и стабилизированных по частоте автодинов в СБРЛ [54 – 56].

Научная ценность защищаемых положений и результатов диссертации

Научная ценность работы состоит в том, что в ней в рамках единого методологического подхода к решению задачи анализа автодинных генераторов КВЧ диапазона разработана теория их функционирования, которая обеспечивает возможность учитывать различные параметры и характеристики активных элементов и колебательной системы генераторов, а также произвольное время запаздывания отражённого излучения.

Выполненные на базе разработанной теории исследования параметров и характеристик обычных (нестабилизованных) автодинных модулей обобщают и развивают результаты предшествующих исследований автодинов с одноконтурной колебательной системой.

Результаты исследований автодинных генераторов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором являются полностью оригинальными и существенно развивают и дополняют теорию автодинных систем. Результаты этих исследований для случая отсутствия воздействия отражённого излучения полностью согласуются с известными в литературе данными, полученными для стабилизированных автономных генераторов.

Разработанная теория работы как обычных, так и стабилизированных автодинов обеспечивает возможность создания систем и устройств на их основе с улучшенными параметрами и характеристиками, а также с более широкими функциональными возможностями, что является вкладом в прикладных областях науки и техники.

Практическая значимость работы

1. Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют, исходя из заданных параметров используемых генераторов, рассчитать сигнальные и шумовые параметры и характеристики автодинов, необходимые для их правильного использования в перспективных автодинных системах радиолокации, связи, зондирования атмосферы и других. Решение обратной задачи по определению эквивалентных параметров автодинного генератора с помощью экспериментально полученных автодинных характеристик также представляет практический интерес для контроля качества выпускаемых промышленностью модулей и исследования свойств активных элементов.

2. Применение в предлагаемых для производства новых типах автодинных модулей стабилизации частоты с помощью внешнего высокочастотного резонатора значительно уменьшает девиацию частоты генерации под воздействием отражённого излучения, а также её нестабильность в диапазоне температур. Данные модули при их использовании в автодинных системах обладают по отношению к нестабилизированным генераторам улучшенными техническими характеристиками по такому важному показателю, как динамический диапазон, на 20-30 дБ. Некоторое увеличение энергетического потенциала (2-5 дБ), отсутствие периодической нестационарности шумов, а также (за счёт улучшения температурной стабильности частоты) повышение точности измерения скорости объектов локации, являются дополнительными преимуществами этих модулей. Указанные достоинства стабилизированных модулей способствуют повышению спроса на них и расширению базы потребителей.

3. Разработан измерительный стенд на современной элементной базе с компьютерной обработкой и представлением информации, позволяющий регистрировать особенности формы и спектра автодинных откликов на воздействие излучения, отражённого от равномерно движущегося, а также от вибрирующего объекта. Данный стенд обеспечивает более высокую

информативность, точность и оперативность получения результатов экспериментальных исследований.

4. Разработанные образцы автодинных радиолокаторов для определения параметров движения вагонов на сортировочной станции за счёт применения автодинного приёмопередающего модуля обеспечивают более низкую себестоимость их изготовления по сравнению с радиолокатором с гомодинным построением приёмопередатчика.

5. Разработаны методические рекомендации по выбору способа и режима регистрации, а также рабочей точки при использовании автодина в качестве датчика параметров вибраций. Учёт этих рекомендаций обеспечивает повышение точности и расширение динамического диапазона измерений. Реализуемый при этом выигрыш рассчитывается для конкретных условий измерений по полученным в диссертации формулам и использованием данных из представленных графиков.

Внедрение результатов диссертации и рекомендаций по их дальнейшему использованию

Результаты работы получены в ходе выполнения договора № 13.G25.31.0008 от 07 сентября 2010 г. «Создание и производство технических средств радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС с целью модернизации технологической базы аэрологической сети Росгидромета» и НИОКР № 57/03111 от «07» июля 2010 г. «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета», проводимых в рамках государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218; НИР «Исследование и экспериментальная проверка возможности применения сканирующих лазерных дальномеров для определения координат вагонов в парках станции («СКАЛА»)), 2.083, НИР по договору № 919 от 28 сентября 2012 года с ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»); НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между ОАО «Научно-исследовательским институтом полупроводниковых приборов» (ОАО «НИИПП», г. Томск) и Институтом радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ (ИРИТ-РТФ) УрФУ № 3302-34/02 от 06 ноября 2013 г.; а также в учебном процессе студентов на кафедре технологии и средств связи в качестве демонстрации работы автодинного радиолокатора КВЧ диапазона.

Большинство результатов диссертации, полученных в ходе выполнения указанных выше НИОКР и НИР в период 2010–2014гг., доведены до инженерных решений, использованных при разработке образцов автодинных датчиков, и практических рекомендаций по созданию более совершенных автодинных модулей в гибридно-интегральном исполнении, переданных в ОАО «НИИПП» в виде отчёта за первый этап (2013 г.) выполнения НИР (№ гос. регистрации 01201450593). Получено три акта и одна справка об использовании результатов диссертации.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, среди которых 7 статей в журналах, включённых в перечень ВАК, из них 2 статьи вышли в переводных журналах и учтены международной системой цитирования SCOPUS. 4 статьи вышли в прочих журналах, из них 3 – на английском языке. Материалы 17 докладов доложены на различных конференциях, из них 12 вошли в базу цитирования SCOPUS. Материалы работы отражены также в двух отчётах о НИР и НИОКР.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях: 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия-2010», г. Каменск-Уральский, 2010; 9-я Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2010», г. Москва, 2010; 17-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2011), г. Воронеж, 2011; Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ-2011», проводимой в рамках 8-го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО-2011», г. Екатеринбург, 2011; 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011), г. Севастополь, 2011; 10-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 2011; 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012), г. Севастополь, 2012; 11-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Екатеринбург, 2012; 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013), г. Севастополь, 2013; 4-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия-2013», г. Каменск-Уральский, 2013; 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014), г. Севастополь, 2014.

Личный вклад диссертанта

В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д.т.н., профессором В.Я. Носковым. Ряд докладов на конференциях представлены автором единолично, шесть докладов в соавторстве с сотрудниками научной группы. Основная часть работ опубликована в соавторстве с научным руководителем, а также с д.т.н., профессором С.М. Смольским (МЭИ, Москва). В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключение. Она изложена на 168 страницах, содержит 61 рисунок и 3 таблицы.

Глава 1. Аналитический обзор литературы. Постановка задачи исследований

В настоящей главе выполнен обзор основной литературы, посвящённой вопросам конструктивного исполнения и анализа автодинных генераторов СВЧ и КВЧ диапазонов, выполненных в гибридно-интегральном исполнении. В разделе 1.1 рассмотрены топологии и конструкции ряда автодинных модулей и типы применяемых активных элементов. В разделе 1.2 выполнен обзор результатов работ, посвящённых исследованиям автодинов, в которых резонансную систему можно представить простейшей одноконтурной колебательной системой. Раздел 1.3 посвящён анализу литературы, в которой рассмотрены автодины с двухконтурной колебательной системой и стабилизированные по частоте генераторы посредством дополнительного высокочастотного резонатора.

Основная задача главы – анализ современного состояния теории и техники автодинных систем миллиметрового диапазона, обобщение полученных данных и накопленного опыта с целью наиболее адекватного описания физических процессов в исследуемых генераторах.

1.1. Конструктивные особенности гибридно-интегральных автодинных модулей СВЧ и КВЧ диапазонов на твердотельных активных элементах

СВЧ и КВЧ генераторы в твердотельном исполнении активного элемента (на диодах Ганна, ЛПД, полевых и биполярных транзисторах), выполненные по интегральной или гибридно-интегральной технологии по сравнению с генераторами в объемном (волноводном) исполнении обладают рядом преимуществ по механической прочности, вибрационной стойкости, надежности, степени миниатюризации, технологичности изготовления и стоимости. Поэтому они находят широкое применение в различных системах радиосвязи и радиолокации, в том числе с автодинным принципом построения приёмо-передающего устройства.

Колебательная система СВЧ и КВЧ генераторов в интегральном исполнении в настоящее время выполняется, в основном, с применением микрополосковых, щелевых, копланарных линий передачи и их комбинации [57]. С переходом в коротковолновую область миллиметрового диапазона волн рядом преимуществ в реализации колебательных систем обладают диэлектрические линии передачи [58].

Применение микрополосковых линий в коротковолновой части КВЧ диапазона сдерживается излучением электромагнитных волн в окружающее пространство, что негативно влияет на характеристики генераторов. Анализ конструкций генераторных модулей КВЧ диапазона на микрополосковых линиях передачи выявил также технологические сложности,

связанные с чрезмерным уменьшением линейных размеров топологии модулей, создающие сложности при монтаже корпусных активных элементов.

Наименьшими ограничениями на геометрические размеры при приемлемых волновых сопротивлениях для создания резонансных систем генераторных гибридно-интегральных модулей КВЧ обладают щелевая и копланарная полосковые линии. Эти линии характеризуются наличием металлических проводников, на одной поверхности диэлектрической подложки и разделённых щелями, причём электромагнитная волна распространяется вдоль щелей. Потери в этих линиях ниже, чем в микрополосках, так как токи в щелевых и копланарных линиях сосредоточены по большей поверхности. Поэтому щелевые и копланарные полосковые линии являются наиболее предпочтительными для применения в интегральных схемах генераторов коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Интегральные генераторный модули СВЧ и КВЧ диапазонов, резонансная система которых выполнена на основе планарных микрополосковых, щелевых, копланарных и волноводно-щелевых линий передачи, состоят из диэлектрической подложки и активного элемента в виде кристалла или чипа, изготавливаемого отдельно [59]. На плате формируется пассивная часть схемы, состоящая из отрезков микрополосковых линий передач, выполняющих функции пассивных элементов: резонаторов, трансформаторов, выходных линий передач, ФНЧ цепи питания, контактные площадки и т.д.

Вывод СВЧ мощности в таких схемах может быть реализован различными способами. Одним из типовых способов вывода является применение перехода с микрополосковой линии на коаксиальный волновод. Далее, в зависимости от решаемой задачи, СВЧ мощность может быть передана на антенну. В этом случае реализуется принцип генераторно-излучающего модуля. Либо через отдельный волноводный переход может быть возбужден волновод другого типа, например, полый прямоугольный, круглый или диэлектрический волновод для связи с нагрузкой.

Согласно другому общепринятому методу полый волновод может быть возбужден напрямую отрезком микрополосковой линии, ориентированным нужным образом относительно структуры поля волны полого волновода. Такой метод возбуждения применяется при расположении гибридно-интегральной схемы внутри полого волновода. Гибридно-интегральная схема генератора может быть размещена, как в объеме волновода, в таком случае конструктивно он выполняется в виде волноводной вставки, так и на его задней коротко замыкающей стенке. Последний вариант возбуждения облегчает закрепление и извлечение гибридно-интегральной схемы из волновода. Примерами такого исполнения устройств являются генераторные модули, описанные в [60–62]. Гибридное исполнение генераторов

облегчает вариацию параметров генератора в процессе его настройки, что является важным для их автодинного применения. Для этого в конструкции модулей предусматриваются различные подстроечные механические элементы в виде винтов, с помощью которых устанавливаются требуемая частота генерации и связь с нагрузкой.

В конструкциях гибридно-интегральных генераторно-излучающих модулей часто используются микрополосковые планарные антенны, изготовленные единым технологическим циклом с генераторной частью. Данные антенны обычно располагают на лицевой стороне диэлектрической подложки. Диаграмма направленности этих антенн может быть скорректирована применением диэлектрической линзы, и/или применением массива из нескольких генераторных модулей, образующих единую активную фазированную антенную решётку (АФАР). Такое техническое решение особенно эффективно в плане миниатюризации и снижения стоимости СБРЛ КВЧ диапазона в целом. Следует отметить, что наибольшая степень интеграции антенны и генератора достигается в генераторно-излучающих модулях, в которых конструктивно вибраторы планарной антенны и резонаторы генератора полностью совмещены.

Применение планарных микрополосковых антенн в генераторно-излучающих модулях достаточно популярно в составе различных доплеровских радаров, датчиков вторжения охранных систем, в системах управления движением и безопасности на автомобильном и железнодорожном транспорте. Часто такие антенны применяются в модулях, выполненных в виде компактного чипа, встроенного в корпус интегральной микросхемы для поверхностного монтажа. Схемные решения предложенного в патенте [63] модуля предполагают его работоспособность в диапазоне от 20 ГГц до 100 ГГц.

Обзору современных достижений в области создания АФАР посвящена работа [64], выполненная группой учёных, руководимой известным профессором Т. Ито. Как отмечается во введении этой работы, начало активного развития данного направления приходится на конец 1990-х – начало 2000-х годов. АФАР наряду со своей основной функцией антенны одновременно сочетает в себе функции резонатора, фильтра, передатчика, а в случае её использования как автодинного устройства, также преобразователя частоты радиоприёмника. В этой работе отмечено также, что методика проектирования АФАР значительно отличается от методики проектирования отдельно антенны и генератора. В случае совмещения указанных функций в ходе проектирования необходим поиск компромиссных решений с точки зрения излучающей способности элемента как антенны и его показателей добротности и, следовательно, стабильности частоты как колебательной системы. В случае реализации автодинного принципа построения модулей АФАР поиск компромиссного решения ещё более усложняется вследствие необходимости оптимизации этого же элемента (генератора) как

приёмного устройства. Однако, не смотря на отмеченные сложности, такой подход дает преимущества в плане миниатюризации, снижения стоимости в сравнении с традиционным подходом к построению устройств.

Некоторый путь разрешения отмеченных компромиссов в реализации интегральных схем генераторных модулях лежит в использовании дополнительных стабилизирующих резонаторов. Данные резонаторы часто размещаются на той же подложке, что и остальные составные части колебательной системы генератора. Типы резонаторов, применяемых в гибридно-интегральных модулях различны, так традиционным является применение резонатора образованного отрезками микрополосковых линий. Известным недостатком такого типа резонаторов являются повышенные потери на излучение в окружающее пространство, особенно с увеличением частоты, что негативно отражается на характеристиках генераторов: снижается уровень выходной мощности, уменьшается добротность резонансной системы, как следствие, стабильность частоты генерации, возникают паразитные связи с другими элементами гибридно-интегральной схемы.

В работе [65] рассмотрены особые формы исполнения микрополосковых резонаторов, которые могут быть рекомендованы к применению в диапазоне миллиметровых длин волн. Основные из них, представляющие собой U-образную и круглую формы микрополосковых резонаторов, применены, например, в устройствах, описанных в [66, 67]. В той же работе [65] приведены экспериментальные данные сравнительных исследований резонаторов специальной формы с традиционным полуволновым резонатором. Результаты испытаний в сантиметровом диапазоне показали выигрыш по величине относительной нестабильности частоты при использовании резонаторов специальной формы более чем в 10 раз. Однако эффективность такого решения в генераторах КВЧ диапазона представляется не высокой.

Наибольшее распространение для целей стабилизации частоты в интегральных схемах СВЧ и КВЧ генераторов получили диэлектрические резонаторы. Достоинства этих резонаторов состоят в их высокой добротности (более 1000), конструктивной совместимости с микрополосковыми линиями и простоты изготовления. Такие резонаторы, как с точки зрения физических процессов, так и с точки зрения инженерного задач практической реализации, рассмотрены в работах [68–70]. По виду взаимной связи собственно генератора, резонатора и нагрузки конструкции микрополосковых СВЧ генераторов, использующих ДР, классифицируются на: 1) генераторы с полосно-отражающим резонатором в линии вывода мощности при использовании полезной нагрузки в качестве элемента резистивной связи; 2) генераторы с проходным резонатором при подключении полезной нагрузки к стабилизирующему контуру; 3) генераторы с отражающим резонатором в линии, нагруженной

на резистивную нагрузку, при подключении полезной нагрузки к рабочему (активному) резонатору генератора [71–73]. Основные технические решения стабилизированных микрополосковых СВЧ генераторов, которые представляют интерес при реализации автодинных модулей, подробно рассмотрены также в обзоре [74].

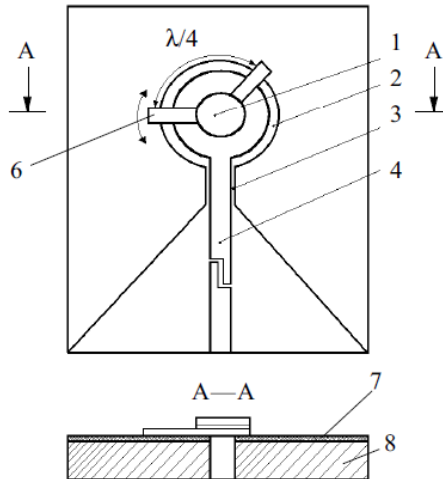


Рис. 1.1 Конструкция генераторного модуля на основе корпусных диодов Ганна: 1 – корпусной диод Ганна; 2 – кольцевой щелевой резонатор; 3 – трансформирующий отрезок на копланарной линии передачи; 4 – выходная линия передачи; 5 – конструктивная емкость для развязки по цепи питания; 6 – подвижный контактный лепесток; 7 – диэлектрическая подложка; 8 – основание.

Для реализации стабилизированных автодинных модулей длинноволновой части КВЧ диапазона на основе корпусных диодов Ганна, представляет интерес конструкция генератора, описанного в обзоре [59]. Колебательная система данного генератора изготавливается из отрезков копланарной линии передачи и содержит кольцевой щелевой резонатор (см. рисунок. 8). Подстройка генератора в режим максимального КПД, энергетического потенциала, максимальной выходной мощности и заданной частоты осуществляется угловым перемещением контактных лепестков. Данный вариант конструкции интересен обнаруженным экспериментально явлением автокомпенсации температурных изменений частоты, которое наблюдается при некотором смещении расстояния между лепестками относительно $\lambda/4$. Однако известные конструкции интегральных модулей на основе корпусных диодов Ганна имеют ограничение по минимальной рабочей длине волны обычно диапазоном 8 миллиметров. Попытка увеличения частоты генерации приводит к резкому уменьшению выходной мощности и КПД, а также энергетического потенциала автодина.

Для применения в гибридно-интегральных схемах генераторов КВЧ диапазона наиболее предпочтительны бескорпусные диоды Ганна, изготовленные в виде двухмезовых структур [59]. Одна из мез диода Ганна выполнена большого сечения. Плотность тока в ней недостаточна для возбуждения доменов сильного поля, поэтому она является пассивной. Вторая меза малого

сечения является активной и создаёт условия для возбуждения колебаний в генераторе. Отсутствие корпуса исключает в эквивалентной схеме диода такие паразитные элементы, как индуктивность выводов и емкость корпуса, которые являются основными факторами, ограничивающими ширину перекрытия частотного диапазона генерации обычных (корпусных) активных элементов диодных генераторов.

На основе одного и того же чипа диода Ганна разработаны и поставлены на производство в ОАО «НИИПП» (г. Томск) гибридно-интегральные модули автодинных генераторов серии «Тигель» (см. рис. 1.2) на 5-и и 8-и миллиметровые диапазоны [75]. Основой их конструкции являются «диодные вставки» в виде поликорковых пластинок, помещаемых между двух металлических пластин, образующих корпус генератора (см. рис. 1.2 *а*). В центре лицевой пластины предусмотрено отверстие круглой формы для выхода СВЧ излучения и винтом для регулировки связи генератора с нагрузкой. Задняя пластина – глухая с торцевым винтом для регулировки частоты генерации. Модули «Тигель-08» и «Тигель-08М» 8-мм диапазона выполнены в виде волноводного фланца $24 \times 24 \times 10$ мм³, рассчитаны для подключения к круглому волноводу диаметром 7 мм или к прямоугольному с сечением $7,2 \times 3,4$ мм². Модули «Тигель-05» 5-мм диапазона имеют размеры корпуса $15 \times 15 \times 6$ мм³, массу 3,2 г, подключаются к круглому волноводу диаметром 5 мм.

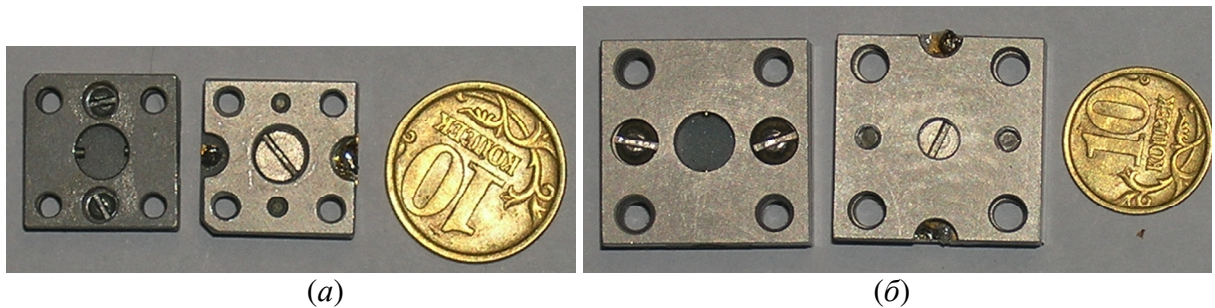


Рис. 1.2. Внешний вид автодинных модулей «Тигель-05» (*а*), «Тигель-08» и «Тигель-08М» (*б*)

К эксплуатационным достоинствам гибридно-интегральных модулей на основе бескорпусных диодов Ганна следует отнести устойчивость к механическим воздействиям: одиночных ударов 12500g (при предельном значении 21000g); линейного ускорения 4000g; акустического шума 150дБ. Кроме того, данные модули устойчивы к специальным воздействиям по гр. 2У ГОСТ В 20.39.404-81 при минимальной наработке на отказ 5000 ч. [59].

Резонансная система модулей выполнена в виде щелевых полуволновых резонаторов. На рис. 1.3 представлена топология диодной вставки модуля «Тигель-08М». Данный тип модуля является наиболее интересным для применения в автодинных СБРЛ, поскольку обладает более широкими функциональными возможностями. В топологии диодной вставки этого модуля предусмотрена установка в резонатор варикапа для перестройки частоты генерации или диода с

барьером Шоттки для регистрации автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний (показаны на рис. 1.3(б) цифрами «1» и «2» соответственно).

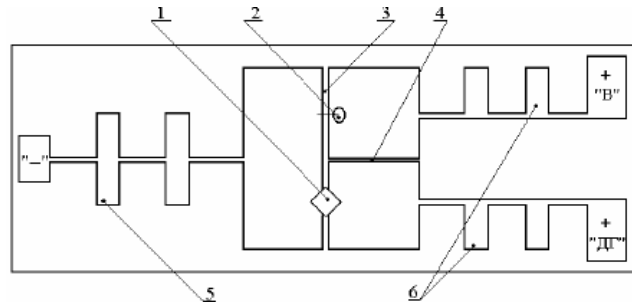


Рис. 1.3. Топология диодной вставки интегрального модуля «Тигель-08М»: 1 – диод Ганна; 2 – варикап или диод с барьером Шоттки; 3 – щелевой резонатор; 4 – изолятор по постоянному току; 5, 6 – цепи питания и смещения диодов

Недостатки автодинных модулей «Тигель-08» и «Тигель-08М» (см. рис. 1.4) – низкая нагруженная добротность колебательной системы и, соответственно, недостаточная стабильность частоты генерации, устранены некоторым усовершенствованием его конструкции, которая состоит в использовании дополнительного высокодобротного резонатора, связанного с основным рабочим резонатором через резистивную диафрагму [39]. Для этого к задней стенке модуля присоединён дополнительный высокодобротный резонатор (см. рис. 1.4,в). Стабилизирующий резонатор, изготовленный из суперинвара и работающий на волне H_{011} , имеет собственную добротность порядка $5 \cdot 10^3$. Связь между резонаторами выполнена через сквозную прорезь в задней стенке в виде отрезка волноводного канала, который завершается регулируемой резистивной вставкой из радиопоглощающего материала в виде клина (см. рис. 1.4,г).

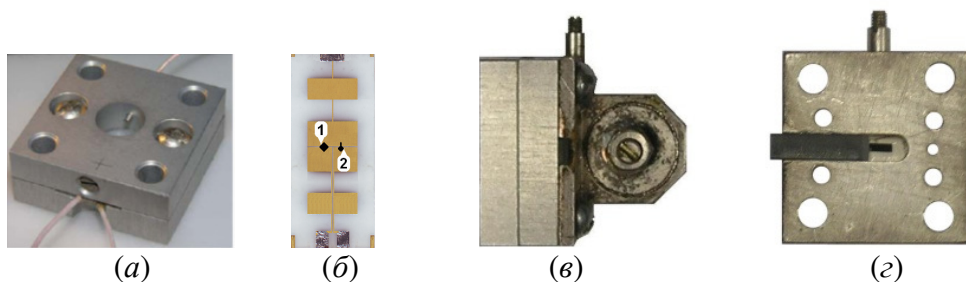


Рис. 1.4 Внешний вид модуля «Тигель-08М» (а), топологии диодной вставки (б), модуля «Тигель-08» в сборе со стабилизирующим резонатором (в) и элемента резистивной связи с резонатором (г): 1 – диод Ганна; 2 – детекторный диод

Частота генерации модуля – 37,5 ГГц, выходная мощность – 15 мВт, ток потребления при напряжении смещения 4 В – не более 0,2 А. Предельный энергетический потенциал $P_{пр}$, определяемый как отношение выходной мощности автодина к входной мощности отражённого излучения при отношении сигнал/шум = 2 на его низкочастотном выходе в полосе от 0,5 кГц до

1,5 кГц составляет 75 дБ.

В работе [76] представлена перспективная конструкция автодинного генератора на диоде Ганна с использованием волновода с диэлектрическим заполнением (см. рис. 1.5.). Активный кристалл диода Ганна с дополнительным управляющим электродом [77] в предлагаемой конструкции устанавливается внутри диэлектрического волновода. Зазор между активной областью элемента диода Ганна и ближайшей внутренней стенкой диэлектрического волновода выполняют намного меньше четверти длины волны. При этом должны уменьшиться также величины паразитных элементов, и почти исчезнуть те из них, которые возникали из-за присутствия корпуса СВЧ элемента. Диэлектрик обладает большей электрической прочностью, чем воздух, поэтому может быть использован волновод с уменьшенной высотой узкой стенки, что позволяет приблизить волноводное сопротивление передающей линии с низким импедансом активных элементов без применения трансформирующих устройств.

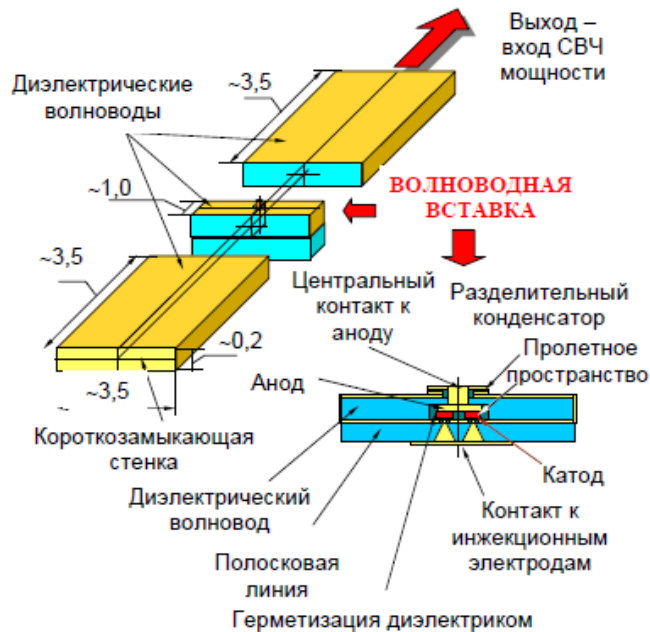


Рис. 1.5. Эскиз конструкции автодинного генератора на основе диода Ганна с дополнительным управляющим электродом, выполненной с применением волновода с диэлектрическим заполнением

Технология изготовления СВЧ модулей на волноводе с диэлектрическим заполнением предполагает высокой точностью изготовления элементов. Она в значительной степени совпадает с технологией гибридно-интегральных схем. Ее использование снижает трудоемкость изготовления СВЧ модулей (практически исключаются работы, связанные с точным механическим изготовлением сложнейших металлических конструкций с микронными допусками), что должно привести к существенному снижению стоимости изготовления автодинных приёмо-передающих модулей.

Интересное развитие идеи применения диэлектрических волноводов в генераторно-излучающих модулях получило в работах учёных Т. Ито и других [78–81]. Эта идея состоит в использовании распределенного брэгговского отражателя (РБО) на основе диэлектрического волновода одновременно в качестве резонансной системы генератора и излучателя (антенны). Это дает возможность, с одной стороны, уменьшить габаритные размеры генераторов СВЧ диапазона и, с другой стороны, решить технологические проблемы изготовления генераторов КВЧ диапазона длин волн [82, 83]. Наиболее существенные преимущества РБО по сравнению с обычными диэлектрическими резонаторами состоят в следующем:

1. Возможность выполнения по интегральной технологии периодических решеток неоднородностей РБО как линейной [78], так и концентрической конфигурации [79];

2. Низкая стоимость и простота производства генераторов на РБО, обеспечиваемые применением планарной технологии, что хорошо сочетается с идеологией автодинных устройств как технологически простых и относительно дешевых приёмо-передатчиков;

3. Более разреженный спектр собственных колебаний резонансной системы, что особенно важно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, поскольку периодические решетки неоднородностей являются частотно-зависимыми отражателями. Это приводит к повышению устойчивости и стабильности работы генератора;

4. Возможность использования в конструкциях резонаторов на РБО более дешёвых материалов с небольшими значениями диэлектрической проницаемости. В отличие от традиционных диэлектрических резонаторов, в которых для увеличения коэффициента отражения от границы раздела воздух-диэлектрик нужно использовать материалы с большими значениями диэлектрической проницаемости, в РБО большая величина коэффициента отражения от отражателей обеспечивается механизмом распределенного взаимодействия электромагнитной волны с периодически неоднородным диэлектрическим волноводом.

1.2. Автодины с одноконтурной колебательной системой

Исследованию автодинных генераторов с простейшей одноконтурной колебательной системой посвящено большое число работ. Так, например, влияние прочности предельного цикла (характеристика автоколебательной системы с точки зрения теории нелинейных колебаний) и режима колебаний на автодинную чувствительность и другие характеристики автодинов изучено впервые в работе [84] достаточно давно (1946 г.). Позднее, в работах [9, 18, 85] было установлено влияние явления неизохронности на особенности формирования автодинного отклика СВЧ генераторов и выполнены исследования динамического режима работы автодинов (при быстром движении отражателя) [18, 85, 86].

Из результатов указанных исследований следует, что основным фактором, ограничивающим сверху диапазон рабочих скоростей, является инерционность изменений амплитуды автоколебаний, которая характеризуется постоянной времени автодинного отклика [9, 18]. Выполненные в [33, 87] расчёты и моделирующие эксперименты показали, что при использовании нестабилизированных СВЧ генераторов, имеющих сравнительно низкодобротные резонаторы, автодины работоспособны до космических скоростей. Этот вывод является важным, поскольку для большинства практических применений автодинов анализ особенностей сигналов можно проводить в квазистатическом приближении [29, 30].

Относительно низкая добротность колебательной системы СВЧ генераторов является причиной существенных автодинных изменений частоты, что особенно сильно проявляется в диапазоне миллиметровых волн. Неравномерность набега фазы отражённого излучения, обусловленная автодинным изменением частоты, вызывает искажения автодинных сигналов [8, 9]. Искажения, свойственные автодинным генераторам [10], в большинстве применений являются нежелательными, поскольку нарушают нормальную работу устройств обработки сигналов СБРЛ. Исследования различных СВЧ генераторов, проведенные авторами работ [10, 88], позволили найти условия сохранения «гладкости» автодинного отклика, без формирования скачков и гистерезисных явлений в процессе изменения расстояния до цели.

Для описания отмеченных свойств в литературе по автодинам СВЧ и КВЧ диапазонов уже более 20 лет используется так называемый «параметр искажений», характеризующий отклонение формы автодинного сигнала от классической синусоиды при величине этого параметра менее единицы [86]. Отметим, что в одной из первых работ [88], в которой установлено данное неравенство, исходя из некоторой аналогии уравнений автодина и генератора на отражательном клистроне, данный параметр назван «параметром группировки». В последние годы взамен упомянутых терминов стал использоваться термин «параметр внешней обратной связи». Данный термин является общепризнанным в теории лазерных автодинов [5].

Физика автодетектирования автодинного отклика и методы его оптимальной регистрации (выделения) в СВЧ генераторах на основе различных типов активных элементов (АЭ) также всесторонне изучались в большом числе отечественных и зарубежных публикаций [1–6]. При этом в ряде ранних работ, посвящённых исследованиям генераторов на электровакуумных приборах, явление автодетектирования рассматривалось, как процесс преобразования изменений амплитуды колебаний в ток (напряжение) смещения на АЭ. Аналогичный подход к анализу сохранился в некоторых исследованиях полупроводниковых СВЧ генераторов в последующие годы. Автодинным изменениям частоты в ряде работ не придавалось особого

значения, поскольку считалось, что «внешний сигнал практически не влияет на частоту колебаний» СВЧ генератора (с. 144, [89]) и при этом частотная модуляция «теряется при детектировании» (с. 109, [85]).

Однако, сам процесс автодетектирования, как показали дальнейшие исследования, не является таким уж односложным. Кроме детектирования амплитудных изменений во многих типах автодинов присутствует также преобразование изменений частоты автоколебаний в постоянную составляющую АЭ. Необходимость учёта данного явления, известного узким специалистам по автодинам как «частотное автодетектирование», показана во многих отечественных и зарубежных работах, посвящённых исследованиям синхронизированных СВЧ генераторов, используемых в качестве демодуляторов частотно-модулированных сигналов [90, 91].

Аналогичные исследования СВЧ генераторов для радиолокационного применения показали, что благодаря этому явлению возможно появление относительных фазовых смещений между автодинными сигналами, регистрируемыми по изменению амплитуды колебаний и напряжения автосмещения [92]. При обработке этих сигналов обеспечивается возможность определения направления движения отражающего объекта по изменению знака разности фаз между сигналами, что расширяет функциональные возможности и область применения автодинных СБРЛ.

Другое пока малоизученное явление в СВЧ генераторах известно как «зависимость амплитуды колебаний от изменений частоты генерации», частотно-амплитудная конверсия или «преобразование частота – амплитуда». Данным явлением при анализе синхронизации СВЧ генераторов, а также при исследовании их шумовых и автодинных характеристик во многих зарубежных и отечественных публикациях пренебрегали [93–96]. Поэтому терминологический вопрос по поводу наименования этого явления, которое является в определённом смысле «дуальным» широко известному явлению неизохронности генератора, до настоящего времени оставался открытым.

Однако полученные в последние годы результаты исследований автодинных генераторов миллиметрового диапазона показали, что данное явление оказывает существенное влияние на процесс формирования автодинного отклика и потому требует своего дальнейшего более глубокого изучения, что необходимо как для оптимизации режима автодинного генератора, так и для поиска их новых возможностей практического применения. В связи с этим, к настоящему времени по поводу наименования явления «зависимости амплитуды колебаний от изменений частоты генерации» созрела необходимость введения новых в теории автодинных генераторов терминов.

В последние годы для анализа работы автодинов наряду с широко известными характеристиками (амплитудной и частотной) стала использоваться ещё одна характеристика, показывающая связь автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний при изменении времени запаздывания отражённого излучения, – амплитудно-частотная характеристика [10]. Подобные характеристики известны в теории СВЧ генераторов и широко используются при анализе явлений синхронизации и затягивания режима работы генератора внешней нагрузкой [90, 91]. Однако в теории автодинов данная характеристика является сравнительно новым инструментом анализа и недостаточно изученным.

При обработке выходных сигналов автодинов большое значение имеют также знания о шумовых параметрах и характеристиках используемых генераторов, поскольку они определяют потенциальные возможности систем, датчиков и измерителей по дальности действия, надёжности обнаружения отражающего объекта, точности измерения электрофизических параметров объектов исследования, их кинематических характеристик и многого другого. Исследованиям шумовых характеристик автодинов посвящено большое число работ зарубежных и отечественных авторов (см., например, [1–3, 97–101]). Однако во всех известных работах анализ шумовых характеристик автодинов проведен лишь в «линейном» приближении, при котором полагается, что в генераторе под воздействием излучения, отражённого от объекта, процессы формирования автодинного отклика и шумов являются независимыми и в автодине выполняется принцип суперпозиции. Данное положение ввиду очевидной нелинейности автодинной системы является неубедительным и требует изучения и уточнения.

Дальность действия систем ближней радиолокации (СБРЛ) в процессе их работы может изменяться в чрезвычайно широких пределах. Наибольшее расстояние до отражающего объекта ограничено энергетическим потенциалом системы, а наименьшее – непосредственным соприкосновением контролируемого объекта и СБРЛ [1–7, 102–104]. В первом случае уровень отражённого излучения весьма мал и соизмерим с уровнем собственных шумов приёмника, а во втором – он высок и сопоставим с уровнем зондирующего излучения передатчика.

В связи с этим одной из важнейших проблем СБРЛ как с гомодинным, так и автодинным построением приёмо-передатчика является обеспечение их максимального динамического диапазона по уровню входного сигнала. Особенно остро данная проблема, как отмечалось выше, стоит в автодинных СБРЛ диапазонах миллиметровых и более коротких волн, где возникающие при увеличении уровня отражённого излучения нелинейные искажения выходного сигнала [10].

1.3. Автодины с двухконтурной колебательной системой

Характерной чертой работы автодинов, как отмечалось выше, являются наблюдаемые при увеличении уровня отражённого излучения специфические искажения сигналов [10, 18]. Данные искажения в большинстве применений являются нежелательными. Они нарушают нормальную работу устройств обработки сигналов СБРЛ, особенно в случае взаимодействия автодинного генератора с отражённым излучением от распределённого объекта [19] и значительно ограничивают динамический диапазон систем.

По данным большого числа исследований искажения сигналов свойственны всем типам генераторов и имеют принципиальный характер [5, 8–10]. Особенно сильно они проявляется в диапазоне миллиметровых и более коротких волн и связаны с неравномерностью набега фазы отражённой волны вследствие автодинных изменений частоты генерации под воздействием отражённого излучения.

Одно из наиболее эффективных решений для борьбы с этим явлением, состоит в стабилизации частоты автодинного генератора внешним высокочастотным резонатором впервые предложенное в работах [88, 105]. При этом также снижается влияние на технические характеристики автодинных систем различных дестабилизирующих факторов окружающей среды, из которых наиболее существенным является температура. Поэтому данный метод нашёл самое широкое использование в автодинных СБРЛ, различных датчиках и измерителях миллиметрового диапазона (см., например, обзор [12]).

Методам стабилизации частоты СВЧ генераторов с помощью внешнего резонатора посвящено большое число публикаций, в которых рассмотрены различные варианты подключения к основному (рабочему) резонатору дополнительного стабилизирующего резонатора, типы связи между ними и способы отбора мощности в нагрузку (см., например, [71–74]). Из всего конструктивного многообразия способов стабилизации частоты твердотельных СВЧ генераторов в настоящее время находят применение, в основном, простейшие структуры, у которых эквивалентные схемы колебательной системы сводятся либо к цепочечному трёхконтурному фильтру с реактивной связью отдельных парциальных контуров, либо к двухконтурному фильтру с резистивной связью [73]. Достоинства последнего варианта, из которых важнейшим для автодина является однозначность регулировочной характеристики.

При анализе такого автодинного генератора необходимо использовать как минимум двухконтурную модель автоколебательной системы. Такая модель рассматривалась в ряде работ, посвящённых исследованию автодинов, применяемых в СВЧ радиоспектроскопии и в технике контроля параметров материалов и размеров изделий [106–108]. Однако в известной

нам литературе по автодинной тематике с радиолокационным приложением теоретические и методически продуманные экспериментальные исследования автодинов со стабилизацией частоты внешним резонатором отсутствуют. Хотя для определения предельных параметров, характеристик и функциональных возможностей таких автодинов данные исследования представляются востребованными.

1.4 Выводы

1. Проведенный обзор работ, посвящённых конструкторско-технологическим решениям при создании перспективных автодинных модулей КВЧ диапазона, показал, что основная тенденция в этом направлении связана с созданием гибридно-интегральных генераторно-излучающих модулей в виде законченных микросхем для поверхностного монтажа. При этом наиболее предпочтительными активными элементами для этих модулей являются двухмезовые планарные диоды Ганна, поскольку они превосходят ЛПД по электрической прочности, шумовым параметрам, стабильности и не требуют высоких значений питающих напряжений. Однако недостатками диодов Ганна являются низкий КПД и неоправданно большая величина потребляемой от источника мощности, что является существенным сдерживающим фактором для применения в бортовых СБРЛ. В связи с этим наиболее перспективными для использования в автодинных модулях мм и субмм диапазонов являются полевые транзисторы, граничная частота генерации опытных образцов которых в настоящее время превысила 1 ТГц.

Среди рассмотренных конструкций гибридно-интегральных модулей генераторов СВЧ и КВЧ диапазонов наиболее подходящими для проведения диссертационных исследований являются автодинные модули «Тигель-08М» 8-и миллиметрового диапазона длин волн, выполненные на основе двухмезовых диодов Ганна. Данные модули обеспечивают возможность регистрации автодинного отклика не только в цепи питания, но и по изменению амплитуды колебаний благодаря наличию в генераторе встроенного детекторного диода с барьером Шоттки. Дополнительным преимуществом исследования этих модулей состоит в сравнительной доступности контрольно-измерительной аппаратуры 8-и мм диапазона, наличием волноводных элементов для экспериментального стенда и технологичностью изготовления оснастки и дополнительных элементов волноводного тракта.

2. Проведенный обзор основополагающих работ показал, что при изучении сложных физических процессов в автодинном генераторе используются различные модели и методы анализа, позволяющие рассмотреть как влияние внутренних параметров автоколебательной системы на основные характеристики автодинов, так и особенности автодинного отклика при взаимодействии генератора с СВЧ излучением, отраженным от объекта. Из анализа

опубликованных результатов исследований следует, что, несмотря на большое количество работ по данной тематике, до сих пор недостаточно изученным или вообще не раскрытым оказался целый ряд вопросов:

2.1. Недостаточно изученными в общетеоретическом плане являются вопросы устойчивости автодинов, стабильности его автодинных параметров и характеристик, а также явление автодетектирования как процесс одновременного преобразования изменений амплитуды и частоты автоколебаний в ток (напряжение) смещения АЭ, влияния на эти параметры и характеристики внутренних свойств используемых генераторов.

2.2. В известных нам работах анализ шумовых характеристик автодинов проведен лишь в «линейном» приближении, при котором полагается, что в генераторе под воздействием излучения, отражённого от объекта, процессы формирования автодинного отклика и шумов являются независимыми и в автодине выполняется принцип суперпозиции. Данное положение является сомнительным и требует своего дальнейшего изучения в плане анализа шумовых характеристик с учётом одновременного формирования автодинного отклика при воздействии на автодин отражённого излучения.

3. Обзор литературы показал, что вопросы теоретического и экспериментального исследования автодинных генераторов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором по сравнению с широко известными одноконтурными автодинами освещены недостаточно.

Приведенный перечень вопросов, очевидно, охватывает далеко не полный список основных проблем, не решенных при создании автодинных систем на основе современных полупроводниковых СВЧ приборов. Однако в него включены те основные вопросы, решение которых в первую очередь необходимо для более глубокого понимания процессов в автодинах, поиска новых технических решений, оптимизации автодинных систем и расширения области их практического применения.

Глава 2. Математическая модель автодинов с одноконтурной колебательной системой. Основные сигнальные параметры и характеристики

В данной главе представлены результаты исследований сигнальных параметров и характеристик СВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний. Установлены основные зависимости этих характеристик от внутренних параметров одноконтурных автодинных генераторов. Для этого в разделе 2.1 на основе анализа эквивалентной схемы одноконтурного генератора получены основные уравнения, описывающие процесс взаимодействия СВЧ генератора с собственным отражённым от объекта излучением с учётом внутренних шумов активного элемента. На основе этих уравнений в разделе 2.2 проведен анализ устойчивости автодинной системы «генератор – отражающий объект», а в разделе 2.3 – влияния на основные параметры автодина внутренних свойств автогенератора. В разделе 2.4 выполнен расчёт и анализ автодинных характеристик для различных значений внутренних параметров генератора и внешних условий, показан спектр автодинного отклика, а в разделе 2.5 – рассмотрен вопрос применения амплитудно-частотных характеристик для анализа особенностей автоколебаний автодина и решения обратной задачи – расчёта его внутренних параметров по автодинным характеристикам.

Основные результаты данных исследований опубликованы в журнальных статьях [29, 30, 32, 109], изложены в материалах научно-технических конференций [28, 46, 110] и отчёте о НИР [33].

2.1. Эквивалентная схема и основные уравнения для анализа автодинных генераторов

Функциональная схема простейшего радиолокатора, у которого автодинный генератор АД непосредственно связан с антенной А без каких-либо развязывающих элементов, представлена на рис. 2.1, (а). Рабочее смещение на АЭ автодинного генератора подаётся от источника питания E_{Π} через блок регистрации БР. Электромагнитные колебания, вырабатываемые АД излучаются через приёмо-передающую антенну А в направлении отражающего объекта ОО. Отражённое излучение через антенну А возвращается в генератор АД, вызывая в нём автодинный эффект.

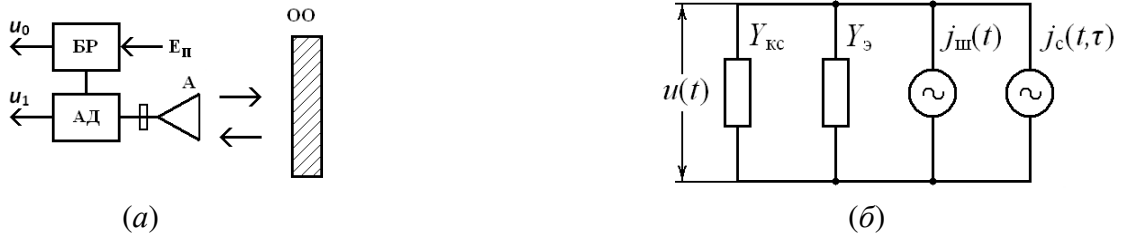


Рис. 2.1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного генератора

Возникающие в результате этого автодинные изменения среднего значения тока или напряжения в цепи питания АЭ генератора преобразуются с помощью простейшей цепи автосмещения или специальной схемы блока регистрации БР в напряжение выходного сигнала u_0 (сигнал «автодетектирования») [5, 111]. В некоторых конструкциях автодинных радиолокаторов полезный сигнал выделяется с помощью дополнительной схемы, которая преобразует автодинные изменения амплитуды или частоты автоколебаний в напряжение выходного сигнала u_1 (сигнал «внешнего детектирования») [6, 19, 98].

Эквивалентная схема автодина, приведённая к плоскости АЭ, представлена на рисунке 2.1, (б). На этой схеме по высокой частоте $Y_{кc}$ отображает проводимость колебательной системы (КС), которая включает в себя также проводимость нагрузки Y_n :

$$Y_{кc} \equiv Y_{кc}(\omega) = G_{кc} + jB_{кc} = G[1 + j2Q_n(\omega - \omega_c)/\omega_c], \quad (2.1)$$

где $G_{кc}$ и $B_{кc}$ – резистивная и реактивная проводимости КС; $G = G_n + G_{кc}$; G_n , $G_{кc}$ – проводимости собственных потерь резонатора и нагрузки соответственно; Q_n , ω_c – нагруженная добротность и собственная частота КС; ω – текущая частота колебаний генератора.

Средняя за период колебаний «электронная» проводимость АЭ $Y_э$ (см. рис. 2.1, (б)) в общем случае является зависимой от напряжения смещения E_n , амплитуды A и частоты ω колебаний: $Y_э = G_э + jB_э \equiv G_э(E, A, \omega) + jB_э(E, A, \omega)$, где $G_э$, $B_э$ – резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно. Такая зависимость является характерной для СВЧ генераторов, выполненных на АЭ с гистерезисом мгновенной вольт-амперной характеристики, обусловленным явлением запаздывания основных носителей в пространстве взаимодействия с полем резонатора. Дальнейший анализ выполним при условии постоянного напряжения смещения: $E = E_0$. Тогда $Y_э = G_э(A, \omega) + jB_э(A, \omega)$, а регистрируемым параметром в цепи питания будет среднее значение тока $I_э$ АЭ.

Параллельно указанным проводимостям (см. рис. 2.1, (б)) подключены эквивалентные источники мгновенного тока внутренних шумов $j_{ш}(t)$ генератора и воздействия собственного

отражённого от объекта излучения $j_c(t, \tau)$, которое запаздывает относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до отражающей поверхности; c – скорость распространения электромагнитного СВЧ излучения. При этом шум, обусловленный внутренними причинами АЭ, полагаем, является стационарным нормальным процессом с нулевым средним значением.

Под воздействием напряжения смещения $E_{\text{п}}$ рабочая точка выводится на падающей участок вольт-амперной характеристики АЭ. При условии выполнения баланса амплитуд и фаз в схеме под действием тока АЭ возникает генерация незатухающих колебаний $u(t)$. Учитывая обычно достаточно высокое значение нагруженной добротности $Q_{\text{н}}$ колебательной системы, полагаем, что колебания на АЭ являются квазигармоническими: $u(t) = \text{Re}[A \exp j\Psi(t)]$, где $\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi$ – полная фаза колебаний в окрестности частоты ω_0 ; $A = A(t)$, $\varphi = \varphi(t)$ – медленно меняющиеся за период колебаний амплитуда и фаза в текущий момент времени t . Тогда колебания эквивалентного источника тока $j_c(t, \tau)$, имеющего амплитуду $J_c(t, \tau)$ и полную фазу $\Psi(t, \tau)$ отражённого колебания, являются также квазигармоническими: $j_c(t, \tau) = \text{Re}[J_c(t, \tau) \exp j\Psi(t, \tau)]$. Поэтому согласно законам Кирхгофа для цепи, приведенной на рисунке 2.1 (б), имеем:

$$\text{Re} [\dot{u}(t)(Y_s + Y_{\text{кв}})] = j_c(t, \tau) + j_{\text{ш}}(t). \quad (2.2)$$

Для получения укороченных уравнений возмущённого генератора, следуя методу Курокавы [93], в выражении (2.2) после подстановки в него (2.1) сделаем замену ω на $\omega_0(1 + \chi) - j(1/A)(dA/dt)$, где $\chi = (1/\omega_0)(d\varphi/dt) = \Delta\omega/\omega_0$ – относительные изменения частоты. Здесь, в силу медленности $\varphi(t)$ и $A(t)$, величины $d\varphi/dt$ и $(1/A)(dA/dt)$ являются достаточно малыми по сравнению с частотой ω_0 . Тогда в новых переменных выражение (2.2) перепишем в виде:

$$\left(\frac{2GQ_{\text{н}}}{\omega_c} \frac{1}{A_0} \frac{dA}{dt} + G_s + G \right) A \cos(\omega_0 t + \varphi) - \left(\frac{2GQ_{\text{н}}}{\omega_c} \frac{d\varphi}{dt} + B_s + 2GQ_{\text{н}} \frac{\omega_0 - \omega_c}{\omega_c} \right) A \sin(\omega_0 t + \varphi) = j_c(t, \tau) + j_{\text{ш}}(t), \quad (2.3)$$

В правой части выражения (2.3) учтём известные энергетические соотношения для генераторов: $J_c(t, \tau) = [8G_{\text{н}}P_c(t, \tau)]^{1/2}$, где: $P_c(t, \tau) = \Gamma^2 P(t, \tau)$ – мощность отражённого от объекта излучения; $P(t, \tau) = A^2(t, \tau)G_{\text{н}}/2$ – выходная мощность на нагрузке генератора в момент времени $t - \tau$; Γ – коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до объекта и обратно.

Далее, после умножения выражения (2.3) на функции $\cos(\omega_0 t + \varphi)$, затем, на $\sin(\omega_0 t + \varphi)$, соответственно, и усреднения за период колебаний получим укороченные уравнения для амплитуды A и фазы φ в виде:

$$\frac{2GQ_H}{\omega_c} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + G_3 + G = 2\Gamma(t, \tau) \eta G \cos \delta(t, \tau) + \frac{2}{A} i_c(t), \quad (2.4)$$

$$\frac{2GQ_H}{\omega_c} \frac{d\varphi}{dt} + B_3 + 2GQ_H \frac{\omega - \omega_c}{\omega_c} = -2\Gamma(t, \tau) \eta G \sin \delta(t, \tau) - \frac{2}{A} i_s(t), \quad (2.5)$$

где $\eta = Q_H / Q_{вн}$, $Q_{вн}$ – кпд и внешняя добротность колебательной системы; $i_c(t)$, $i_s(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора:

$$i_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{ш}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t), \quad i_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{ш}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t);$$

$\Gamma(t, \tau) = \Gamma [A(t, \tau) / A(t)]$ – модуль и $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – фаза некоторой функции, имеющей смысл мгновенного значения коэффициента отражения [96]. В данном случае фаза $\delta(t, \tau)$ и квадратурные составляющие шума $i_c(t)$ и $i_s(t)$ после усреднения стали также медленно меняющимися функциями за период $T = 2\pi / \omega_0$ колебаний.

Трудность нахождения аналитического решения уравнений (2.4) и (2.5) состоит, прежде всего, в наличии нелинейных зависимостей всех его слагаемых от параметров автоколебаний. Электронная проводимость $Y_3 = G_3 + jB_3$, как отмечалось выше, зависит от напряжения смещения E п, амплитуды A и частоты ω колебаний: $Y_3(E, A, \omega) \equiv G_3(E, A, \omega) + jB_3(E, A, \omega)$. Проводимость $Y_{кc}$ является зависимой от частоты ω , изменения которой могут существенно повлиять на закон формирования автодинного отклика.

Для облегчения анализа системы уравнений (2.4), (2.5) заменим нелинейные члены проводимости $Y_{кc}$ КС и электронной проводимости $Y_3 = G_3 + jB_3$ АЭ их квазилинейной аппроксимацией в окрестности режима стационарных колебаний и будем рассматривать происходящие в АД процессы от воздействия отражённого излучения в относительных вариациях этого режима. Кроме того, ограничим настоящие исследования случаем выделения автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний с помощью внешнего детектирования при фиксированном напряжении смещения $E = E_0$ на АЭ, а сигнала автодетектирования – по изменению величины среднего значения тока АЭ: $I_3 = I_3(A, \omega)$.

Для этого из систем уравнений (2.4), (2.5) при равенстве $\Gamma(t, \tau) = 0$ находим сначала уравнения стационарного режима колебаний, полагая производные равными нулю и $A = A_0$,

$\omega = \omega_0$, где A_0 , ω_0 – амплитуда и частота стационарных колебаний:

$$G_{\text{э0}}(A_0, \omega_0) + G_{\text{кк}}(\omega_0) = 0, \quad B_{\text{э0}}(A_0, \omega_0) + B_{\text{кк}}(\omega_0) = 0, \quad I_{\text{э}} = I_{\text{э}}(A_0, \omega_0), \quad (2.6)$$

где $B_{\text{кк}}(\omega_0) = 2GQ_0(\omega_0 - \omega_c) / \omega_c$ – реактивная проводимость КС. Данные уравнения являются общепринятыми в теории СВЧ и КВЧ генераторов [93–96, 112]. Они позволяют определить амплитуду A_0 , частоту ω_0 и потребляемый ток $I_{\text{э0}}$ автономного генератора для стационарного режима.

Для нахождения уравнений в вариациях для автодинного отклика генератора представим амплитуду и частоту автоколебаний в виде: $A = A_0 + \Delta A$, $\omega = \omega_0 + \Delta \omega$, где ΔA , $\Delta \omega$ – соответствующие вариации стационарного режима АГ, причём полагаем эти приращения достаточно малыми $\Delta A \ll A_0$, $\Delta \omega \ll \omega_0$. Входящие в (2.4), (2.5) параметры $G_{\text{э}}$ и $B_{\text{э}}$, при этом в окрестности своих стационарных значений (2.6), где $G_{\text{э}} = G_{\text{э0}}(A_0, \omega_0)$ и $B_{\text{э}} = B_{\text{э0}}(A_0, \omega_0)$, под воздействием отражённого излучения и собственных шумов генератора получают соответствующие изменения.

Кроме того, учтём в вариациях явление автодетектирования автодинного отклика, при котором благодаря автодинным изменениям среднего значения тока $I_{\text{э}} = I_{\text{э}}(A, \omega)$ АЭ обеспечивается возможность выделения выходного сигнала АД в цепи смещения АЭ по изменению тока: $\Delta I_{\text{э}} = I_{\text{э}} - I_{\text{э}}(A_0, \omega_0)$, где очевидно также, что $\Delta I_{\text{э}} \ll I_{\text{э0}}(A_0, \omega_0)$. Допуская линейность зависимостей $G_{\text{э}}(A, \omega)$, $B_{\text{э}}(A, \omega)$ и $I_{\text{э}}(A, \omega)$ от амплитуды и частоты колебаний в окрестности стационарного режима запишем указанные параметры с учетом первых двух членов разложений в ряды Тейлора:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э0}}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial I_{\text{э}}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial I_{\text{э}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega, \quad (2.7)$$

$$G_{\text{э}} = G_{\text{э0}}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial G_{\text{э}}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial G_{\text{э}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega, \quad (2.8)$$

$$B_{\text{э}} = B_{\text{э0}}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial B_{\text{э}}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial B_{\text{э}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega, \quad (2.9)$$

Здесь и далее индекс «0» при частных производных означает, что они получены в окрестности стационарного режима.

Подставляя (2.8), (2.9) в (2.4), (2.5) и, учитывая (2.6), получим систему линеаризованных уравнений для определения относительных вариаций амплитуды $a_1 = \Delta A / A_0$ и частоты генерации $\chi = \Delta \omega / \omega_0$, а также, учитывая (2.7), выходного сигнала автодетектирования $i = \Delta I_{\text{э}} / I_{\text{э0}}$ в виде:

$$\frac{Q_n}{\omega_0} \frac{da_1}{dt} + \alpha_{11} a_1 + \varepsilon_{11} \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (2.10)$$

$$\beta_{11} a_1 + \xi_{11} \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (2.11)$$

$$\alpha_{01} a_1 + \varepsilon_{01} \chi = i, \quad (2.12)$$

где $\alpha_{11} = (A_0 / 2G_{30})(\partial G_3 / \partial A)_0$ – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; $\varepsilon_{11} = (\omega_0 / 2G_{30})(\partial G_3 / \partial \omega)_0$ – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через проводимость АЭ и (или) параметры КС $\varepsilon_{11} = (\omega_0 / 2G_{30})(\partial G_{kc} / \partial \omega)_0$; $\beta_{11} = (A_0 / 2G_{30})(\partial B_3 / \partial A)_0$ – параметр, который определяет неизохронность АГ; $\xi_{11} = \xi_s + \xi_{kc}$ – параметр стабилизации частоты генератора, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости АЭ $\xi_s = (\omega_0 / 2G_{30})(\partial B_3 / \partial \omega)_0$ и КС $\xi_{kc} = Q_n / Q_{вн}$, $\eta = G_n / G = Q_n / Q_{вн}$ – внешняя добротность и КПД КС; $\alpha_{01} = (A_0 / I_{03})(\partial I_3 / \partial A)_0$ – безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций амплитуды колебаний; $\varepsilon_{01} = (\omega_0 / I_{03})(\partial I_{03} / \partial \omega)_0$ – параметр «частотного детектирования», определяющий вклад вариаций частоты генерации в вариации тока питания АЭ. Обычно в СВЧ и КВЧ генераторах выполняется неравенство $\xi_s \ll \xi_{kc} = Q_n$. Поэтому в дальнейшем будем полагать $\xi_{11} = Q_n$.

Входящие в систему уравнений (10) – (12) дифференциальные параметры АЭ и КС (α_{i1} , ε_{i1} , β_{i1} , ξ_{i1} , где $i = 0, 1$) могут быть рассчитаны для конкретного типа АЭ генератора [112] или определены экспериментально. Необходимо отметить сложность раздельного определения этих параметров из-за их взаимной зависимости. Более доступно, как показано ниже, их аналитическое определение относительных величин с помощью анализа автодинных характеристик.

Из уравнений (2.10), (2.11) видно, что основная инерционность автодинной системы связана с изменениями амплитуды колебаний. Комбинируя эти выражения при исключении переменной χ , получим:

$$\tau_a (da_1/dt) + a_1 = \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] + r_{ш} [a_c(t) + \rho a_s(t)], \quad (2.13)$$

где τ_a – постоянная времени (время релаксации [9, 94, 109]) автодинного отклика, характеризующая скорость изменения процессов в автодине:

$$\tau_a = Q_n / [\omega_0 \alpha_{11} (1 - \gamma \rho)];$$

$\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$ и $\rho = \varepsilon_{11} / Q_n$ – коэффициенты неизохронности, коэффициент учитывает зависимость частоты колебаний генератора от амплитуды колебаний, и неизодромности, учитывает влияние

вариаций частоты на амплитуду колебаний через электронную проводимость АЭ, соответственно; $\psi_1 = \arctg(\rho)$ – угол фазового смещения автодинных изменений амплитуды; K_a – коэффициент автодинного усиления (амплитудной чувствительности автодина), показывающий во сколько раз амплитуда автодинного отклика превышает амплитуду приходящей к генератору отражённой волны [9, 18, 29, 33]:

$$K_a = \eta \sqrt{1 + \rho^2} / \alpha_{11} (1 - \gamma \rho); \quad (2.14)$$

$r_{ш}$ – коэффициент регенерации собственных шумов автоколебательной системой:

$$r_{ш} = 1 / \alpha_{11} (1 - \gamma \rho).$$

В работах [32, 109] выполнены измерения постоянной времени (времени релаксации) τ_a автодинного отклика, которая для исследованного генератора 8-мм диапазона на диоде Ганна составила величину порядка $1 \cdot 10^{-9}$ с. Регистрируемые автодинными устройствами процессы, период T_a которых близок к величине $1 \cdot 10^{-7}$ с, протекают значительно медленнее, чем скорость изменения параметров СВЧ и КВЧ генераторов: $T_a \gg \tau_a, \tau$. Кроме того, далее считаем, что время корреляции $\tau_{кор}$ шумов в генераторе также пренебрежимо мало по сравнению с периодом T_a автодинного отклика: $\tau_{кор} \ll T_a$, но значительно превосходит постоянную времени τ_a и время τ распространения излучения до отражающей поверхности и обратно: $\tau_{кор} \gg \tau_a, \tau$. Данные условия являются достаточными, чтобы дальнейший анализ системы уравнений (2.10) – (2.12), полагая производную $da_1/dt = 0$ в (2.10) равной нулю, выполнить квазистатическим методом [18, 29, 105, 113, 114]. С учётом принятых допущений окончательно получены выражения:

$$\alpha_{11} a_1 + \varepsilon_{11} \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (2.15)$$

$$\beta_{11} a_1 + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (2.16)$$

$$\alpha_{01} a_1 + \varepsilon_{01} \chi = i. \quad (2.17)$$

Для реальных условий функционирования большинства автодинных датчиков и измерителей, при которых выполняются принятые выше сильные неравенства $T_a \gg \tau_a, \tau$, а также $\Delta A \ll A_0$ и $\Delta \omega \ll \omega_0$, при анализе процессов в генераторе можно в выражениях (2.15), (2.16) полагать $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$, $\delta(t, \tau) = \omega \tau$ [18, 29, 33]. Тогда выражение для изменений фазы $\delta(t, \tau)$, зависящих теперь только от текущей частоты ω и времени запаздывания τ , в нормированном (безразмерном) времени $\tau_n = \omega_0 \tau$ примет вид:

$$\delta(t, \tau) = \delta(\chi, \tau_n) = 2\pi(1 + \chi)(N + \tau_n), \quad (2.18)$$

где $N = 2l / \lambda$ – целое число полуволен, укладываемых между отражающим объектом и автодином; λ – длина волны излучения.

При этом необходимо отметить, что упрощённое представление в выражениях (2.10), (2.11), (2.15) и (2.16) функций запаздывающего воздействия в виде $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$, $\delta(t, \tau) = \omega\tau$ справедливо при условии отсутствия разрывов функций $a_1(t)$, $\chi(t)$ на всем интервале $t - \tau \div t$ значений переменной t . Данное условие тесно связано с требованием асимптотической устойчивости системы «автодинный генератор – отражающий объект». Анализ данной задачи на основе системы уравнений (2.10) и (2.11) посвящён следующий раздел.

2.2. Анализ устойчивости автодинных генераторов

Полученные выше уравнения (2.10), (2.11) позволяют выполнить анализ условий асимптотической устойчивости взаимосвязанной системы «автодинный генератор – отражающий объект» [32, 110]. Ввиду важности этого вопроса рассмотрим его комплексно с учётом, как внутренних параметров генератора, так и функции воздействия на эту систему. В такой постановке данная задача в известной нам литературе не рассматривалась. Для её решения в соответствие с методом Ляпунова, полагая в уравнениях (2.10) и (2.11) производную da_1 / dt равной нулю, получим уравнения для установившихся значений автодинного отклика по изменению амплитуды a_y и частоты ω_y :

$$\alpha_{11}a_y + \varepsilon_{11}(\omega_y - \omega_0)/\omega_0 - \Gamma\eta\cos(\omega_y\tau) = 0. \quad (2.19)$$

$$\beta_{11}a_y + Q_{\text{н}}(\omega_y - \omega_0)/\omega_0 + \Gamma\eta\sin(\omega_y\tau) = 0. \quad (2.20)$$

После подстановки в исходную систему уравнений (2.10), (2.11) новых переменных: $a_1 = a_y + \Delta a_1$ и $\omega = \omega_y + \Delta \nu$, и вычитания из образовавшейся системы выражений (2.19), (2.20) получим систему уравнений для вариаций амплитуды Δa и частоты $\Delta \nu$:

$$(Q_{\text{н}}/\omega_0)[d(\Delta a_1)/dt] + \alpha_{11}\Delta a_1 + [(\varepsilon_{11}/\omega_0) + \Gamma\eta\tau\sin(\omega_y\tau)]\Delta \nu = 0. \quad (2.21)$$

$$\beta_{11}\Delta a_1 + [(Q_{\text{н}}/\omega_0) + \Gamma\eta\tau\cos(\omega_y\tau)]\Delta \nu = 0. \quad (2.22)$$

Из характеристического уравнения для системы уравнений (2.21), (2.22) согласно критерию Рауса — Гурвица получим следующие условия устойчивой работы автодина:

$$1) \alpha_{11} > 0; 2) (1 - \gamma\rho) > 0; 3) 1 + C_{\text{oc}}\cos(\omega_0\tau + \theta) > 0, \quad (2.23)$$

где $C_{\text{oc}} = \Delta\omega_m\tau$ – параметра внешней обратной связи автодинной системы [5, 18, 29], физический смысл его – индекс фазовой модуляции сигнала, обусловленный автодинными изменениями частоты автоколебаний:

$$C_{\text{oc}} = (2\pi\Gamma N / Q_{\text{вн}}) \sqrt{1 + \gamma^2} / (1 - \gamma\rho); \quad (2.24)$$

$\Delta\omega_m$ – величина автодинной девиации частоты генерации.

Первые два условия в (2.23) имеют отношение собственно к генератору, а третье – к автодинной системе, находящейся под воздействием отражённого излучения. Требование выполнения первого неравенства: $\alpha_{11} > 0$, в отношении прочности предельного цикла общеизвестно (см. стр. 79, [78]), а второе – является достаточно новым: $(1 - \gamma\rho) > 0$. Произведение входящих во второе условие коэффициентов γ и ρ , как показано в [28, 29], имеет физический смысл «петлевого усиления» в генераторе, как системы с обратной связью, характеризует коэффициент внутренней обратной связи автодина. В этой системе за счёт неизодромности ($\rho \neq 0$) генератора происходит преобразование вариаций частоты в изменения амплитуды колебаний, которые, далее, за счёт внутренней обратной связи в виде неизохронности генератора ($\gamma \neq 0$) преобразуются вновь в изменения частоты.

Данное неравенство распадается на следующие два условия: если γ и ρ одного знака, то петлевое усиление должно удовлетворять неравенству $\gamma\rho < 1$, поскольку в системе действует положительная обратная связь и генератор при его несоблюдении ($\gamma\rho \geq 1$) склонен к возбуждению паразитных колебаний. В случае, когда коэффициенты γ и ρ имеют разные знаки, в системе обеспечивается безусловное выполнение условий внутренней устойчивости, так как в этом случае имеет место отрицательная обратная связь.

Физический смысл третьего условия в (2.23) – требование к ограничению индекса фазовой модуляции колебаний генератора, который определяется величиной параметра внешней обратной связи: $C_{oc} < 1$. В случае нарушения этого неравенства в автодинной системе при изменении величины $\tau = \tau(t)$ вследствие перемещения отражателя и, соответственно, фазы $\delta(\tau) = \omega\tau(t)$, а также внутренних шумов генератора наблюдается известное явление скачков выходных сигналов [18, 29, 88]. Такая ситуация обычно возникает, например, из-за большой величины автодинной девиации частоты $\Delta\omega_m$ вследствие высокого уровня сигнала или большой величины времени τ запаздывания отражённого излучения.

2.3. Основные параметры автодинов

Основными автодинными параметрами генераторов являются коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты, а характеристиками – зависимости амплитуды и частоты колебаний и сигнала автодетектирования от изменений времени запаздывания отражённого излучения [9, 18, 29, 33]. Эти параметры и характеристики обеспечивают возможность анализа особенностей формирования автодинного отклика при его

автодетектировании, а также при его выделении по изменению амплитуды a_1 и частоты χ колебаний при изменении τ_n на отдельных фрагментах расстояния l до отражающей поверхности.

Для расчёта этих параметров и характеристик и выяснения влияния внутренних свойств генератора на формирование автодинного отклика из (2.15) – (2.17) по формулам Крамера, полагая $a_c(t)=a_s(t)=0$, получим выражения для относительных изменений сигнала автодетектирования i , амплитуды a_1 и частоты χ колебаний в виде:

$$i(\tau_n) = i_{0m} \cos[\delta(\chi, \tau_n) - \psi_0], \quad (2.25)$$

$$a_1(\tau_n) = \Delta_a / \Delta = a_{1m} \cos[\delta(\chi, \tau_n) - \psi_1], \quad (2.26)$$

$$\chi(\tau_n) = \Delta_\chi / \Delta = -\chi_{1m} \sin[\delta(\chi, \tau_n) + \theta], \quad (2.27)$$

где Δ – характеристический детерминант системы (15), (16):

$$\Delta = \alpha_{11} \xi_{11} - \varepsilon_{11} \beta_{11} = \alpha_{11} \xi_{11} (1 - \gamma \rho) = \alpha_{11} \xi_{11} (1 - \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \psi_1),$$

Δ_a и Δ_χ – детерминанты, образованные из Δ заменой столбца, составленного из коэффициентов искомой вариации a_1 или χ , столбцом, состоящим из функций запаздывающего воздействия в правой части; $i_{0m} = \Gamma K_0$, $a_{1m} = \Gamma K_a$, $\chi_{1m} = \Gamma L_a$ – амплитудные значения соответствующих автодинных откликов; $K_0 = k_0 k_{н0}$, $K_a = k_a k_{на}$, $L_a = l_a l_{на}$ – коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты генерации; $k_0 = \eta \alpha_{01} / \alpha_{11}$, $k_a = \eta / \alpha_{11}$, $l_a = \eta / Q_n$ – коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты изохронного и изодромного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$; $k_{н0}$, $k_{на}$, $l_{на}$ – нормированные относительно k_0 , k_a , l_a коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты реального автодина, у которого $\gamma \neq 0$, $\rho \neq 0$, а также имеет место явление частотного детектирования, когда $\varepsilon_{01} \neq 0$:

$$k_{н0} = \frac{1 - \kappa_{чд} \gamma}{1 - \gamma \rho} \sqrt{1 + \kappa_{см}^2}, \quad k_{на} = \frac{\sqrt{1 + \rho^2}}{1 - \gamma \rho}, \quad l_{на} = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2}}{1 - \gamma \rho}; \quad (2.28)$$

$\psi_0 = \operatorname{arctg}(\kappa_{см})$, $\theta = \operatorname{arctg}(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений сигнала автодетектирования и частоты автоколебаний; $\kappa_{чд} = \varepsilon_{01} \alpha_{11} / \alpha_{01} Q_n$ – коэффициент частотного детектирования автодинных изменений частоты в изменения среднего значения тока активного элемента; $\kappa_{см} = [(\rho - \kappa_{чд}) / (1 - \kappa_{чд} \gamma)]$ – коэффициент амплитудно-частотного смещения автодинного отклика по изменению смещения на АЭ.

Из выражений (2.28) видно, что входящие в эти формулы параметры АД оказывают

существенное влияние на величины амплитудной K_a и частотной L_a чувствительности генератора, а также коэффициент автодетектирования K_0 . Прочность предельного цикла α_{11} фактически определяет основную величину коэффициента автодинного усиления $k_a = \eta / \alpha_{11} = Q_n / Q_{вн} \alpha_{11}$, что впервые было показано в работе [84]. Для мягкого режима устойчивой генерации величина этого параметра обычно находится в пределах: $1 > \alpha_{11} > 0$.

Частотная чувствительность $l_a = \eta / Q_n$ АД определяется величиной нагруженной добротности КС Q_n и зависит, кроме того, от значения её КПД $\eta = Q_n / Q_{вн}$ [115], где $Q_{вн}$ – внешняя добротность КС. Отсюда следует, что частотная чувствительность АД обратно пропорциональна внешней добротности $l_a = 1 / Q_{вн}$ генератора. При этом параметр неизохронности β_{11} генератора через одноимённый коэффициент $\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$ вносит поправку в величину коэффициента автодинной девиации частоты $L_a : l_{на} = (1 + \gamma^2)^{1/2}$, которая получается из (2.28) при условии $\rho = 0$. Кроме того, эта неизохронность вносит в автодинный отклик по изменениям частоты $\chi(\tau_n)$ дополнительный угол фазового смещения θ , что впервые было показано в работе [9]. Результаты исследований автодинных генераторов с учётом отмеченных здесь факторов за последние десятилетия подытожены в обзорах [18,19].

Ниже на основе выражений (2.28) рассмотрим поведение нормированных коэффициентов автодетектирования $k_{н0}$, автодинного усиления $k_{на}$ и девиации частоты $l_{на}$ в зависимости от принятых здесь коэффициентов неизодромности ρ , неизохронности γ и частотного детектирования $\kappa_{чд}$, а также их влияние на автодинные характеристики. При этом особый интерес вызывает влияние этих коэффициентов на характеристический детерминант Δ , входящий во все упомянутые выражения (2.28).

Произведение коэффициентов $\gamma\rho$, как отмечалось выше, определяет коэффициент внутренней обратной связи АД. В данном случае коэффициент ρ эквивалентен коэффициенту прямой передачи автодинных изменений частоты χ и преобразования их в амплитудные изменения a_1 , а γ – коэффициенту обратной передачи, при которой вследствие неизохронности генератора происходят обратные преобразования. Если в этом произведении коэффициенты γ и ρ имеют разные знаки, то получаем эквивалент системы с отрицательной обратной связью, у которой общий коэффициент «передачи» $k_{н0}$, $k_{на}$ или $l_{на}$ становится меньше в $(1 + \gamma\rho)$ раз. В случае одинаковых знаков при γ и ρ получаем эквивалент системы с положительной обратной связью, которая при $\gamma\rho < 1$ обеспечивает дополнительное «регенеративное усиление» благодаря

неиздромности генератора. В случае, когда $\gamma\rho \geq 1$, система склонна к внутренней неустойчивости, так как любые изменения режима неограниченно возрастают.

Объёмные диаграммы, поясняющие отмеченные особенности зависимостей нормированных коэффициентов автодинного усиления $k_{\text{на}}$ и девиации частоты $l_{\text{на}}$ от величин коэффициентов неизохронности γ и неиздромности ρ , представлены на рис. 2.2. Аналогичные зависимости нормированного коэффициента автодетектирования $k_{\text{н0}}$ от величин коэффициентов неизохронности γ и неиздромности ρ представлены на рис. 2.3 в виде объёмных диаграмм, рассчитанных при различных значениях коэффициента частотного детектирования $\kappa_{\text{чд}}$: (а) – $\kappa_{\text{чд}} = -1$; (б) – $\kappa_{\text{чд}} = 0$; (в) – $\kappa_{\text{чд}} = 1$.

Из диаграмм рисунка 2.2 видно, что коэффициенты γ и ρ имеют сильное влияние на величину автодинной чувствительности. Наибольшее влияние отмечается в случае, когда знаки при коэффициентах γ и ρ одинаковые. В таком случае увеличение коэффициента автодинного усиления $k_{\text{на}}$ по сравнению со случаем издромного генератора, когда $\rho = 0$, можно считать во многих приложениях явлением положительным. Однако при этом соответствующее увеличение амплитуды автодинной девиации частоты (вследствие роста $l_{\text{на}}$) является нежелательным, поскольку это способствует, как показано ниже, увеличению уровня искажений автодинного отклика. При приближении произведения $\gamma\rho$ к единице коэффициенты $k_{\text{на}}$ и $l_{\text{на}}$ стремятся к бесконечности.

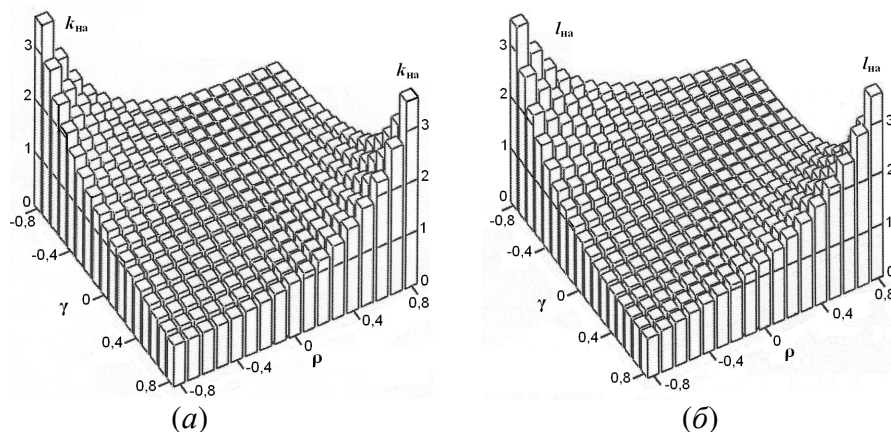


Рис. 2.2. Объёмные диаграммы зависимостей нормированных коэффициентов автодинного усиления $k_{\text{на}}$ (а) и девиации частоты $l_{\text{на}}$ (б) от величин коэффициентов γ и ρ .

Из диаграмм рисунка 2.3 видно, что при отсутствии частотного детектирования, когда $\kappa_{\text{чд}} = 0$ (см. диаграмму (б)), зависимость $k_{\text{н0}} = k_{\text{н0}}(\gamma, \rho)$ аналогична зависимости $k_{\text{на}} = k_{\text{на}}(\gamma, \rho)$ (см. рис. 2.2,(а)). Наличие явления частотного детектирования в АД вызывает появление

существенной асимметрии в диаграмме, которая зависит от величины и знака коэффициента $\kappa_{\text{зд}}$. При положительном значении $\kappa_{\text{зд}}$ значительный рост величины $k_{\text{н0}}$ отмечается в области, где коэффициенты неизохронности γ и неизодромности ρ АГ одновременно отрицательны. При отрицательном значении $\kappa_{\text{зд}}$ данный рост отмечается в области одновременно положительных коэффициентов γ и ρ . В первом случае преобладающими в процессе автодетектирования является явление неизохронности, а во втором – неизодромности. Такая неравномерность величины $k_{\text{н0}}$ в зависимости от значений коэффициентов γ и ρ может достигать величины порядка десяти и более дБ.

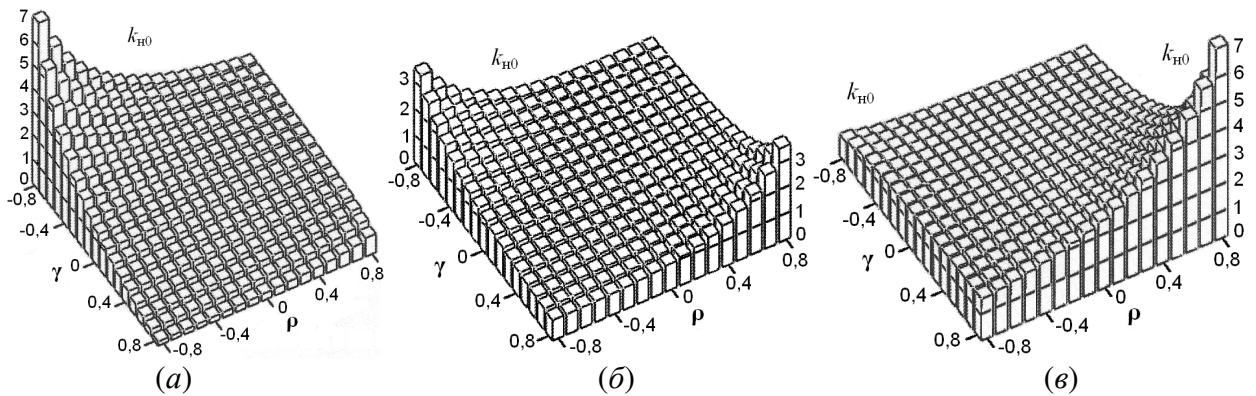


Рис. 2.3. Объёмные диаграммы зависимостей нормированного коэффициента автодетектирования $k_{\text{н0}}$ от величин коэффициентов γ и ρ

2.4. Автодинные характеристики СВЧ и КВЧ генераторов

Рассмотрим теперь влияние внутренних параметров АД на нормированные автодинные характеристики, выражения для которых из (2.25) – (2.27) перепишем в виде:

$$i_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = i(\tau_{\text{н}}) / a_{0\text{м}} = \cos[\delta(\tau_{\text{н}}) - \psi_0], \quad (2.29)$$

$$a_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = a_1(\tau_{\text{н}}) / a_{1\text{м}} = \cos[\delta(\tau_{\text{н}}) - \psi_1], \quad (2.30)$$

$$\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}) = \chi(\tau_{\text{н}}) / \chi_{\text{м}} = -\sin[\delta(\tau_{\text{н}}) + \theta], \quad (2.31)$$

$$\delta(\tau_{\text{н}}) = 2\pi\tau_{\text{н}} - C_{\text{oc}} \sin[\delta(\tau_{\text{н}}) + \theta], \quad (2.32)$$

где $i_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ – характеристика автодетектирования АД (сокращённо ХАД); $a_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ – амплитудная характеристика АД (АХА); $\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ – частотная характеристика АД (ЧХА); $\delta(\tau_{\text{н}})$ – фазовая характеристика АД (ФХА); $C_{\text{oc}} = \chi_{\text{м}} \omega_0 \tau = 2\pi N \Gamma L_{\text{a}}$ – упоминавшийся выше параметр внешней обратной связи автодинной системы.

Как видно из (2.32), данное трансцендентное уравнение относительно фазы $\delta(\tau_{\text{н}})$ явно не разрешается. Решение таких уравнений обычно находится методом последовательных

приближений, суть которого состоит в последовательной подстановке в правую часть вместо фазы $\delta(\tau_n)$ её приближённых значений $\delta(\tau_n) = 2\pi\tau_n$ до получения приемлемой точности вычислений. В общем виде решение k -го приближения этим методом для уравнения (2.32) имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(\tau_n)_{(k)} = & (2\pi\tau_n)_{(0)} - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(1)} + \theta - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(2)} + \theta - \dots \\ & \dots - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + \theta] \dots], \end{aligned} \quad (2.33)$$

где индексами в круглых скобках около слагаемых $(2\pi\tau_n)$ обозначен порядок приближения.

Нулевому приближению в (2.33) соответствует линейная фазовая характеристика, которая характерна для гомодинных СБРЛ. Последующие приближения вносят нелинейность в эту зависимость, что является атрибутом автодинных систем и обусловлено автодинными изменениями частоты.

Беря производную от выражения (2.33) по нормированному времени τ_n получим выражение k -го приближения для фазового портрета АД [18,52,85]:

$$\begin{aligned} d\delta(\tau_n)_{(k)} / d\tau_n = \Omega_a(\tau_n)_{(k)} = & 2\pi - C_{oc} \{ \cos[(2\pi\tau_n)_{(1)} + \theta - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(2)} + \theta - \dots - \\ & - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + \theta] \dots] \} \times \{ 2\pi - C_{oc} \cos[(2\pi\tau_n)_{(2)} + \theta - \dots - C_{oc}\sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + \theta] \dots] \} \times \dots \times \\ & \times \{ 2\pi - C_{oc} \{ \cos[(2\pi\tau_n)_{(k)} + \theta] \dots \} \}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

Физический смысл величины $\Omega_a(\tau_n)$ в выражении (2.34) – мгновенная разность частот между излучёнными и отражёнными колебаниями на внешней нагрузке автодинного генератора.

Рассчитанные с помощью математического пакета MathCAD согласно (2.33), (2.34) при различных значениях коэффициентов γ , ρ и параметра внешней обратной связи C_{oc} фазовые характеристики $\delta(\tau_n)$ и их производные $\Omega_a(\tau_n)$ представлены на рисунке 2.4. Характеристики рассчитывались при различных значениях коэффициентов γ и ρ : а). $\gamma = \rho = 0$; б). $\gamma = 0,8$ и $\rho = 0,25$; в). $\gamma = -0,8$ и $\rho = -0,25$; г). $\gamma = -0,8$ и $\rho = 0,25$.

Результаты расчётов согласно выражениям (2.29) – (2.31) автодинных характеристик ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_n(\tau_n)$ и ХАД $i_n(\tau_n)$ представлены на рисунках 2.5, (а) – (г). Данные характеристики рассчитывались при $Q_{вн} = 100$; $N = 8000$ и различных значениях коэффициентов γ , ρ и $\kappa_{чд}$: а) – $\gamma = \rho = 0$, $\kappa_{чд} = 0$; б) – $\gamma = 0,8$, $\rho = 0,25$, $\kappa_{чд} = 0,5$; в) – $\gamma = -0,8$, $\rho = -0,25$, $\kappa_{чд} = 0,5$; г) – $\gamma = -0,8$, $\rho = 0,25$, $\kappa_{чд} = 0,5$.

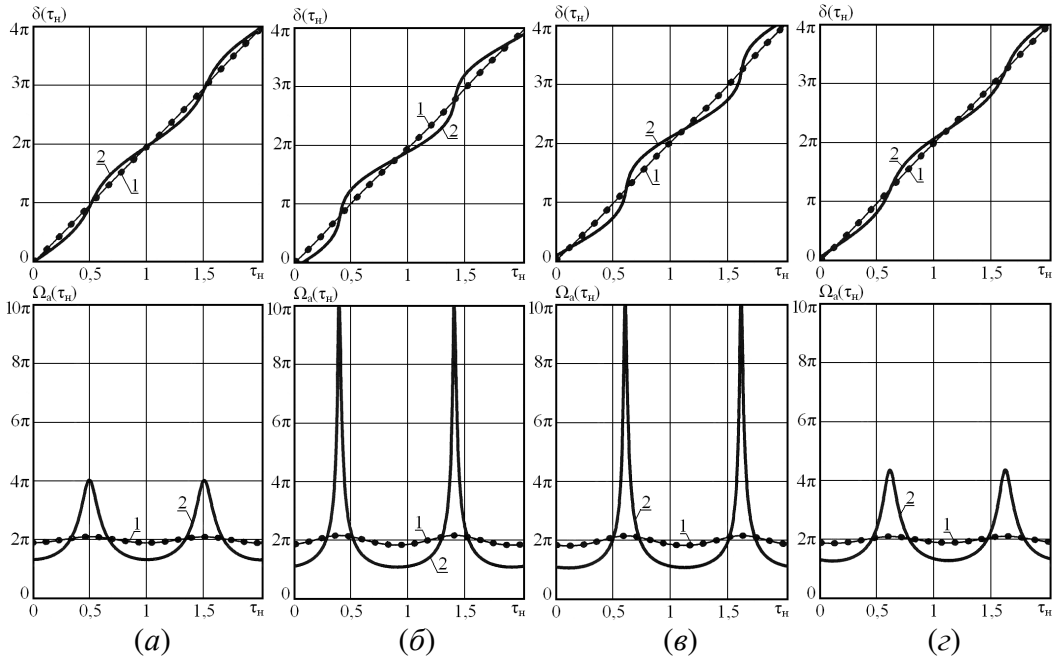


Рис. 2.4. Фазовые характеристики $\delta(\tau_n)$ и их производные $\Omega_a(\tau_n)$ для случаев, когда $C_{oc} = 0,08$ (кривые 1) и $C_{oc} = 0,8$ (кривые 2).

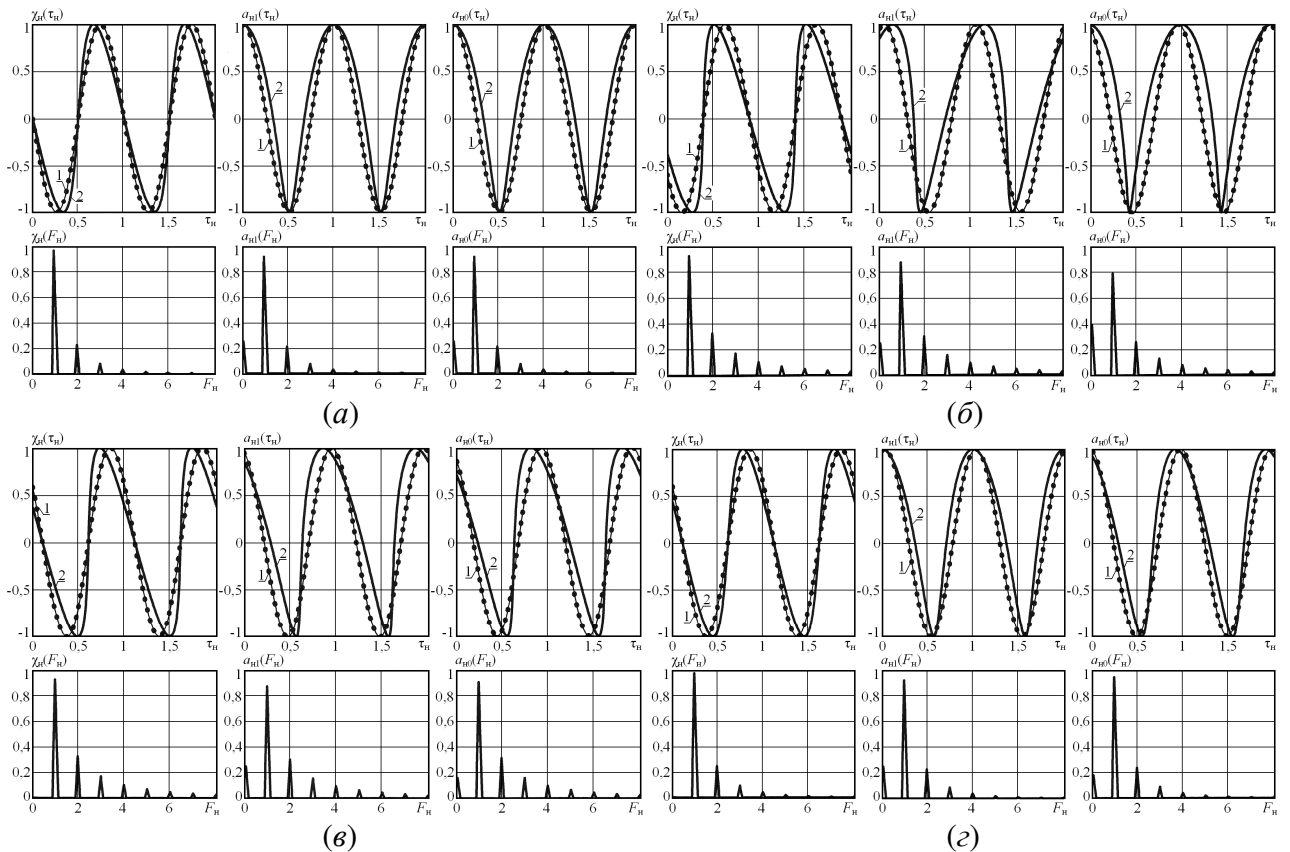


Рис. 2.5. ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_n(\tau_n)$, ХАД $i_n(\tau_n)$ и их спектрограммы, рассчитанные для двух вариантов величины коэффициента отражения: $\Gamma=0,0001$ (кривые 1) и $\Gamma=0,001$ (кривые 2).

На рисунках 2.4 и 2.5 построение характеристик выполнено в зависимости от нормированного времени τ_n в предположении его линейного и положительного изменения

(удаляющийся отражатель). Для случая, когда величина $\Gamma = 0,001$, выполнено разложение функций $\chi_n(\tau_n)$, $a_n(\tau_n)$ и $i_n(\tau_n)$ в гармонический ряд Фурье, результаты которого и на рисунках 5, (а) – (з) представлены в виде соответствующих спектральных диаграмм $\chi_n(F_n)$, $a_n(F_n)$ и $i_n(F_n)$.

Графики зависимостей коэффициентов гармоник K_χ и K_Γ , величины параметра обратной связи C_{oc} , а также уровня гармонических составляющих (с 1 по 5) спектров автодинного отклика по изменению частоты $\chi_n(F_n)$ (а) и амплитуды $a_n(F_n)$ (б) колебаний, а также постоянной составляющей отклика $a_n(0)$ от величины модуля коэффициента отражения Γ представлены на рисунке 2.6. При этом на рисунке 2.6, (а) кривые построены для изохронного генератора, а на рисунке 2.6, (б) – для неизохронного генератора. Расчёты выполнялись при $Q_{вн} = 100$, $N = 3000$ и различных величинах коэффициентов γ и ρ : (а) – $\gamma = \rho = 0$; (б) – $\gamma = \pm 1,5$ и $\rho = \pm 0,1$. Ход кривых на графиках рисунка 6, (а) обрывается при значении $\Gamma = 0,005$, а на рисунке 6, (б) – при $\Gamma = 0,003$, поскольку с дальнейшим увеличением модуля коэффициента отражения Γ возникают периодические скачки в мгновенных значениях автодинного отклика.

Из анализа представленных на рисунках 2.4 и 2.5 характеристик следует, что в пределах каждого периода автодинного отклика автодинные изменения частоты $\chi_n(\tau_n)$ (см. рис. 2.5) вызывают неравномерность набега фазы $\delta(\tau_n)$ отражённой волны (см. рис. 2.4). Начальный угол фазового смещения θ этих неравномерностей на ФХА определяется только величиной коэффициента неизохронности γ , а амплитуда отклонения набега фазы от линейной зависимости – величиной параметра обратной связи C_{oc} . Скорость изменения фазового набега, характеризуемая как мгновенная разность частот $\Omega_a(\tau_n)$ излучённого и отражённого колебаний, при этом приобретает осциллирующий характер с формированием «пиков» мгновенной частоты. Высота пиков возрастает с увеличением параметра C_{oc} , который, в свою очередь, зависит от внутренних параметров генератора (32). Отметим, что данные осцилляции мгновенной частоты $\Omega_a(\tau_n)$ наблюдаются при сохранении её среднего значения, равного частоте сигнала гомодинной доплеровской СБРЛ (в данном случае $\Omega_a(\tau_n) = 2\pi$).

Из полученных графиков рисунков 2.5 и 2.6 видно, что при «слабом» отражённом сигнале, когда параметр внешней обратной связи $C_{oc} \ll 1$, автодинный отклик является гармоническим (см. кривые 1), при этом изменения частоты и амплитуды автоколебаний, а также сигнала

автодетектирования отличаются лишь углами относительного фазового смещения θ , ψ_1 и ψ_0 соответственно. При увеличении коэффициента отражений Γ и, соответственно, параметра обратной связи C_{oc} , когда он сравним с единицей, наблюдаются ангармонические искажения сигналов (см. кривые 2). При этом характер изменений частоты приобретает пилообразный вид, слабо зависящий от величины коэффициентов γ и ρ ; изменяется преимущественно абсолютное значение максимальной величины автодинной девиации частоты. При этом изменения амплитуды колебаний $a_n(\tau_n)$ и сигнала автодетектирования $i_n(\tau_n)$ имеют принципиально иной характер искажений. Как видно из диаграмм рисунка 2.5, характер искажения этих компонентов отклика проявляются в появлении эффекта «наклона» волн в ту или иную сторону в зависимости от соотношения величин коэффициентов γ и ρ . Кроме того, наклон волн зависит, как впервые показано в работах [8, 9], также от направления перемещения отражателя. Хотя в последнем случае амплитуда автодинных изменений также относительно мала по сравнению с амплитудой колебаний, однако вследствие качественных изменений в поведении сигнала условно назовём его здесь случаем «сильного» сигнала.

В случае изохронного и изодромного генератора, у которого коэффициенты γ и ρ пренебрежимо малы и отсутствует частотное детектирование ($\kappa_{чд} = 0$), форма автодинных изменений амплитуды $a_n(\tau_n)$ и сигнала автодетектирования $i_n(\tau_n)$ практически симметрична и не зависят от направления перемещения отражателя (см. рис 2.5 (а)). В гипотетическом случае генератора, у которого коэффициенты $\gamma = \rho = 0$, но имеет место частотное детектирование ($\kappa_{чд} \neq 0$), эффект наклона волн проявляется только у сигнала автодетектирования. При этом направление наклона также зависит от знака коэффициента $\kappa_{чд}$.

Причиной ангармонических искажений автодинных характеристик ЧХА, АХА и ХАД (см. рис. 2.5, (а) – (з)) является, как отмечалось выше, неравномерность фазового набега отражённой волны $\delta(\tau_n)$, обусловленная изменениями частоты, а также наличие относительного фазового смещения между компонентами автодинного отклика. Степень искажений сигналов определяется в наших предположениях только величиной параметра C_{oc} , которая зависит от величины и знака коэффициентов γ и ρ (см. (2.32)). По этой причине параметр внешней обратной связи у неизохронных и неизодромных генераторов достигает своего порогового значения при меньших значениях модуля коэффициента отражения Γ , чем у изохронного генератора (см. рис. 2.6,а, 2.6,б). Это означает также, что динамический диапазон автодинной системы с неизохронным и неизодромных генератора меньше, чем в случае применения в СБРЛ изохронного генератора. Однако при наличии генератора с противоположными знаками при

коэффициентах γ и ρ возможен случай отрицательной внутренней обратной связи, когда в АД за счёт его внутренних свойств наблюдается стабилизация частоты и соответствующее уменьшение параметра C_{oc} .

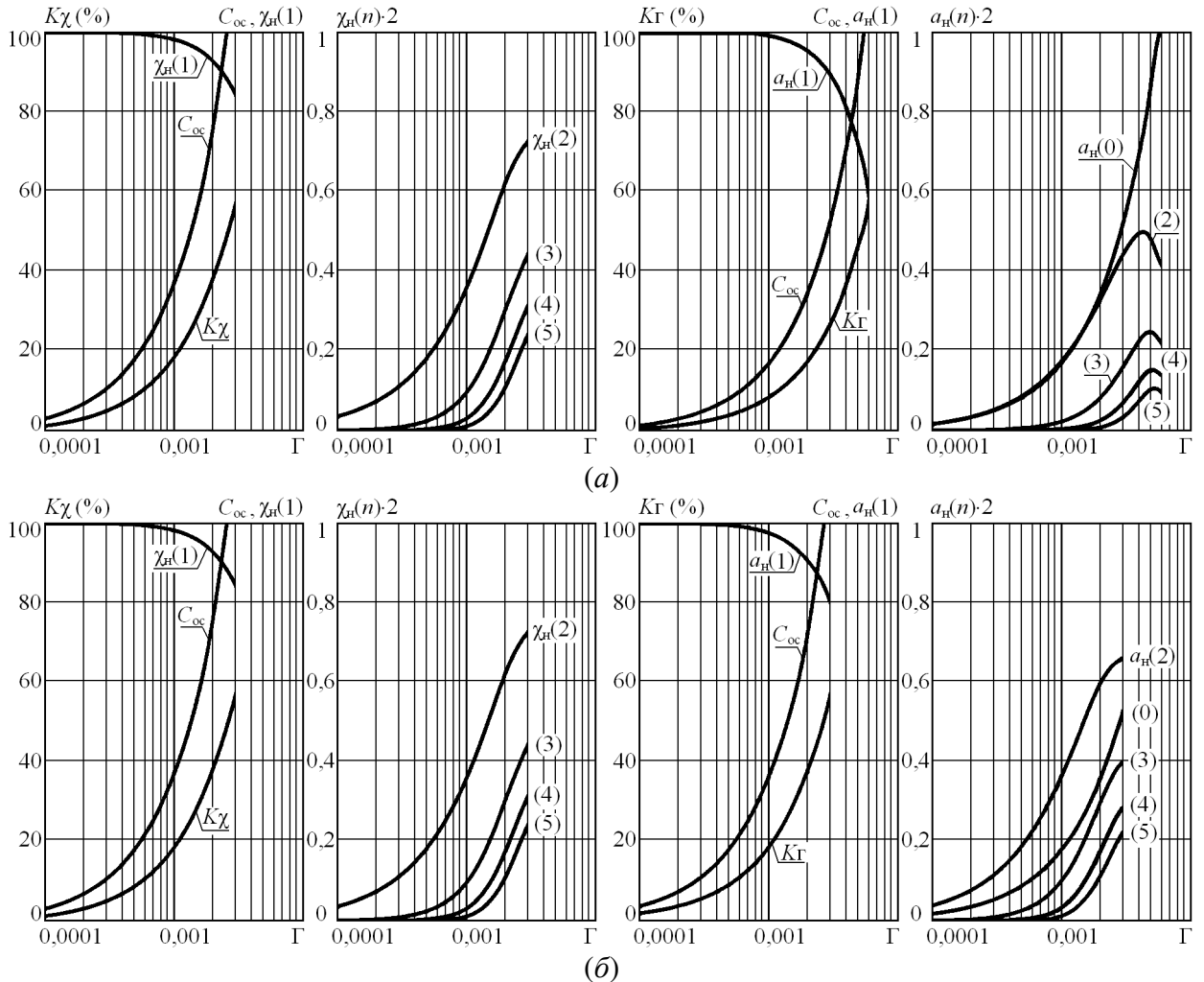


Рис. 2.6. Графики коэффициентов гармоник K_χ и K_Γ , величины параметра обратной связи C_{oc} , а также уровня гармонических составляющих (с 1 по 5) спектров автодинного отклика по изменению частоты $\chi_n(F_n)$ (а) и амплитуды $a_n(F_n)$ (б) колебаний, а также среднего значения $a_n(0)$ от величины модуля коэффициента отражения Γ .

Следует особо отметить принципиальные отличия характера искажений ЧХА от характеристик АХА и ХАД которые хорошо видны из кривых на рисунках 5, (а) – (з), рассчитанных при $C_{oc} = 0,8$. У ЧХА полуволны при изменении параметра C_{oc} остаются всегда симметричными с сохранением значений фазы переходов через нуль. Поэтому постоянная составляющая на спектральных диаграммах $\chi_n(F_n)$ отсутствует. Площадь же положительных и отрицательных полувольт АХА и ХАД разная, что указывает на наличие постоянной составляющей автодинного отклика на спектрограммах $a_n(F_n)$ и $i_n(F_n)$, а положение точек

перехода через нуль существенно зависит от величины параметра C_{oc} (см. рис. 2.5, (a) – (z)), т.е. от уровня отражённого сигнала. Причём, наблюдаемое смещение пологого «фронта» волны сигнала при изменении величины C_{oc} имеет обратное направление смещениям крутого фронта.

Резюмируя результаты анализа автодинных характеристик, отметим, что их вид, а также характер поведения существенно зависят от внутренних параметров генератора. К этим параметрам относятся коэффициенты неизохронности γ , неизодромности ρ и частотного детектирования $\kappa_{чд}$. Учёт этих коэффициентов может быть выражен также через соответствующие углы фазового смещения компонентов автодинного отклика: θ , ψ_1 и ψ_0 , что нашло своё отражение в последних формулах выражений (2.29) – (2.31), (2.32). При этом, бесспорно, наиболее интегрированным параметром, характеризующим свойства автодинных сигналов, является параметр внешней обратной связи C_{oc} .

Рассмотренные здесь особенности формирования АХА и ХАД необходимо учитывать в автодинных СБРЛ, при обработке низкочастотных информационных автодинных сигналов.

2.5. Особенности амплитудно-частотных характеристик автодинов

Совместно с рассмотренными выше характеристиками для удобства представления свойств автодинных генераторов возможно использование также амплитудно-частотных характеристик¹ (АЧХ), отражающих взаимную связь ЧХА и АХА [10, 18, 30]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) строится в декартовой системе координат $a_{н1}(\tau_n)$, $\chi_n(\tau_n)$ на основании параметрических уравнений (2.30), (2.31). Аналогичную характеристику можно построить исходя из уравнений (2.29) и (2.31) в системе координат $i_n(\tau_n)$, $\chi_n(\tau_n)$, как характеристика «автодетекторно-частотная» (ХАЧ). Форма этих характеристик – эллипс, проекции которого на оси $a_{н1}(\tau_n)$ и $\chi_n(\tau_n)$ в зависимости от нормированного времени τ_n дают соответствующие ЧХА, АХА и ХАД. По сути своей АЧХ и ХАЧ представляют собой фазовые портреты системы, поскольку любая (изображающая) точка на этих кривых отображает состояние автодинной системы «генератор – отражающий объект» на интервале, кратном $0 < \tau_n < 1$.

При построении АЧХ и ХАЧ в декартовой системе координат параметром является текущая фаза $\delta(\tau_n)$, которая описывается трансцендентным уравнением (2.33).

¹ Данная характеристика известна в теории СВЧ генераторов как «эллипс затягивания» [96].

Параметрические выражения для радиус-векторов $R_{\vartheta_0}(\tau_n)$, $R_{\vartheta_1}(\tau_n)$ и текущих углов $\Phi_{\vartheta_0}(\tau_n)$, $\Phi_{\vartheta_1}(\tau_n)$, описывающих эллипсы ХАЧ и АЧХ в декартовой системе координат, легко получить используя известные формулы перехода к полярной системе координат (стр. 59, [116]):

$$R_{\vartheta_0}(\tau_n) = \sqrt{a_{n0}^2(\tau_n) + \chi_n^2(\tau_n)}; R_{\vartheta_1}(\tau_n) = \sqrt{a_{n1}^2(\tau_n) + \chi_n^2(\tau_n)}; \quad (2.35)$$

$$\Phi_{\vartheta_0}(\tau_n) = \arctg \frac{a_{n0}(\tau_n)}{\chi_n(\tau_n)}; \Phi_{\vartheta_1}(\tau_n) = \arctg \frac{a_{n1}(\tau_n)}{\chi_n(\tau_n)}. \quad (2.36)$$

Амплитудно-частотные характеристики $a_{n1}(\chi_n)$ и характеристики автодетекторно-частотные $i_n(\chi_n)$ нормированного отклика автодинного АГ представлены на рис. 2.7. Данные характеристики рассчитывались в соответствии с выражениями (2.25) – (2.27) при $C_{oc} = 0,8$ (а) – (д) и $C_{oc} = 0,08$ (е) и различных значениях параметров γ , ρ и $\kappa_{чд}$: $\gamma = \rho = \kappa_{чд} = 0$ (а); $\gamma = 0,8$, $\rho = 0,4$, $\kappa_{чд} = 0,2$ (б); $\gamma = -0,8$, $\rho = -0,4$, $\kappa_{чд} = -0,2$ (в); $\gamma = 0,8$, $\rho = -0,4$, $\kappa_{чд} = -0,2$ (г); $\gamma = 0,8$, $\rho = -0,4$, $\kappa_{чд} = 0,2$ (д); $\gamma = 0,8$, $\rho = -0,4$, $\kappa_{чд} = 0,2$ (е). При этом на рис. 2.7, (а) приведены характеристики изохронного генератора, у которого $\gamma = \rho = \kappa_{чд} = 0$, а на остальных – для различных случаев неизохронного $\gamma \neq 0$ и неизодромного $\rho \neq 0$ генератора, имеющего различные значения коэффициента частотного смещения $\kappa_{чд} \neq 0$. Жирными точками на кривых АЧХ и ХАЧ отмечены положения изображающих точек при их перемещении в процессе изменения τ_n через интервалы, равные одной десятой периода автодинного отклика.

Результаты расчётов в соответствии с выражениями (2.35), (2.36) величин $R_{\vartheta_1}(\tau_n)$ и $\Phi_{\vartheta_1}(\tau_n)$ для случаев изохронного генератора (кривые 1), а также неизохронного и неизодромного генератора (кривые 2) представлены на рис. 2.8 при различных величинах параметра внешней обратной связи C_{oc} : $C_{oc} = 0,08$ (см. рис. 2.8, (а)) и $C_{oc} = 0,8$ (см. рис. 2.8, (б)). Кроме того, на этом же рисунке представлены графики производных $\Omega_{\vartheta_1}(\tau_n) = d[\Phi_{\vartheta_1}(\tau_n)]/d\tau_n$, которые характеризуют угловую скорость движения изображающих точек.

Из характеристик на рисунке 2.7 видно, что в случае изохронного и изодромного генератора (см. рис. 2.7, (а)) АЧХ и ХАЧ имеют форму круга, а в случае неизохронного (неизодромного) – эллипс, с «левым» наклоном при $\gamma > 0$ ($\rho > 0$) (см. рис. 2.7, (б)) и с «правым» наклоном при $\gamma < 0$ ($\rho < 0$) (см. рис. 2.7, (в)). В случае разных знаков при коэффициентах γ и ρ , ширина эллипса АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ увеличивается, а в случае одинаковых – уменьшается (см. рис. 2.7, (б) – (г)). Если коэффициент частотного смещения $\kappa_{чд} = 0$, то ХАЧ

$i_n(\chi_n)$ повторяет вид АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ (см. рис. 2.7, (а)). В случае, когда $\kappa_{\text{чд}} \neq 0$, ширина эллипса ХАЧ $i_n(\chi_n)$ может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению с эллипсом АЧХ $a_{n1}(\chi_n)$ в зависимости от величины коэффициента $\kappa_{\text{чд}}$ и соотношения знаков при коэффициентах γ , ρ и $\kappa_{\text{чд}}$ (см. рис. 2.7, (б) – (д)). При этом в гипотетическом случае изохронного и изодромного генератора, у которого параметры $\gamma = \rho = 0$, но обладающего частотным детектированием ХАЧ $i_n(\chi_n)$ также имеет «левый» наклон при $\kappa_{\text{чд}} > 0$ и «правый» – при $\kappa_{\text{чд}} < 0$. С увеличением τ_n (отражатель движется от АД) изображающая точка перемещается по эллипсу против часовой стрелки.

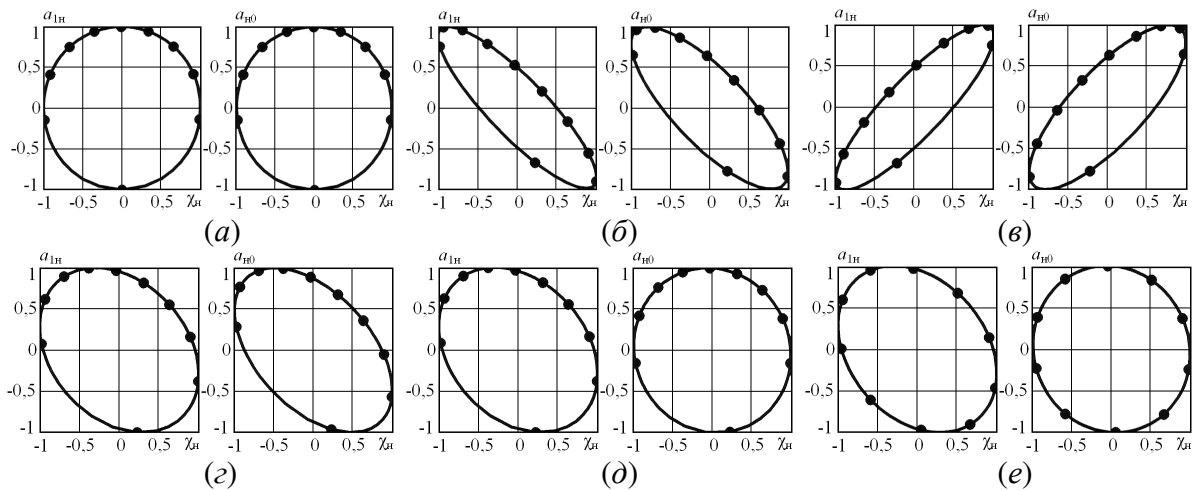


Рис. 2.7. Амплитудно-частотные характеристики $a_{n1}(\chi_n)$ и характеристики автодетекторно-частотные $i_n(\chi_n)$ нормированного отклика АД

В случае «сильного» отражённого сигнала, когда величина параметра внешней обратной связи C_{oc} соизмерима с единицей, скорость перемещения этой точки неравномерна, что хорошо видно по интервалам между точками на образующих эллипсов (см. рис. 2.7, (а) – (д)), а также из графиков $\Phi_{\text{з1}}(\tau_n)$ и $\Omega_{\text{з1}}(\tau_n)$ на рис. 2.8, (б). С увеличением параметра C_{oc} эта скорость возрастает на нижней стороне эллипса и уменьшается – на верхней (см. кривую 2 на рис. 2.8, (б)).

В случае «слабого» сигнала, когда величина параметра искажений $C_{\text{oc}} \ll 1$, движение изображающей точки становится более равномерным (см. рис. 2.7, (е) и рис. 2.8, (а)). При этом необходимо отметить, что форма эллипса не зависит от величины параметра обратной связи C_{oc} , а определяется лишь внутренними параметрами генератора, т.е. величинами коэффициентов γ , ρ и $\kappa_{\text{чд}}$ (см. рис. 2.7, (а) – (е)). Проведенные исследования показали также,

что направление движения изображающей точки становится обратным при движении отражателя к АД.

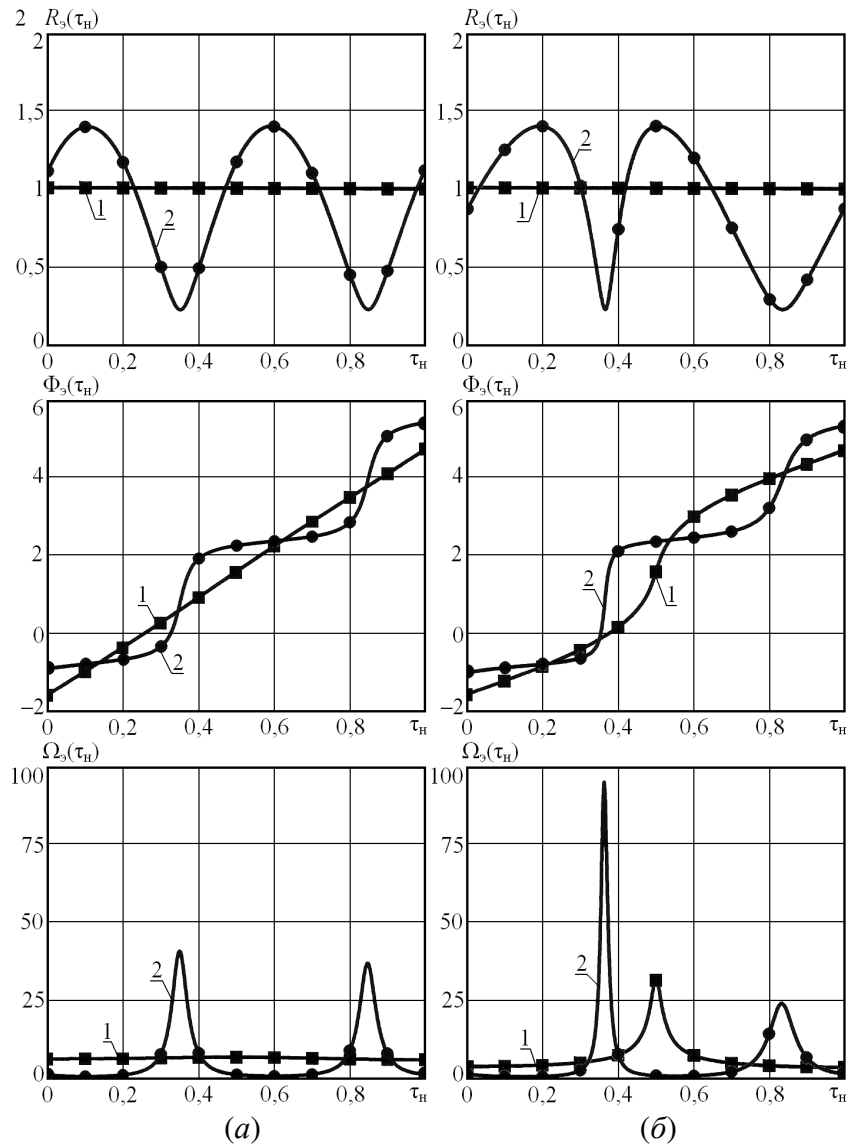


Рис. 2.8. Характеристики радиус-векторов $R_{\vartheta_1}(\tau_H)$, текущих углов $\Phi_{\vartheta_1}(\tau_H)$ и производной $\Omega_{\vartheta_1}(\tau_H)$, рассчитанные при $\gamma = \rho = 0$ (кривые 1), $\gamma = 1$, $\rho = 0,5$ (кривые 2) для различных значений C_{oc} : $C_{oc} = 0,08$ (a) и $C_{oc} = 0,8$ (б).

Радиус-вектор $R_{\vartheta_1}(\tau_H)$ для изохронного и изодромного генератора ($\gamma = \rho = 0$) имеет постоянную величину, равную единичному радиусу круга (см. кривые 1 на рис. 2.8). В случаях неизохронных ($\gamma \neq 0$) и неизодромных ($\rho \neq 0$) генератора длина радиус-вектора является переменной за период автодинного отклика (см. кривые 2 на рис. 2.8). Из анализа этих кривых на нахождение точек экстремума из (2.35) с учётом (2.36) получим выражения для размеров больших a_{ϑ_1} , a_{ϑ_0} и малых b_{ϑ_1} , b_{ϑ_0} полуосей эллипсов ХАЧ и АЧХ соответственно:

$$a_{\vartheta_0} = \sqrt{1 + \sin(\theta + \psi_0)} = \sqrt{1 + \frac{\gamma + \kappa_{\text{чд}}}{\sqrt{(1 + \kappa_{\text{чд}}^2)(1 + \gamma^2)}}}, \quad (2.37a)$$

$$b_{\vartheta_0} = \sqrt{1 - \sin(\theta + \psi_0)} = \sqrt{1 - \frac{\gamma + \kappa_{\text{чд}}}{\sqrt{(1 + \kappa_{\text{чд}}^2)(1 + \gamma^2)}}};$$

$$a_{\vartheta_1} = \sqrt{1 + \sin(\theta + \psi_1)} = \sqrt{1 + \frac{\gamma + \rho}{\sqrt{(1 + \rho^2)(1 + \gamma^2)}}}, \quad (2.37б)$$

$$b_{\vartheta_1} = \sqrt{1 - \sin(\theta + \psi_1)} = \sqrt{1 - \frac{\gamma + \rho}{\sqrt{(1 + \rho^2)(1 + \gamma^2)}}}.$$

Используя (2.37a), (2.37б) и известные канонические уравнения для кривых второго порядка (стр. 72, [116]), находим выражения для расчёта площади эллипсов ХАЧ S_{ϑ_0} и АЧХ S_{ϑ_1} , их эксцентриситетов $\varepsilon_{\vartheta_0}$ и $\varepsilon_{\vartheta_1}$, а также уравнения эллипсов в полярных координатах $R_{\vartheta_0}(\Phi_{\vartheta_0})$ и $R_{\vartheta_1}(\Phi_{\vartheta_1})$:

$$S_{\vartheta_0} = \pi a_{\vartheta_0} b_{\vartheta_0} = \pi \cos(\theta + \psi_0) = \frac{\pi(1 - \gamma \kappa_{\text{чд}})}{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \kappa_{\text{чд}}^2)}}; \quad (2.38a)$$

$$S_{\vartheta_1} = \pi a_{\vartheta_1} b_{\vartheta_1} = \pi \cos(\theta + \psi_1) = \frac{\pi(1 - \gamma \rho)}{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \rho^2)}}; \quad (2.38б)$$

$$\varepsilon_{\vartheta_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{b_{\vartheta_0}}{a_{\vartheta_0}}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1 - \sin(\theta + \psi_0)}{1 + \sin(\theta + \psi_0)}} = \left(1 - \frac{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \kappa_{\text{чд}}^2)} - \gamma - \kappa_{\text{чд}}}{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \kappa_{\text{чд}}^2)} + \gamma + \kappa_{\text{чд}}}\right)^{1/2}; \quad (2.39a)$$

$$\varepsilon_{\vartheta_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{b_{\vartheta_1}}{a_{\vartheta_1}}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1 - \sin(\theta + \psi_1)}{1 + \sin(\theta + \psi_1)}} = \left(1 - \frac{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \rho^2)} - \gamma - \rho}{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \rho^2)} + \gamma + \rho}\right)^{1/2}; \quad (2.39б)$$

$$R_{\vartheta_0} = \sqrt{\frac{b_{\vartheta_0}^2}{1 - \varepsilon_{\vartheta_0}^2 \cos^2 \Phi_{\vartheta_0}}}; \quad R_{\vartheta_1} = \sqrt{\frac{b_{\vartheta_1}^2}{1 - \varepsilon_{\vartheta_1}^2 \cos^2 \Phi_{\vartheta_1}}}. \quad (2.40)$$

Результаты расчёта по формулам (2.37б) зависимостей длин большой a_{ϑ_1} и малой b_{ϑ_1} полуосей эллипсов АЧХ от величины параметров неизохронности γ и неизодромности ρ генератора в виде объёмных диаграмм представлены соответственно на рис. 2.9, (а) и 2.9, (б). Результаты аналогичных вычислений по формулам (2.37a) для a_{ϑ_0} и b_{ϑ_0} , но при различных значениях коэффициента частотного детектирования $\kappa_{\text{чд}}$, представлены на рис. 2.10, (а) – (в). Результаты вычислений эллипсов в полярной системе координат на примере АЧХ $R_{\vartheta_1}(\Phi_{\vartheta_1})$ по формулам (2.39) с учётом (2.37б) и (2.39б) при различных значениях коэффициентов неизохронности γ и неизодромности ρ генератора представлены на рис. 2.11.

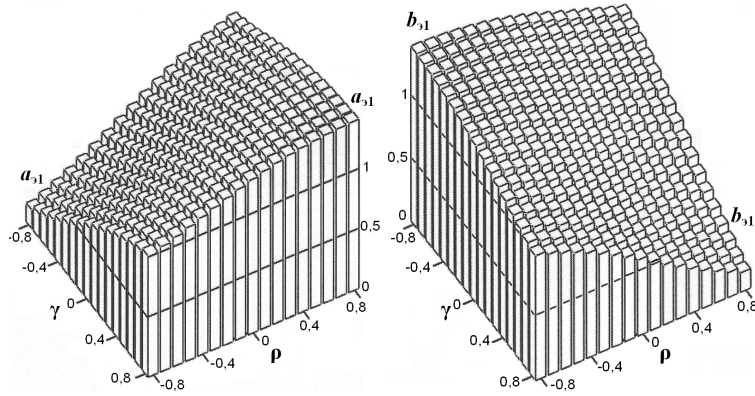


Рис. 2.9. Объёмные диаграммы зависимостей длин большой a_{31} и малой b_{31} полуосей эллипсов АЧХ от величины параметров неизохронности γ и неизодромности ρ генератора.

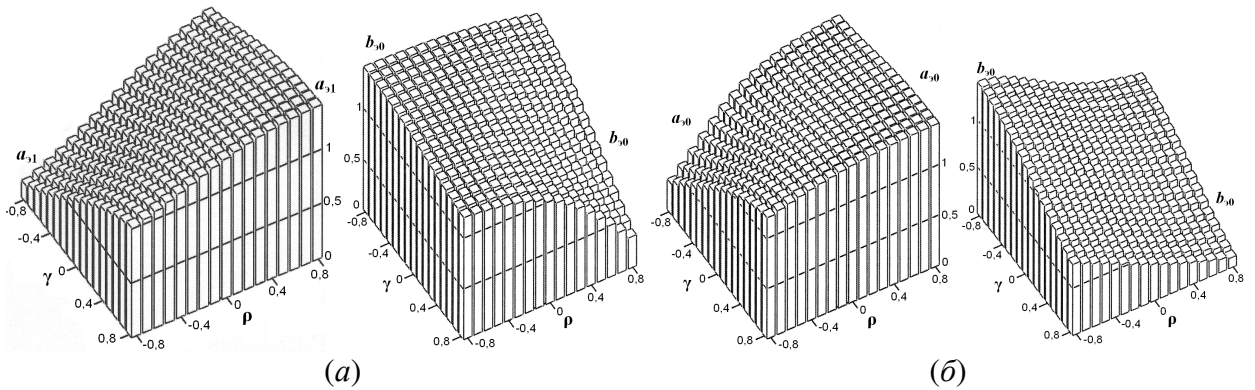


Рис. 2.10. Объёмные диаграммы зависимостей длин большой a_{30} и малой b_{30} полуосей эллипсов ХАЧ от величины параметров неизохронности γ и неизодромности ρ генератора, рассчитанные при различных величинах коэффициента частотного смещения $\kappa_{чд}$: $\kappa_{чд} = 0,5$ (а) и $\kappa_{чд} = -0,5$ (б).

Отметим, что диаграммы для полуосей a_{30} и b_{30} в случае $\kappa_{чд} = 0$ полностью совпадают с диаграммами для полуосей a_{31} и b_{31} , представленными на рис. 2.9. Из приведенных на рисунках 2.9 и 2.10 диаграмм видно, что форма эллипсов может изменяться в пределах от круга с радиусом $R_{30} = R_{31} = 1$ до отрезка прямых с полудлиной $R_{30} = R_{31} = 2^{1/2}$. Из анализа выражений (2.38) следует, что в первом случае должны выполняться условия: $\theta = -\psi_0$, $\theta = -\psi_1$ или $\gamma = -\kappa_{чд}$, $\gamma = -\rho$, а во втором, когда эллипсы сливаются в линию: $\theta + \psi_0 = \pm\pi/2$, $\theta + \psi_1 = \pm\pi/2$ или $\gamma = 1/\kappa_{чд}$, $\gamma = 1/\rho$. Первый случай, как показано выше, возможен для изохронных генераторов, у которых $\gamma = \rho = 0$. Для неизохронных генераторов АЧХ и ХАЧ имеют форму круга в случае, когда коэффициенты γ , ρ или γ , $\kappa_{чд}$ равны между собой, но противоположны по знаку.

Во втором случае параметры γ , ρ или γ , $\kappa_{чд}$ должны иметь одинаковые знаки, но произведение их величин $\gamma\rho = 1$ или $\gamma\kappa_{чд} = 1$. При этом большая и малая оси эллипсов могут

меняться местами, в зависимости от величины и знака параметров γ , ρ или γ , $\kappa_{\text{зд}}$. Из характеристик рисунка 2.11 с учётом диаграмм рисунка 2.9 видно динамику изменения размеров эллипса в зависимости от величин коэффициентов γ и ρ .

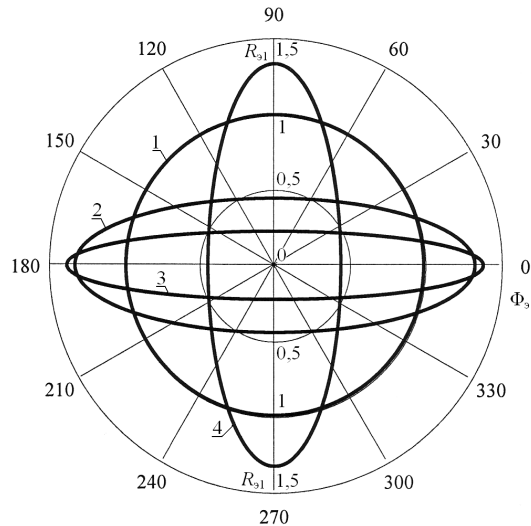


Рис. 2.11. Амплитудно-частотные характеристики автодинного СВЧ генератора, построенные в полярных координатах $R_{s1}(\Phi_{s1})$ при различных величинах коэффициентов γ и ρ : $\gamma = \rho = 0$ (кривая 1); $\gamma = 0,5$, $\rho = 0,5$ (кривая 2); $\gamma = 0,5$, $\rho = 1$ (кривая 3); $\gamma = -0,5$, $\rho = -0,5$ (кривая 4).

Таким образом, из выполненных в настоящем разделе исследований следует, что между внутренними параметрами автодинных генераторов и видом АЧХ и ХАЧ имеется однозначная зависимость, позволяющая, в принципе, по результатам полученных характеристик решать обратную задачу по определению внутренних параметров исследуемых АД.

2.7. Выводы

Разработана математическая модель одноконтурного автодинного генератора в виде системы линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающей поведение АД в условиях одновременного воздействия на него слабого отражённого от объекта излучения и собственных шумов.

На основе полученных уравнений выполнен анализ условий внутренней и внешней устойчивости функционирования автодинной системы «генератор – отражающий объект». Из сформулированных условий следует, что кроме общеизвестного требования к знаку параметра прочности предельного цикла генератора, необходимо чтобы в случае одинаковых знаков при коэффициентах неизохронности и неизодромности, их произведение было меньше единицы. Параметр внешней обратной связи АД также не должен превышать единицу для выполнения условий устойчивости.

Результатом теоретических исследований являются полученные зависимости основных параметров автодинных СВЧ генераторов: коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты; автодинные характеристик; параметр внешней обратной связи – от внутренних свойств этих генераторов. При этом установлено, что на данные параметры и характеристики существенное влияние оказывает не только параметр внешней обратной связи, но и коэффициент внутренней обратной связи, определяемый как произведение коэффициентов неизохронности и неизодромности генератора.

Для удобства описания процессов в СВЧ генераторах, у которых выражено явление зависимости амплитуды от изменений частоты колебаний, предложено использование нового термина *неизодромный*. Кроме того, показано, что при анализе процесса автодетектирования в автодинном генераторе, в котором одновременно происходят преобразования, как изменений амплитуды, так и частоты колебаний в постоянную составляющую смещения активного элемента, удобно использование коэффициента *амплитудно-частотного смещения*. При анализе отдельных составляющих процесса автодетектирования обосновано использование понятий коэффициентов *амплитудного* и *частотного автодетектирования*.

Показаны особенности формирования амплитудно-частотных и автодетекторно-частотных характеристик автодинов в зависимости от внутренних свойств СВЧ генераторов, а также их связь с частотной и амплитудной характеристиками и характеристикой автодетектирования. Установлено, что в результате анализа особенностей формирования автодинных характеристик при различных уровнях отражённого излучения, либо при различных величинах параметра внешней обратной связи, есть возможность оценки внутренних свойств и параметров генераторов, таких, как коэффициенты неизохронности и неизодромности, а также частотного детектирования.

Глава 3. Шумовые параметры и характеристики автодинов

В данной главе представлены результаты исследований шумовых параметров и характеристик КВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний. Установлены основные зависимости этих параметров и характеристик от внутренних свойств одноконтурных автодинных генераторов. Для этого в разделе 3.1 на базе полученных в главе 2 уравнений, получены основные соотношения для анализа шумовых параметров и характеристик АД. На основе этих выражений в разделах 3.2 и 3.3 выполнен расчёт и анализ шумовых характеристик автономного генератора и находящегося под воздействием отражённого излучения генератора. Результаты проведенного анализа показали связь этих характеристик и условий возникновения периодической нестационарности уровня шумов выходного сигнала. Полученные результаты расчёта шумовых параметров позволили в разделе 3.4 рассчитать динамический диапазон АД. Выводы по главе сформулированы в разделе 3.5.

Основные результаты данных исследований опубликованы в журнальных статьях [31], изложены в материалах научно-технических конференций [36, 37] и представлены в отчёте о НИР [33].

3.1. Основные уравнения для анализа шумовых параметров и характеристик автодинных генераторов

На основе полученных общих выражений (2.15) – (2.17) далее рассмотрим амплитудные и частотные шумы колебаний АД и шум, создаваемый в цепи смещения АЭ. Решая эту систему уравнений методом Крамера, получим:

$$\chi_{\text{шн}}(\tau_{\text{н}}, t) = (\chi/\chi_{\text{м}}) = -\chi_{\text{шн}}(t) - \sin[\delta(\tau_{\text{н}}, t) + \theta], \quad (3.1\text{a})$$

$$a_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}, t) = (a/a_{\text{м}}) = a_{\text{шн}}(t) + \cos[\delta(\tau_{\text{н}}, t) - \psi_1], \quad (3.1\text{б})$$

$$i_{\text{н}}(\tau_{\text{н}}, t) = (i/i_{\text{м}}) = i_{\text{шн}}(t) + \cos[\delta(\tau_{\text{н}}, t) - \psi_0], \quad (3.1\text{в})$$

где $\chi_{\text{шн}}(t)$, $a_{\text{шн}}(t)$, $i_{\text{шн}}(t)$ – составляющие относительного уровня частотного и амплитудного шума соответственно:

$$\chi_{\text{шн}}(t) = [a_{\text{с}}(t) + \gamma a_{\text{с}}(t)]/L_{\text{с/ш}}, \quad (3.2\text{a})$$

$$a_{\text{шн}}(t) = [a_{\text{с}}(t) + \rho a_{\text{с}}(t)]/K_{\text{с/ш}}; \quad (3.2\text{б})$$

$$i_{\text{шн}}(t) = [a_{\text{с}}(t) + \kappa_{\text{см}} a_{\text{с}}(t)]/M_{\text{с/ш}}; \quad (3.2\text{в})$$

$L_{\text{с/ш}}$, $K_{\text{с/ш}}$, $M_{\text{с/ш}}$ – коэффициенты, характеризующие отношение сигнал/шум автодинных изменений частоты и амплитуды:

$$L_{c/ш} = \Gamma \eta \sqrt{1 + \gamma^2}, \quad K_{c/ш} = \Gamma \eta \sqrt{1 + \rho^2}; \quad M_{c/ш} = \Gamma \eta \sqrt{1 + \kappa_{cm}^2}$$

$\delta(\tau_n, t)$ – набег фазы СВЧ излучения за время τ_n :

$$\delta(\tau_n, t) = 2\pi\tau_n - p_{ш}(t) - C_{oc} \sin[\delta(\tau_n, t) + \theta]; \quad (3.3)$$

$p_{ш}(t) = \Delta\omega_{ш}(t)\tau = C_{oc}\chi_{шнн}(t)$ – индекс модуляции фазы, обусловленный частотными шумами АГ;

$\Delta\omega_{ш}(t)$ – шумовая модуляция частоты колебаний генератора:

$$\Delta\omega_{ш}(t) = \frac{\omega_0[a_s(t) + \gamma a_c(t)]}{Q_n(1 - \gamma\rho)}. \quad (3.4)$$

При выполнении условия $C_{oc} < 1$ решение трансцендентного уравнения (3.3) методом последовательных приближений запишем в виде:

$$\begin{aligned} \delta(\tau_n, t)_{(n)} = & [2\pi\tau_n]_{(0)} - p_{ш}(t) - C_{oc} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(1)} - p_{ш}(t) + \theta - C_{oc} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(2)} - p_{ш}(t) + \theta - \dots \\ & - C_{oc} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(n-1)} - p_{ш}(t) + \theta - C_{oc} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(n)} - p_{ш}(t) + \theta\}\dots\}\}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где индексы около квадратных скобок означают порядок приближения.

На основе разработанной математической модели АД на рис. 3.1 представлена структурная схема функциональных связей между его основными характеристиками и параметрами. Пунктирным прямоугольником выделены «блоки», имеющие отношение к собственно генератору, в котором между вариациями амплитуды $a(t, \tau) \equiv a_n(\tau_n, t)$ и частоты $\chi(t, \tau) \equiv \chi_n(\tau_n, t)$ показана внутренняя обратная связь через коэффициенты неизохронности γ и неизодромности ρ , а также квадратурные составляющие $a_c(t)$ и $a_s(t)$ источника внутренних шумов. Блоки k_{01} и $k_{чд}$ выполняют функции амплитудного и частотного детектирования соответственно, результат которого выделяется в цепи смещения АЭ в виде отклика $i(t, \tau) \equiv i_n(\tau_n, t)$.

Остальные элементы схемы характеризуют внешнюю обратную связь «генератор – отражающий объект – генератор» в автодинной системе. Среди этих элементов – модуль коэффициента отражения $\Gamma(t, \tau) \equiv \Gamma$, определяющий совместно с коэффициентами автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a относительные амплитуды a_m и χ_m изменений $a_n(\tau_n, t)$ и $\chi_n(\tau_n, t)$, а также функциональный блок набег фазы отражённого излучения за время τ_n : $\delta(t, \tau) \equiv \delta(\tau_n, t)$. Блок « C_{oc} » на схеме характеризует глубину внешней обратной связи, выполняя операцию произведения двух величин: времени запаздывания $\tau \equiv \tau(t)$ и амплитуды автодинных изменений частоты $\Delta\omega_{ma}$.

Полученные выражения (3.1), (3.5) будут использованы далее при анализе шумовых параметров и характеристик АД.

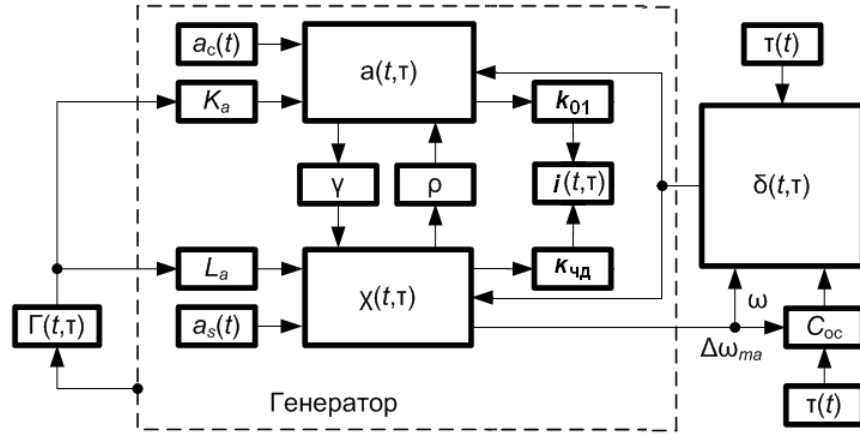


Рис. 3.1. Функциональная схема преобразований сигналов и шумов в АД

3.2. Шумовые параметры автономных генераторов

Используя разработанную математическую модель АД, выполним анализ влияния внутренних параметров генератора, таких как его неизохронность, неизодромность и частотное детектирование, на уровень амплитудного и частотного шума, а также шума в цепи смещения АЭ автономного генератора. Для этого вернемся к рассмотрению выражения для ненормированных значений относительных изменений частоты χ , амплитуды a_1 и сигнала автодетектирования i путем умножения выражений (3.1) на $\chi_m = \Gamma L_a$, $a_{1m} = \Gamma K_a$, $i_{0m} = \Gamma K_0$ – амплитудные значения соответствующих автодинных откликов. В случае отсутствия отражённого излучения, когда $\Gamma = 0$ частотные $\chi(\tau_n, t) \equiv \chi_{ш}(t)$ и амплитудные $a(\tau_n, t) \equiv a_{ш}(t)$ шумы автономного генератора, а также шум в цепи смещения $i(\tau, t) \equiv i_{ш}(t)$ АЭ могут быть получены в виде:

$$\chi_{ш}(t) = -[a_s(t) + \gamma a_c(t)]/Q_H(1 - \gamma\rho), \quad (3.6a)$$

$$a_{ш}(t) = [a_c(t) + \rho a_s(t)]/\alpha_{11}(1 - \gamma\rho), \quad (3.6б)$$

$$i_{ш}(t) = k_{01}(1 - \kappa_{чд}\gamma)[a_c(t) + \kappa_{см}a_s(t)]/(1 - \gamma\rho), \quad (3.6в)$$

где $k_{01} = \alpha_{01}/\alpha_{11}$ – коэффициент автодетектирования изохронного и изодромного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$.

Полученные в числителях выражений (3.6a) и (3.6б) зависимости, связанные с квадратурными составляющими $a_s(t)$ и $a_c(t)$, а также параметры Q_H и α_{11} в знаменателях нашли отражение в аналогичных выражениях для расчета флуктуаций СВЧ генератора, полученных в работах [93, 117, 118]. Новым в этих выражениях является учет в знаменателях внутренней обратной связи генератора посредством коэффициентов γ и ρ . Произведение данных коэффициентов, как отмечалось выше, определяет не только величины основных

автодинных параметров (2.28), но и входит в обсуждавшиеся выше условия (2.23) устойчивости автодинной системы «генератор – отражающий объект».

В таком представлении коэффициент ρ эквивалентен коэффициенту прямой передачи флуктуаций частоты $\chi_{\text{ш}}(t)$ во флуктуации амплитуды $a_{\text{ш}}(t)$, а γ – коэффициенту обратной передачи, при которой вследствие неизохронности АГ происходят обратные преобразования. Если в этом произведении коэффициенты γ и ρ имеют разные знаки, то получаем эквивалент системы с отрицательной обратной связью, у которой общий коэффициент «передачи» становится меньше в $(1 + \rho\gamma)$ раз. В случае одинаковых знаков при γ и ρ получаем эквивалент системы с положительной обратной связью, которая при $\rho\gamma < 1$ обеспечивает дополнительное «регенеративное усиление» шумов благодаря неизодромности генератора. В случае, когда $\rho\gamma \geq 1$, система склонна к внутренней неустойчивости, так как любые флуктуации режима колебаний неограниченно возрастают.

Шумы $i_{\text{ш}}(t)$ в цепи автодетектирования, как видно из (3.6в), также образуются за счет обеих квадратурных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$, однако вклад их зависит от внутренних свойств АЭ, характеризуемых коэффициентами автодетектирования амплитудных $k_{\text{ад}} = k_{01}(1 - \kappa_{\text{чд}}\gamma)/(1 - \gamma\rho)$ и частотных $k_{\text{чд}} = k_{01}(\rho - \kappa_{\text{чд}})/(1 - \gamma\rho)$ флуктуаций, которые, как мы видим, также связаны с параметрами внутренней обратной связи: $(1 - \gamma\rho)$.

При расчёте флуктуационных характеристик генераторов спектральное распределение внутренних источников шумов АЭ принято равномерным в виде «белого шума». С учетом такого распределения из выражений (3.6) несложно получить простые формулы для расчета в полосе частот ΔF эффективных значений частотного шума $\Delta f_{\text{эфф}}^f$, относительных уровней шума амплитуды колебаний $a_{\text{шэфф}}$ и среднего значения флуктуаций тока $i_{\text{шэфф}}$ смещения АЭ. При этом обратные значения последних двух величин дают нам выражения для определения предельных энергетических потенциалов $\Pi_{\text{пр}}$ АД при регистрации сигналов по изменению амплитуды $\Pi_{\text{пр}}^{(a)}$ и в цепи смещения АЭ $\Pi_{\text{пр}}^{(i)}$.

В ходе преобразования указанных выражений учтем статистическую независимость квадратурных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$, произведение которых при усреднении равно нулю:

$\overline{a_s(t)a_c(t)} = 0$, а также известные энергетические соотношения между ними:

$$\overline{[a_c(t)]^2} = \overline{[a_s(t)]^2} = \overline{i_{\text{шс}}^2} / (AG)^2 = \overline{i_{\text{шс}}^2} / (AG)^2 = 8kT_{\text{ш}}M_{\text{ш}}\Delta F / P_0, \quad (3.7)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_{\text{ш}}$ – эквивалентная шумовая температура АЭ;

$M_{\text{ш}}$ – мера шума АЭ; $P_0 = A^2G/2$ – колебательная мощность АЭ. В результате получим:

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \sqrt{\Delta f^2} = \frac{2f_0\sqrt{1+\gamma^2}}{Q_n(1-\gamma\rho)} \sqrt{\frac{2kT_{\text{ш}}M_{\text{ш}}\Delta F}{P_0}}; \quad (3.8)$$

$$a_{\text{шэф}} = \sqrt{|a_{\text{ш}}(t)|^2} = \frac{2\sqrt{1+\rho^2}}{\alpha_{11}(1-\gamma\rho)} \sqrt{\frac{2kT_{\text{ш}}M_{\text{ш}}\Delta F}{P_0}}; \quad (3.9)$$

$$i_{\text{шэф}} = \sqrt{|i_{\text{ш}}(t)|^2} = 2k_{01}\sqrt{1+\kappa_{\text{см}}^2} \frac{1-\gamma\kappa_{\text{чд}}}{1-\gamma\rho} \sqrt{\frac{2kT_{\text{ш}}M_{\text{ш}}\Delta F}{P_0}}; \quad (3.10)$$

$$\Pi_{\text{пр}}^{(a)} = 1/|a_{\text{ш}}(t)|^2, \quad \Pi_{\text{пр}}^{(i)} = 1/|i_{\text{ш}}(t)|^2. \quad (3.11)$$

3.3. Автодинные и шумовые характеристики

Полученные выше выражения (3.1) с учётом (3.5) относятся к уравнениям, описывающим периодически нестационарные процессы (см. стр. 130, [119]). В них первые члены: $\chi_{\text{шн}}(t)$, $a_{\text{шн}}(t)$ и $i_{\text{шн}}(t)$ представляют составляющие аддитивного стационарного шума в АД, а вторые, обусловленные воздействием отраженного излучения и его шумовой модуляцией $p_{\text{ш}}(t) = C_{\text{ос}}\chi_{\text{шн}}(t)$ фазы $\delta(\tau_n, t)_{(n)}$, описывают, кроме формирования полезного сигнала, также мультипликативные составляющие общего шума. Причём последняя составляющая, проявляющаяся только при наличии отраженного излучения, является функцией детерминированной переменной – нормированного расстояния τ_n до отражающего объекта.

Для случая отсутствия шумов, когда $p_{\text{ш}}(t) = \chi_{\text{ш}}(t) = a_{\text{ш}}(t) = i_{\text{ош}}(t) = 0$, на рис. 3.2 представлены графики ФХА $\delta(\tau_n)$, частотной (ЧХА) $\chi_n(\tau_n)$, амплитудной (АХА) $a_n(\tau_n)$ характеристик и характеристики автодетектирования (ХАД) $i_n(\tau_n)$, рассчитанные при величинах $\gamma=1$ и $\rho=-0,2$ (см. верхний ряд характеристик) для значений параметра обратной связи $C_{\text{ос}}=0,8$ (кривые 1) и $C_{\text{ос}}=0,08$ (кривые 2). Здесь ХАД $i_{n\pm}(\tau_n)$ рассчитаны для различных по знаку значений коэффициента $\kappa_{\text{чд}}$: $\kappa_{\text{чд}}=0,2$, (см. рис. 3.2 (з)) и $\kappa_{\text{чд}}=-0,2$ (см. рис. 3.2 (д)). Буквами O_1 и O_2 на ЧХА (см. рис. 3.2 (б)) обозначены точки пересечения оси абсцисс. На рис. 3.2 (а), 3.2 (в) – (д) этими же буквами обозначены проекции этих точек на остальные характеристики.

Как видно из полученных кривых, при выполнении неравенства $C_{\text{ос}} \ll 1$ ФХА является практически линейной, а ЧХА, АХА и ХАД – гармоническими функциями τ_n (см. кривые 2). При приближении величины $C_{\text{ос}}$ к единице ФХА $\delta(\tau_n)$ теряет линейный характер, а ЧХА, АХА и ХАД становятся несинусоидальными (см. кривые 1). Такие искажения автодинных изменений

амплитуды и частоты колебаний при больших значениях параметра обратной связи C_{oc} обусловлены неравномерностью набега фазы $\delta(\tau_n)$ при изменении τ_n , вызванной изменениями частоты $\chi_n(\tau_n)$ генерации и обсуждались выше.

Далее рассмотрено поведение шумового процесса в случае одновременного воздействия на АД отраженного излучения и собственных шумов. Для этого из выражений (3.1) соответственно вычтены их детерминированные составляющие ФХА $\delta(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_n(\tau_n)$ и ХАД $i_n(\tau_n)$, представленные в выражениях (2.29) – (2.31):

$$\delta_{шн}(\tau_n, t) = \delta(\tau_n, t) - \delta(\tau_n), \quad (3.12a)$$

$$\chi_{шн}(\tau_n, t) = \chi_n(\tau_n, t) - \chi_n(\tau_n) = -\chi_{шн}(t) - \sin[\delta(\tau_n, t) + \theta] + \sin[\delta(\tau_n) + \theta], \quad (3.12б)$$

$$a_{шн}(\tau_n, t) = a_n(\tau_n, t) - a_n(\tau_n) = a_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_1] - \cos[\delta(\tau_n) - \psi_1], \quad (3.12в)$$

$$i_{шн}(\tau_n, t) = i_n(\tau_n, t) - i_n(\tau_n) = i_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_0] - \cos[\delta(\tau_n) - \psi_0], \quad (3.12г)$$

Выражения (3.12) справедливы при любом соотношении сигнал/ шум. Для случая, когда уровень сигнала значительно превышает шум, данные выражения для малых компонентов шума можно линеаризовать, разложив входящие в них сложные трансцендентные функции в ряды Тейлора, ограничившись при этом двумя первыми членами. Тогда получим упрощённые выражения, допускающие расчет и физическую интерпретацию процесса формирования шумовых характеристик АД:

$$\delta_{шн}(\tau_n, t) = -\chi_{шн}(t) \frac{C_{oc}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_n)}{d\tau_n}, \quad (3.13a)$$

$$\chi_{шн}(\tau_n, t) = -\chi_{шн}(t) \left[1 + \frac{C_{oc}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_n)}{d\tau_n} \frac{d\chi_n(\tau_n)}{d\tau_n} \right], \quad (3.13б)$$

$$a_{шн}(\tau_n, t) = a_{шн}(t) - \chi_{шн}(t) \frac{C_{oc}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_n)}{d\tau_n} \frac{da_n(\tau_n)}{d\tau_n}, \quad (3.13в)$$

$$i_{шн}(\tau_n, t) = i_{шн}(t) - \chi_{шн}(t) \frac{C_{oc}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_n)}{d\tau_n} \frac{di_n(\tau_n)}{d\tau_n}. \quad (3.13г)$$

Для дальнейшего численного анализа шумовых характеристик (3.13) с учетом (3.5) воспользуемся входящей в пакет MathCAD подпрограммой, обеспечивающей возможность моделирования ортогональных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$ нормального случайного процесса. При этом число отсчётов N мгновенных значений шума на каждом интервале $\tau_n \in [0, 1]$ принято равным $N = 1 \cdot 10^5$, а его среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}$.

Результаты расчетов относительных изменений среднеквадратических уровней фазового $q_\delta(\tau_n) = \frac{|\delta_{шн}(\tau_n, t)|}{|\delta_{шн}(O_2)|}$, частотного $q_\chi(\tau_n) = \frac{|\chi_{шн}(\tau_n, t)|}{|\chi_{шн}(t)|}$, амплитудного

$q_a(\tau_n) = \overline{|a_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|a_{ш}(t)|}$ шума и шума в цепи смещения $q_{i_{\pm}}(\tau_n) = \overline{|i_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|i_{ш}(t)|}$ АЭ в зависимости от нормированного времени τ_n до отражающей поверхности при принятых выше значениях γ , ρ , $K_{уд}$ и величине параметра обратной связи $C_{oc} = 0,8$ представлены соответственно в виде графиков на рис. 3.2. Здесь $\delta_{ш}(O_2)$ – среднеквадратический уровень фазового шума в точке O_2 при заданной величине параметра C_{oc} . Усреднение по нормированному времени при моделировании производилось на интервале ± 10 отсчетов мгновенных значений шума.

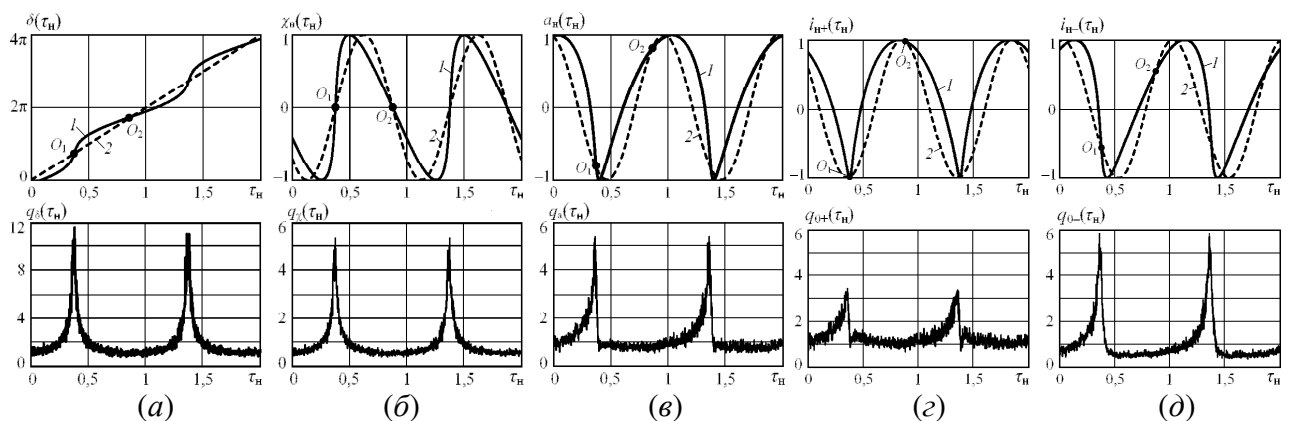


Рис. 3.2. ФХА (а), ЧХА (б), АХА (в) и ХАД (з, д), а также соответствующие им тишумовые характеристики $q_{\delta}(\tau_n)$, $q_{\chi}(\tau_n)$, $q_a(\tau_n)$ и $q_{0\pm}(\tau_n)$

Из кривых $q_{\delta}(\tau_n)$, $q_{\chi}(\tau_n)$, $q_a(\tau_n)$ и $q_{i_{\pm}}(\tau_n)$ рис. 3.2 видно, что при изменении нормированного времени τ_n через интервал $\tau_n = 1$, который соответствует перемещению объекта на половину длины волны, уровень как фазового и частотного, так и амплитудного шума АД, а также в цепи смещения АЭ периодически изменяется, причем, точкам O_1 на характеристиках соответствуют максимумы уровня шумов в виде «пиков», а точкам O_2 – их минимумы в виде «плато». При этом необходимо отметить, что в положениях по оси абсцисс, где производные ЧХА, АХА и ХАД равны нулю, шумовые характеристики по уровню соответствуют шумам автономного генератора, т.е. в этих точках $q_{\chi}(\tau_n) = q_a(\tau_n) = q_{i_{\pm}}(\tau_n) = 1$ и мультипликативные составляющие шума отсутствуют.

Для точек O_1 и O_2 на характеристиках рис. 3.2 нетрудно получить выражения для зависимости относительного уровня шума от величины параметра обратной связи C_{oc} . Для этого, задав в выражениях (3.13) координаты этих точек, после элементарных преобразований получим:

$$q_{\delta}(O_{1,2}) = q_{\chi}(O_{1,2}) = \overline{|\delta_{ш}(O_{1,2}, t)|} / \overline{|p_{ш}(t)|} = \overline{|\chi_{ш}(O_{1,2}, t)|} / \overline{|\chi_{ш}(t)|} =$$

$$= 1 \pm C_{oc}^{(1)} (1 \pm \dots \pm C_{oc}^{(n-2)} (1 \pm C_{oc}^{(n-1)} (1 \pm C_{oc}^{(n)})) \dots), \quad (3.14)$$

$$q_a(O_{1,2}) = \frac{|a_{ш}(O_{1,2})|}{|a_{ш}(t)|} = 1 \pm C_{oc} \frac{(\gamma + \rho) |\chi_{ш}(t)|}{(1 + \gamma^2) |a_{ш}(t)|} q_{\chi}(O_{1,2}), \quad (3.15)$$

$$q_i(O_{1,2}) = \frac{|i_{ш}(O_{1,2})|}{|i_{ш}(t)|} = 1 \pm C_{oc} \frac{(\gamma + \kappa_{см}) |\chi_{ш}(t)|}{(1 + \gamma^2) |i_{ш}(t)|} q_{\chi}(O_{1,2}), \quad (3.16)$$

где цифра верхних индексов при C_{oc} в угловых скобках выражения (3.14) показывает порядок приближения вычислений; знаки «+» в (3.15), (3.16) соответствуют точкам O_1 , а «-» – точкам O_2 на характеристиках.

Результаты расчетов зависимостей $q_{\delta}(O_{1,2})$, $q_{\chi}(O_{1,2})$, $q_a(O_{1,2})$ и $q_i(O_{1,2})$ от величины параметра обратной связи C_{oc} при принятых выше значениях γ , ρ и $\kappa_{см}$ представлены в виде графиков на рис. 3.3. Кривые 1 и 3 соответствуют точкам O_1 , а кривые 2 и 4 – точкам O_2 . Как видно из полученных кривых рис. 3.3, в случае малых значений параметра C_{oc} , когда $C_{oc} \ll 1$, шумы во всех характерных точках АХА, ЧХА и ХАД практически стационарные и их уровни равны уровням шумов для автономного генератора, т.е. $q_{\delta}(O_{1,2}) = q_{\chi}(O_{1,2}) = q_a(O_{1,2}) = q_i(O_{1,2}) = 1$. С увеличением параметра обратной связи C_{oc} в точках O_1 наблюдается значительный рост высоты «пика» относительного уровня всех составляющих шума. При этом в точках O_2 и их окрестностях на всех характеристиках отмечается обратное явление: заметное уменьшение уровня шумов.

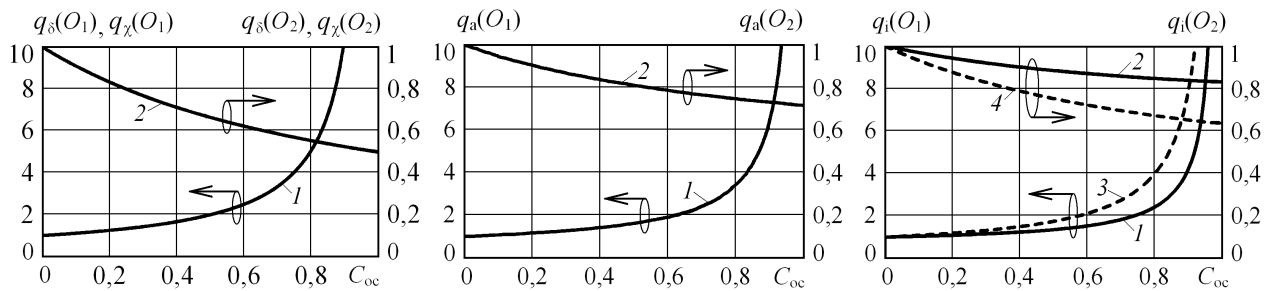


Рис. 3.3. Графики относительного уровня фазового $q_{\delta}(O_{1,2})$, частотного $q_{\chi}(O_{1,2})$, амплитудного $q_a(O_{1,2})$ шумов, а также флуктуаций смещения $q_i(O_{1,2})$ АЭ в точках O_1 и O_2 автодинных характеристик в зависимости от величины параметра обратной связи C_{oc}

Такое поведение шумов, когда величина параметра C_{oc} соизмерима с единицей, объясняется периодической неравномерностью набега фазы $\delta(\tau_n)$ отражённого излучения из-за автодинных изменений частоты $\chi_n(\tau_n)$ генерации (см. рис. 3.2). Входящая в выражения (3.13) производная $d\delta(\tau_n)/d\tau_n$ от фазовой характеристики $\delta(\tau_n)$ является для малых частотных

шумов $\chi_{ш}(t)$, когда $\omega_0 \overline{|\chi_{ш}(t)|} \ll \Delta \omega_{ма}$, своего рода коэффициентом передачи частотных флуктуаций, которые за счёт запаздывания относительно текущего времени преобразуются далее в фазовые шумы $p_{ш}(t)$. Последние затем трансформируются в дополнительные (мультипликативные) составляющие частотных $\chi_{ш}(\tau_n, t)$ и амплитудных $a_{ш}(\tau_n, t)$ флуктуаций колебаний генератора за счёт входящих в выражения (3.13б) и (3.13в) «нелинейных передаточных звеньев» в виде производных $d\chi_n(\tau_n)/d\tau_n$ и $da_n(\tau_n)/d\tau_n$ от характеристик ЧХА и АХА. Формально аналогичным образом в соответствии с выражением (3.13г) на «нелинейности» производной $di_n(\tau_n)/d\tau_n$ происходит преобразование фазовых шумов $p_{ш}(t)$ в мультипликативную составляющую шумов смещения АЭ $i_{ш}(\tau_n, t)$. Шумы смещения АЭ $i_{ш}(\tau_n, t)$ образуются в результате автодетектирования как частотных, так и амплитудных флуктуаций колебаний генератора.

Необходимо отметить, что уровни «пика» и «плато» флуктуационных характеристик $q_a(O_{1,2})$ и $q_i(O_{1,2})$, как видно из выражений (3.15), (3.16) и графиков рис. 3.3, зависят от соотношения величин и знаков коэффициентов внутренних параметров АД: γ и ρ , γ и $\kappa_{чд}$. Так, например, при равенстве этих коэффициентов, но различии их знаков, нестационарность соответствующих шумовых характеристик АД может вообще отсутствовать.

Интересно сравнить автодинные и шумовые характеристики исследованного выше неизохронного и неизодромного генератора с характеристиками изохронного и изодромного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$. На рис. 3.4 представлены результаты расчёта согласно (3.13б) и (3.13в) с учётом (3.5) ЧХА и АХА для случая, когда коэффициенты $\gamma = \rho = 0$ и $L_{с/ш} = K_{с/ш} = 400$, а величина параметра $C_{ос} = 0,8$.

Из сравнения графиков рисунков 3.2 и 3.4 видно, что все характеристики отличаются соответствующими фазовыми смещениями, поскольку во втором случае $\theta = \psi = 0$. Форма ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ при этом сохранилась прежней, однако у АХА $a_n(t)$ изохронного генератора отсутствует наклон «волн». При этом нестационарность частотных шумов $q_{ш\chi}(\tau_n)$ по уровню и форме сохранилась практически такой же, как на рис. 3.2.

Однако форма характеристики амплитудного шума $q_{ша}(\tau_n)$ и высота пиков претерпели существенные изменения (см. рис. 3.4). При этом необходимо отметить, что шероховатость кривых $q_{ш\chi}(\tau_n)$ и $q_{ша}(\tau_n)$ на рис. 3.2, а также кривой $q_{ша}(\tau_n)$ на рис. 3.34 не смотря на выполнение операции их сглаживания, обусловлена отсутствием корреляции между

ортогональными составляющими $a_c(t)$ и $a_s(t)$ нормального случайного процесса. Тогда как при расчёте гладкой кривой $q_{ш\chi}(\tau_n)$ рис. 3.4 учитывалась только составляющая $a_s(t)$.

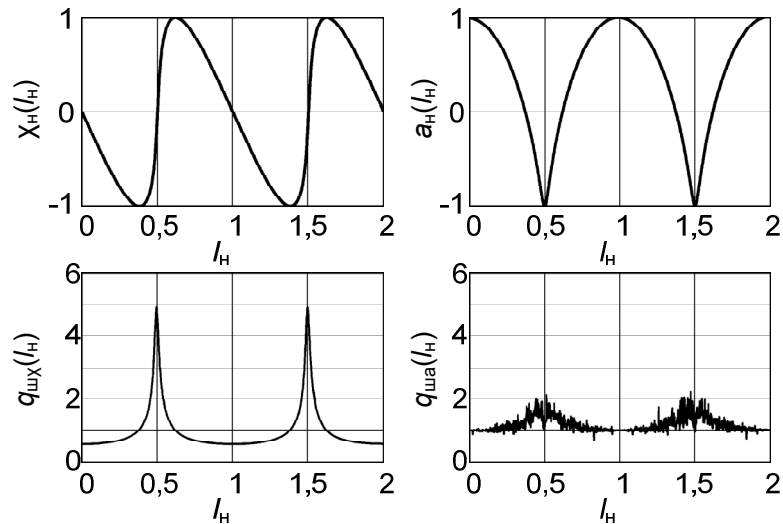


Рис. 3.4. Графики автодинных и шумовых характеристик изохронного генератора при большой величине параметра обратной связи

3.4. Динамический диапазон автодинов

Проблема обеспечения динамического диапазона СБРЛ обусловлена особенностями условий их функционирования: широким диапазоном вариаций эффективной площади рассеяния целей и изменение расстояния до отражающих объектов. Так расстояние в реальных условиях работы СБРЛ могут изменяться от максимально возможной дальности до цели, определяемой энергетическим потенциалом системы, вплоть до непосредственного соприкосновения контролируемого объекта и СБРЛ [1–7, 102–104]. В первом случае уровень отражённого излучения весьма мал и часто соизмерим с уровнем собственных шумов приёмника, а во втором – он высок и сопоставим с уровнем зондирующего излучения передатчика.

При использовании АД практически во всех его приложениях в СБРЛ необходимо учитывать ещё одну особенность этих устройств, которая связана с наличием ограничения динамического диапазона системы. Это ограничение (сверху) исходит из требования отсутствия скачков автодинного сигнала при увеличении уровня отражённого излучения и (или) увеличении расстояния до объекта локации. Обобщённым параметром, характеризующим это ограничение, является параметр внешней обратной связи C_{oc} автодина, который, как известно [5, 10], должен быть меньше единицы $C_{oc} < 1$. Данное условие совпадает с одним из критериев устойчивости автодинной системы, перечисленных в выражении (2.23).

С другой стороны (снизу) динамический диапазон ограничен уровнем собственных шумов

АД, который также определяет предельный энергетический потенциал $\Pi_{\text{пр}}$ СБРЛ. Тогда из выражения (2.24) с учётом (3.11) и указанного условия ($C_{\text{ос}} < 1$) получим формулу для расчета динамического диапазона d_a АД при регистрации сигнала по изменению амплитуды колебаний или в цепи смещения АЭ:

$$d_a = \Gamma_{\text{пр}} \sqrt{\Pi_{\text{пр}}} = N_{\text{пр}} / N, \quad (3.17)$$

где d_a определяется как отношение предельного уровня сигнала, при котором начинаются скачки, к уровню собственных шумов АД; $\Gamma_{\text{пр}}$ – предельное значение коэффициента Γ затухания, при котором начинаются скачки выходного сигнала АД; $N_{\text{пр}}$ – предельное расстояние, выраженное в количестве полуволн СВЧ излучения, до которого скачки сигналов АД могут отсутствовать:

$$N_{\text{пр}} = \sqrt{\Pi_{\text{пр}}} \frac{Q_n (1 - \gamma \rho)}{2\pi\eta\sqrt{1 + \gamma^2}}. \quad (3.18)$$

Результат вычисления $N_{\text{пр}}$ согласно (3.18) для модуля «Тигель-08» при $\gamma = 1$; $\rho = -0,2$; $Q_n = 55$; $\eta = 1$ и реальном значении предельного потенциала в полосе частот от 0.5 кГц до 1.5 кГц $\Pi_{\text{пр}} = 83$ дБ получен следующим: $N_{\text{пр}} = 104918$, что составляет в диапазоне 8-мм предельное расстояние $l_{\text{пр}} = 419$ м.

Условие отсутствия перескоков автодинного сигнала с учётом (2.24) можем переписать в несколько ином виде:

$$\Gamma N < \mu_n Q_{\text{вн}} / 2\pi, \quad (3.19)$$

где μ_n – нормированный множитель, учитывающий внутренние параметры генератора:

$$\mu_n = \frac{1}{l_{\text{на}}} = \frac{1 - \gamma \rho}{\sqrt{1 + \gamma^2}}. \quad (3.20)$$

В левой части неравенства (3.19) нашли отражение «внешние» условия применения АД (ΓN), а справа – внутренние параметры генератора, в частности, внешняя добротность $Q_{\text{вн}}$ и, через коэффициент μ_n , обсуждавшиеся выше коэффициенты γ и ρ . Результаты расчётов коэффициента μ_n в виде объёмной диаграммы его зависимости от величины коэффициентов γ и ρ представлены на рис. 3.5.

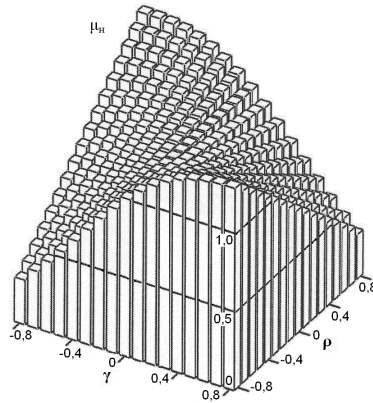


Рис. 3.5. Объёмная диаграмма зависимости коэффициента μ_n от величины коэффициентов γ и ρ

3.5. Выводы

Из результатов выполненных исследований шумовых характеристик автодинов следует, что в случае пренебрежимо малых по сравнению с единицей значений параметра внешней обратной связи зависимость среднеквадратического уровня как частотных, так и амплитудных шумов от относительного расстояния до отражающего объекта практически отсутствует. Однако в случае «сильного сигнала», при величине параметра обратной связи соизмеримой с единицей, в автодинном генераторе наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения нестационарность уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающей поверхности. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю «слабой обратной связи» могут заметно снижаться, а в других – значительно расти, причём увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики автодина, а его уменьшению – более пологие.

Установлено, что среднее за период автодинного сигнала значение уровня шума в случаях, как малого, так и большого отношения сигнал/шум, сохраняется практически неизменным и равным уровню шумов автономного генератора. Данные особенности формирования автодинных и шумовых характеристик генераторов необходимо учитывать при расчёте энергетического потенциала систем и обработке выходных сигналов.

Результаты выполненных исследований показали также, что в автодинной системе «генератор – отражающий объект» через внешнюю обратную связь происходит нелинейное взаимодействие формируемого выходного сигнала и внутренних частотных шумов генератора, что указывает на существенную нелинейность этой системы, в которой принцип суперпозиции не выполняется даже при относительно малых уровнях отражённого излучения.

Показано также, что в случае различия знаков коэффициентов неизохронности и неизодромности СВЧ генератора динамический диапазон одноконтурного автодина может быть

по сравнению с изохронным генератором отличаться на несколько дБ.

Результаты полученные в данной главе представляются полезными при интерпретации результатов экспериментальных исследований автодинных генераторов, при анализе особенностей формирования сигналов и шумов автодинов и их обработке, а также при оптимизации параметров СВЧ генераторов, предназначенных для автодинных СБРЛ.

Глава 4. Исследования автодинов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором

В данной главе представлены результаты теоретических исследований автодинных параметров и характеристик КВЧ генераторов, стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором. Для этого в разделе 4.1 получены основные уравнения, описывающие процесс взаимодействия стабилизированного автодина (САД) с собственным отражённым от объекта излучением с учётом внутренних шумов активного элемента. На основе этих уравнений в разделе 4.2 проведен анализ автодинных характеристик при условии точной настройки резонатора, а в разделе 4.3 – рассмотрено влияние расстройки резонаторов на автодинные параметры и характеристики. В следующем разделе 4.4 – рассмотрен вопрос о причинах появления ангармонических искажений сигнала при увеличении уровня отражённого излучения. На основе полученных в разделе 4.1 уравнений в разделе 4.5 рассмотрены шумовые параметры стабилизированного автономного генератора, а в разделе 4.6 выполнен анализ одновременно автодинных и шумовых характеристик САД. Полученные результаты расчёта шумовых параметров САД позволили в разделе 4.7 рассчитать его динамический диапазон. Выводы по главе сформулированы в разделе 4.9.

Основные результаты данных исследований опубликованы в журнальных статьях [38–40, 43, 44], в материалах различных научно-технических конференций [41, 42, 45, 56] и представлены в отчёте о НИР [33].

4.1. Основные выражения для анализа стабилизированных по частоте автодинов

Из всего конструктивного многообразия способов стабилизации частоты твердотельных СВЧ генераторах в настоящее время находят применение, в основном, простейшие структуры, у которых эквивалентные схемы колебательной системы сводятся либо к цепочечному трехконтурному фильтру с реактивной связью отдельных парциальных контуров, либо к двухконтурному фильтру с резистивной связью (стр. 46, [73]). Достоинства последнего варианта, из свойств которых важнейшим для АД является однозначность регулировочной характеристики. Для исследований САД в данной работе использована схема стабилизации генератора «на отражение» с применением резистивной связи.

Для разработки математической модели, описывающей основные процессы в анализируемой системе, рассмотрим представленную на рисунок 3.1 (а) функциональную схему простейшего радиолокатора. На этой схеме АД, связанный с внешним стабилизирующим

резонатором СР по схеме полосно-отражающего фильтра, выполнен на основе двухполюсного АЭ с вольт-амперной характеристикой N - или S -типа (диоде Ганна, лавинно-пролётном диоде). Аналогично схеме одноконтурного АД, представленной на рис. 2.1 (а), смещение на АЭ поступает от источника питания $E_{\text{п}}$ через БР. АД непосредственно связан с приёмно-передающей антенной А, через которую происходит его взаимодействие с возвращённым от отражающего объекта ОО (или просто отражателя) излучением. При этом низкочастотные информационные сигналы u_0 и u_1 формируются аналогично одноконтурным АД (см. главу 2).

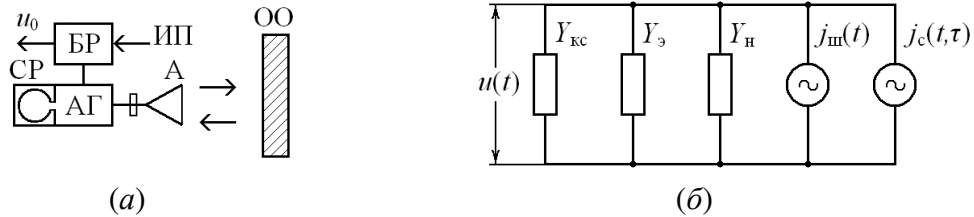


Рис. 4.1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы стабилизированного АД

Эквивалентная схема САД, приведённая к сечению АЭ с вольт-амперной характеристикой N -типа, представлена на рисунке 3.1 (б). На этой схеме параллельным соединением элементов представлены комплексные проводимости колебательной системы $Y_{\text{кc}}$, «электронной» проводимости $Y_{\text{э}}$ АЭ и нагрузки $Y_{\text{н}} = G_{\text{н}}$. Эквивалентный источник мгновенного тока $j_{\text{ш}}(t)$, как и в главе 2, отображает действие СВЧ шумов² АЭ. Источник $j_c(t, \tau)$ – характеризует воздействие собственного отражённого излучения, запаздывающего на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до отражающей поверхности; c – скорость распространения СВЧ излучения. При этом полагаем, что шум является стационарным нормальным процессом при нулевом среднем значении. Условия генерации незатухающих колебаний $u(t)$, их особенности, колебания эквивалентного источника тока $\delta(t, \tau)$ и допущения принятые при дальнейшем анализе системы подробно описаны в главе 2.

Основываясь на законах Кирхгофа для цепи, приведенной на рис. 4.1 (б), имеем:

$$\operatorname{Re} [\dot{u}(t)(Y_{\text{кc}} + Y_{\text{э}} + Y_{\text{н}})] = j_c(t, \tau) + j_{\text{ш}}(t). \quad (4.1)$$

Далее, учитывая малость отражённого излучения, так что $\Gamma \ll 1$, и энергетические соотношения, приведенные в экспликациях к (2.3), после умножения выражения (4.1) на функции $\cos(\omega_0 t + \varphi)$, затем на $\sin(\omega_0 t + \varphi)$, соответственно, и усреднения за период колебаний получим уравнения для нахождения амплитуды A и частоты ω колебаний в виде:

² Здесь рассмотрим только внутренние (естественные [120]) шумы АГ без учёта шумов источника смещения.

$$G_s + G_{kc} + G_n = 2\Gamma\eta G \cos\delta(t, \tau) + (2/A)i_c(t). \quad (4.2)$$

$$B_s + B_{kc} = -2\Gamma\eta G \sin\delta(t, \tau) - (2/A)i_s(t). \quad (4.3)$$

где $\eta = G/G_{kc}$, $G = G_{n1} + G_n$ – КПД и общая резистивная проводимость рабочего резонатора и нагрузки; $i_c(t)$, $i_s(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора:

$$i_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{ш}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t), \quad i_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{ш}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t).$$

В результате усреднения фаза $\delta(t, \tau)$ и квадратурные составляющие шума $i_c(t)$, $i_s(t)$ стали также медленно меняющимися функциями за период $T = 2\pi/\omega_0$.

Теперь применительно к АД рассмотрим известную эквивалентную схему стабилизированного генератора (САГ), представленную на рис. 4.2. Здесь первый колебательный контур, включающий в себя пассивные параметры АЭ и состоящий из индуктивности L_1 , ёмкости C_1 и проводимости собственных потерь G_{n1} , представляет собой основной рабочий (активный) резонатор генератора, к которому параллельно подключается проводимость G_s АЭ. Второй резонатор (стабилизирующий) представлен на схеме также параллельным колебательным контуром и содержит индуктивность L_2 , ёмкость C_2 и собственную проводимость потерь G_{n2} . Отрезок линии передачи между резонаторами, согласованный с резистивной проводимостью связи G_c , имеет длину $l_{св}$, кратную половине длины волны в волноводе: $l_{св} = n\Lambda/2$.

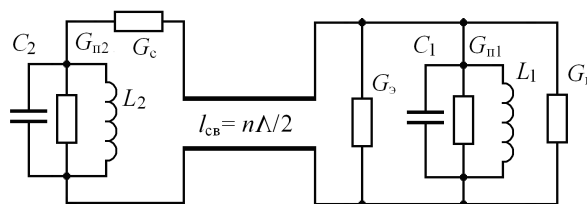


Рис. 4.2. Эквивалентная схема КС АД с резистивной связью между резонаторами

Проводимость рассматриваемой КС, приведенная к зажимам АЭ и учитывающая также проводимость нагрузки Y_n , определяется в обозначениях данной работы следующим выражением [121]:

$$Y_{kc} = G_{kc} + jB_{kc} = G \left[1 + \frac{\beta_1(1 + j2Q_{c2}v_{c2})}{(1 + \beta_2) + j2Q_{c2}v_{c2}} + j2Q_{n1}v_{c1} \right]. \quad (4.4)$$

где $\beta_1 = G_c/G$, $\beta_2 = G_c/G_{n2}$ – коэффициенты, характеризующие степень связи рабочего и стабилизирующего резонаторов с линией передачи; $G = G_{n1} + G_n$; $v_{c1} = (\omega - \omega_{c1})/\omega_{c1}$,

$\nu_{c2} = (\omega - \omega_{c2}) / \omega_{c2}$ – относительные расстройки текущей частоты относительно частот первого ν_{c1} и второго ν_{c2} резонаторов; $\omega_{c1} = 1 / (L_1 C_1)^{-1/2}$, $\omega_{c2} = 1 / (L_2 C_2)^{-1/2}$ – собственные частоты и $Q_{н1} = \omega_{c1} C_1 / G$, $Q_{c2} = \omega_{c2} C_2 / G_{н2}$ – добротности первого и второго резонаторов.

Выделим вещественную $G_{кc}$ и мнимую $B_{кc}$ части выражения (4.4) и выполним их нормировку относительно величины проводимости G . Далее, переходя к понятию текущей частоты $\nu = 2Q_{c2}(\omega - \omega_{c2}) / \omega_{c2}$ относительной отстройки, запишем выражения для нормированных резистивной $g_{кc}(\nu)$ и реактивной $b_{кc}(\nu)$ проводимостей КС и их производных $\varepsilon_{кc}(\nu)$ и $q_{эkv}(\nu)$ по частоте относительной отстройки ν :

$$g_{кc}(\nu) = \frac{G_{кc}}{G} = 1 + \frac{\beta_1(1 + \beta_2 + \nu^2)}{(1 + \beta_2)^2 + \nu^2}. \quad (4.5)$$

$$b_{кc}(\nu) = \frac{B_{кc}}{G} = \sigma_{кc} \nu + \frac{\beta_1 \beta_2 \nu}{[(1 + \beta_2)^2 + \nu^2]}. \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{кc}(\nu) = \frac{dg_{кc}(\nu)}{d\nu} = \frac{2\beta_1 \beta_2 (1 + \beta_2) \nu}{[(1 + \beta_2)^2 + \nu^2]^2}. \quad (4.7)$$

$$q_{кc}(\nu) = \frac{db_{кc}(\nu)}{d\nu} = \frac{\xi_{кc}(\nu)}{Q_{c2}} = \sigma_{кc} + \beta_1 \beta_2 \frac{(1 + \beta_2)^2 - \nu^2}{[(1 + \beta_2)^2 + \nu^2]^2}. \quad (4.8)$$

где $\sigma_{кc} = Q_{н1} / Q_{c2}$. Отметим, что в (4.5) – (4.8) значению $\nu = 1$ соответствует граничное значение частоты $\omega_{гр} = \omega_{c2} / (2Q_{c2})$ среза стабилизирующего резонатора по уровню минус 3 дБ от его собственной частоты.

Рассчитанные согласно (4.5) – (4.8) графики частотных зависимостей нормированных проводимостей $g_{кc}(\nu)$, $b_{кc}(\nu)$ и их производных $\varepsilon_{кc}(\nu)$, $q_{кc}(\nu)$ в окрестности собственной частоты ω_{c2} стабилизирующего резонатора при различных значениях величины β_1 представлены на рис. 4.3 (а) и 4.3 (б) соответственно. При этом величина β_2 принята равной единице, поскольку этому значению при условии $\nu = 0$, как следует из (4.8), соответствует наибольшая величина эквивалентной добротности $Q_{эkv}$ данной КС:

$$Q_{эkv} = Q_{эkv}(\nu = 0) = Q_{н1} + \frac{\beta_1 \beta_2}{(1 + \beta_2)^2} Q_{c2}. \quad (4.9)$$

Из сравнения кривых 1–3 (см. рис. 4.3 (а)), с кривыми 4 следует, что в рассматриваемой КС характер частотных зависимостей существенно отличается от аналогичных характеристик, реализуемых в обычном одноконтурном генераторе. Наличие острого провала на характеристике $g_{кc}(\nu)$ ограничивает по частотному диапазону условия баланса амплитуд в генераторе и улучшает условия возбуждения одночастотных колебаний. Крутизна зависимости

$b_{\text{кк}}(\nu)$ в точке пересечения нулевого значения реактивной проводимости, характеризующая фиксирующую способность генератора по частоте и определяемая величиной $q_{\text{кк}}(\nu)$ (см. рис. 4.3 (б)), у САГ значительно выше, чем у одноконтурного генератора.

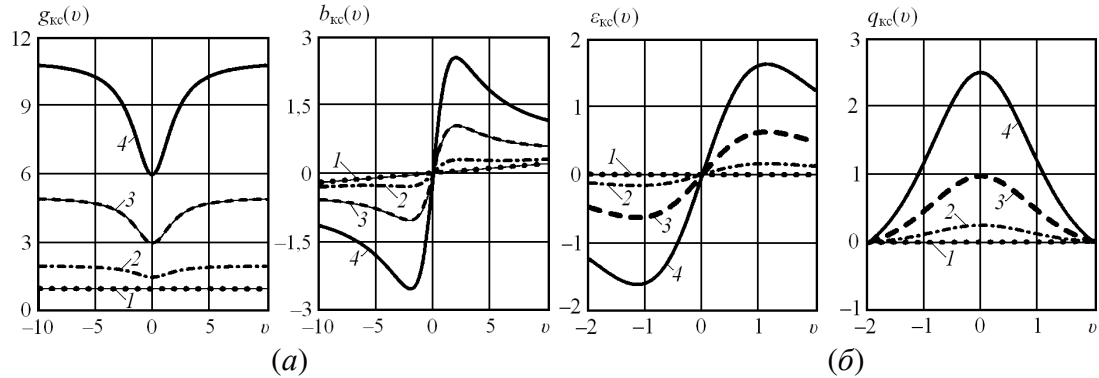


Рис. 4.3. Графики нормированных проводимостей $g_{\text{кк}}(\nu)$, $b_{\text{кк}}(\nu)$ и их производных $\varepsilon_{\text{кк}}(\nu)$, $q_{\text{кк}}(\nu)$, рассчитанные при $Q_{\text{н1}} = 100$, $Q_{\text{с2}} = 5000$ и следующих параметрах связи: $\beta_1 = 0$ (кривые 1); $\beta_1 = 1$ (кривые 2); $\beta_1 = 4$ (кривые 3); $\beta_1 = 10$ (кривые 4)

Величина добротности $Q_{\text{экв}}$, как видно из (4.9), пропорциональна собственной добротности $Q_{\text{с2}}$ стабилизирующего резонатора и величине β_1 . При этом необходимо отметить, что при значениях коэффициента связи $\beta_1 \leq \beta_{1(\text{гр})}$, где $\beta_{1(\text{гр})} = (16 + \sqrt{208})q_{\text{кк}} \approx 30,42q_{\text{кк}}$ – его граничное значение, характеристики $b_{\text{кк}}(\nu)$ являются однозначными функциями частоты, а при невыполнении этого неравенства – появляются прогибы в этих зависимостях (см. кривые 2–4). В связи с этим область значений $\beta_1 \leq \beta_{1(\text{гр})}$ назовём областью слабой связи, а при выполнении обратного неравенства – областью сильной связи между резонаторами. Из кривых, представленных на рис. 4.3 (б) видно, что в окрестности собственной частоты стабилизирующего резонатора с увеличением коэффициента связи β_1 увеличивается крутизна характеристики $\varepsilon_{\text{кк}}(\nu)$, а также абсолютное значение относительной добротности КС $q_{\text{кк}}(\nu)$.

Отмеченные здесь особенности частотных зависимостей $g_{\text{кк}}(\nu) \equiv g_{\text{кк}}(\omega)$, $b_{\text{кк}}(\nu) \equiv b_{\text{кк}}(\omega)$, а также $\varepsilon_{\text{кк}}(\nu) \equiv \varepsilon_{\text{кк}}(\omega)$, $q_{\text{кк}}(\nu) \equiv q_{\text{кк}}(\omega)$ рассматриваемой КС в окрестности частоты $\omega_{\text{с2}}$ будут учтены в дальнейшем анализе процессов в САД.

Для получения линеаризованных уравнений описывающих автоколебания вариации параметров автоколебаний получим сначала выражения для стационарного режима. Для этого в системе уравнений (4.2), (4.3) при равенстве $\Gamma = 0$ и отсутствии внутренних шумов генератора положим: $A = A_0$, $\omega = \omega_0$, а также $G_3 = G_{30}$, $B_3 = B_{30}$ и среднее значение тока АЭ $I_3 = I_{30}$, где индексы «0» здесь и далее означают, что эти величины получены в окрестности стационарного

режима. Тогда работа невозмущенного автономного САГ описывается выражениями вида:

$$G_{30} + G_{кc0} = 0; B_{30} + B_{кc0} = 0; I_3 = I_{30}(A_0, \omega_0), \quad (4.10)$$

где $G_{30} \equiv G_{30}(A_0, \omega_0)$; $B_{30} \equiv B_{30}(A_0, \omega_0)$; $G_{кc}(\omega_0) = G + G_2(\omega_0)$ – проводимость КС, которая обусловлена нагруженной проводимостью G рабочего резонатора и вносимой проводимостью $G_2(\omega_0)$ второго (стабилизирующего) резонатора:

$$G_2(\omega_0) \equiv G_2(v_0) = \frac{G\beta_1(1+\beta_2+v_0^2)}{(1+\beta_2)^2+v_0^2}; \quad (4.11)$$

$B_{кc}(\omega_0) = B_1 + B_2(\omega_0)$ – реактивная проводимость КС, обусловленная проводимостью $B_1 = 2G_1Q_{н1}v_{01} = G_1v_0$ рабочего резонатора и вносимой проводимостью $B_2(\omega_0)$ второго стабилизирующего резонатора:

$$B_2(\omega_0) \equiv B_2(v_0) = \frac{G\beta_1\beta_2v_0}{(1+\beta_2)^2+v_0^2}; \quad (4.12)$$

$v_0 = 2Q_{c2}(\omega_0 - \omega_{c2}) / \omega_{c2}$ – относительная расстройка частоты стационарных колебаний ω_0 и собственной частоты ω_{c2} стабилизирующего резонатора. Уравнения (4.10) – (4.12) стационарного режима позволяют определить амплитуду и частоту автономного стабилизированного генератора.

Для нахождения выражений в вариациях для автодинного отклика САД используем соотношения (4.2), (4.3) с учётом (4.10) – (4.12). Для этого представим амплитуду и частоту автоколебаний в виде: $A = A_0 + \Delta A$, $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, где ΔA , $\Delta\omega$ – соответствующие изменения стационарного режима генератора. Входящие в уравнения (4.2), (4.3) параметры $G_3(A, \omega)$ и $B_3(A, \omega)$, а также среднее значение тока $I_3 = I_{30} + \Delta I_3$ АЭ при этом в окрестности своих стационарных значений (4.10) – (4.12) получают соответствующие приращения. При этом полагаем вариации параметров автоколебаний достаточно малыми, так что $\Delta A \ll A_0$, $\Delta\omega \ll \omega_0$, а также $\Delta I_3 \ll I_{30}$.

Тогда выражения для электронных проводимостей G_3 , B_3 АЭ и его тока смещения I_3 с учетом первых двух членов разложений в ряды Тейлора можем записать в виде:

$$G_3 = G_{30}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial G_3}{\partial A}\right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial G_3}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega, \quad (4.13a)$$

$$B_3 = B_{30}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial B_3}{\partial A}\right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial B_3}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega, \quad (4.13б)$$

$$I_3 = I_{30}(A_0, \omega_0) + \left(\frac{\partial I_3}{\partial A}\right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial I_3}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega, \quad (4.13в)$$

в окрестности собственной частоты ω_{c2} стабилизирующего резонатора, как отмечалось выше при обсуждении кривых рисунка 4.3, КС анализируемого генератора отличается значительной неравномерностью проводимостей $G_{\text{кc}} \equiv G_{\text{кc}}(\omega)$ и $B_{\text{кc}} \equiv B_{\text{кc}}(\omega)$. При этом $G_{\text{кc}}(\omega)$ является чётной функцией частоты, а $B_{\text{кc}}(\omega)$ – нечётной. Поэтому при разложении этих функций в ряды Тейлора в окрестности частоты ω_0 учтём в резистивной составляющей $G_{\text{кc}}(\omega)$ первый и третий члены ряда, а в реактивной $B_{\text{кc}}(\omega)$ – первые два. С учётом сделанного замечания запишем разложения указанных функций в виде:

$$G_{\text{кc}} = G_{\text{кc}}(\omega_0) + \frac{4G\beta_1\beta_2Q_{c2}(1+\beta_2)v_0}{[(1+\beta_2)^2 + v_0^2]^2} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2, \quad (4.14)$$

$$B_{\text{кc}} = B_{\text{кc}}(\omega_0) + 2GQ_{\text{н1}} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} + 2G\beta_1\beta_2Q_{c2} \frac{(1+\beta_2)^2 - v_0^2}{[(1+\beta_2)^2 + v_0^2]^2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}. \quad (4.15)$$

Подставляя (4.11) – (4.15) в (4.2), (4.3) и учитывая (4.10) – (4.12), получим систему линеаризованных уравнений для определения относительных изменений амплитуды $a_1 = \Delta A / A_0$ и частоты генерации $\chi = \Delta\omega / \omega_0$, а также тока $i = \Delta I_s / I_{s0}$ смещения АЭ:

$$\alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi + \varepsilon_{2\text{н}}\chi^2 = \Gamma\eta \cos\delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (4.16)$$

$$\beta_{11}a_1 + \xi_{11}\chi = -\Gamma\eta \sin\delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (4.17)$$

$$\alpha_{01}a_1 + \varepsilon_{01}\chi = i, \quad (4.18)$$

где $\varepsilon_{11} = \varepsilon_s + \varepsilon_{\text{кc}}$ – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние изменений частоты на амплитуду колебаний через электронную проводимость АЭ $\varepsilon_s = (\omega_0 / 2G_{s0})(\partial G_s / \partial \omega)_0$ и частотную дисперсию КС $\varepsilon_{\text{кc}} = 2\beta_1\beta_2(1+\beta_2)Q_{c2}v[(1+\beta_2)^2 + v^2]^{-2}$; $\varepsilon_{2\text{н}} = 4\beta_1\beta_2 / (1+\beta_2)^3$ – параметр нелинейности амплитудной характеристики САД, обусловленной зависимостью $G_{\text{кc}}(\omega)$ от частоты генерации; $\xi_{11} = \xi_s + \xi_{\text{кc}}$ – параметр стабилизации частоты, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости АЭ $\xi_s = (\omega_0 / 2G_{s0})(\partial B_s / \partial \omega)_0$, а также колебательной системы $\xi_{\text{кc}} = \xi_1 + \xi_2$ генератора, рабочего $\xi_1 = Q_{\text{н}}$ и стабилизирующего $\xi_2 = \beta_1\beta_2Q_{c2}[(1+\beta_2)^2 - v^2][(1+\beta_2)^2 + v^2]^{-2}$ резонаторов; параметры α_{11} , β_{11} , α_{01} , ε_{01} описаны ранее в разделе 2.1.

Необходимо отметить, что система уравнений (4.16) – (4.18), если исключить из рассмотрения нелинейный член $\varepsilon_{2\text{н}}$, положив его равным нулю, полностью совпадает с системой уравнений (2.15) – (2.17), описывающей функционирование АД с одноконтурной КС. Отличия этих выражений состоят в абсолютных значениях входящих в эти уравнения дифференциальных параметров и зависимости ряда из них от величины частотной расстройки

ν . Это означает, что качественная сторона результатов исследований параметров и характеристик, полученных для АД с одноконтурной КС, может быть перенесена на САД. Поэтому в настоящей главе далее рассмотрены лишь особенности проявления автодинного эффекта в такой автоколебательной системе. Эти особенности связаны с высоким значением эквивалентной добротности $Q_{\text{экв}}$ КС (4.9) и зависимостью ряда параметров от величины частотной расстройки ν .

4.2. Автодинные параметры и характеристики при точной настройке резонатора

Рассмотрим особенности формирования автодинных характеристик в САД без учёта в системе (4.16) – (4.18) шумовых составляющих, полагая $a_c(t) = a_s(t) = 0$, в случае «точной настройки» ($\nu = 0$), когда частота генерации ω_0 совпадает с собственной частотой стабилизирующего резонатора ω_{c2} . При этом допускаем ещё одно условие малости сигнала, при котором, вследствие высокой добротности $Q_{\text{экв}}$ и относительно малого уровня отражённого излучения, амплитуда автодинных изменений частоты χ настолько мала, что влиянием параметра $\varepsilon_{2н}$ в (4.16) можно пренебречь. Кроме того, учтём, что частотная зависимость $Y_s(\omega)$ обычно является медленно меняющейся функцией по сравнению с зависимостью проводимостей $G_{\text{кк}}(\omega)$ и $B_{\text{кк}}(\omega)$ от частоты. Поэтому $\xi_s \ll \xi_{\text{кк}}$ и для упрощения анализа в (4.17) можно учитывать только параметры ξ_1 и ξ_2 , полагая $\xi_{11} = \xi_1 + \xi_2 = \xi_{\text{кк}}(\nu = 0) = Q_{\text{экв}}$, а также $\varepsilon_{11} = \varepsilon_s + \varepsilon_{\text{кк}}(\nu = 0) = \varepsilon_s$. Тогда система уравнений (4.16) – (4.18) принимает следующий вид:

$$\alpha_{11}a_1 + \varepsilon_s\chi = \Gamma\eta\cos\delta(t, \tau), \quad (4.19)$$

$$\beta_{11}a_1 + Q_{\text{экв}}\chi = -\Gamma\eta\sin\delta(t, \tau), \quad (4.20)$$

$$\alpha_{01}a_1 + \varepsilon_{01}\chi = i. \quad (4.21)$$

Решая эту систему методом Крамера, после преобразований получим выражения для текущих значений $i(t) = i$, $a_1(t) = a_1$ и $\omega(t) = \chi(t)\omega_0$:

$$i(t) = \Gamma K_0^{\text{ct}} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0^{\text{ct}}], \quad (4.22)$$

$$a_1(t) = \Gamma K_a^{\text{ct}} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1^{\text{ct}}], \quad (4.23)$$

$$\omega(t) = \omega_0 - \Gamma\omega_0 L_a^{\text{ct}} \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (4.24)$$

где $K_0^{\text{ct}} = \eta k_{01} (1 - \gamma \kappa_{\text{зд}}^{\text{ct}}) \sqrt{1 + (\kappa_{\text{см}}^{\text{ct}})^2} / (1 - \gamma \rho^{\text{ct}})$ – коэффициент автодетектирования автодинного отклика, характеризующий процесс передачи автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний в цепь смещения АЭ САД; $K_a^{\text{ct}} = \eta \sqrt{1 + (\rho^{\text{ct}})^2} / \alpha_{11} (1 - \gamma \rho^{\text{ct}})$ – коэффициент

автодинного усиления САД; $L_a^{ct} = \eta \sqrt{1 + \gamma^2} / Q_{\text{экв}} (1 - \gamma \rho^{ct})$ – коэффициент автодинной девиации частоты САД; $\psi_0^{ct} = \arctg(\kappa_{cm}^{ct})$, $\psi_1^{ct} = \arctg(\rho^{ct})$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы относительного фазового смещения сигнала, регистрируемого в цепи смещения АЭ, а также автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний соответственно; $\kappa_{cm}^{ct} = (\rho^{ct} - \kappa_{чд}^{ct}) / (1 - \gamma \kappa_{чд}^{ct})$ – коэффициент амплитудно-частотного смещения характеристики автодетектирования АД; $\kappa_{чд}^{ct} = \varepsilon_{01} \alpha_{11} / \alpha_{01} Q_{\text{экв}}$ – коэффициент частотного детектирования АД изменений частоты в изменения среднего значения тока АЭ; $\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$, $\rho^{ct} = \varepsilon_3 / Q_{\text{экв}}$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора; $k_{01} = \alpha_{01} / \alpha_{11}$ – коэффициент автодетектирования изохронного и изодромного генератора, у которого $\gamma = \rho^{ct} = 0$.

Выражения (4.22) – (4.24) аналогичны выражениям (2.25) – (2.27), полученным выше для одноконтурного АД. Входящие в них с индексами³ «ст» коэффициенты автодетектирования K_0^{ct} , усиления K_a^{ct} и девиации частоты L_a^{ct} , определяющие при одном и том же уровне отражённого излучения, соответствующие амплитуды автодинного отклика являются безразмерными параметрами АД. Эти параметры характеризуют его чувствительность по изменению сигнала (тока или напряжения) автодетектирования («автодетекторная чувствительность»), а также изменению амплитуды и частоты (соответственно, «амплитудная и частотная чувствительности»).

Полученные здесь коэффициенты автодетектирования K_0^{ct} и автодинного усиления K_a^{ct} отличаются по величине от аналогичных коэффициентами для случая одноконтурного АД несущественно. Однако величины коэффициентов автодинной девиации обычного L_a и стабилизированного L_a^{ct} АД, которые определяют значения автодинной девиаций частоты $\Delta \omega_m = \Gamma \omega_0 L_a$ и $\Delta \omega_{ma}^{ct} = \Gamma \omega_0 L_a^{ct}$ соответственно, отличаются значительно. Найдём степень отличия этих величин:

$$S_f = \frac{L_a}{L_a^{ct}} = \frac{\Delta \omega_m}{\Delta \omega_{ma}^{ct}} = \frac{Q_{\text{экв}}}{Q_{\text{н1}}} = 1 + \frac{Q_{c2} \beta_1 \beta_2}{Q_{\text{н1}} (1 + \beta_2)^2}, \quad (4.25)$$

Полученную величину S_f назовём «коэффициентом стабилизации» по аналогии с известным термином, принятым в теории стабилизации частоты СВЧ генераторов [71]. Величина коэффициента стабилизации в реальных конструкциях СВЧ АГ может составлять от

³ Верхние индексы «ст» здесь и далее имеют отношение к параметрам стабилизированных автодинов.

единиц до 2...3-х сотен раз.

Кроме того, величины коэффициентов неиздромности ρ^{ct} и частотного детектирования $\kappa_{чд}^{ct}$ САД также в S_f раз меньше, чем коэффициенты ρ и $\kappa_{чд}$ обычного АД: $\rho^{ct} = \varepsilon_3 / Q_{экв} = \rho / S_f$, $\kappa_{чд}^{ct} = \kappa_{чд} / Q_{экв} = \kappa_{чд} / S_f$. Поэтому при условии, когда $S_f \gg 1$, углы фазового смещения ψ_1^{ct} и ψ_0^{ct} автодинного отклика по изменению амплитуды и сигнала в цепи автодетектирования АЭ у САД, как правило, имеют малые значения.

Теперь рассмотрим поведение фазы $\delta(t, \tau)$, которая входит во все выражения (4.19) – (4.24) для автодинного отклика: $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$. Здесь, полагая автодинный отклик достаточно гладким, для фазы $\Psi(t, \tau)$ используем два первых члена разложения в ряд Тейлора по малому времени запаздывания $\tau \ll t$ [18]. Кроме того, полагаем относительное перемещение отражающего объекта на анализируемом интервале времени равномерным и прямолинейным. Тогда решение первого приближения для набега фазы $\delta(t, \tau)$ отражённого излучения с учётом (4.24) и нормировки этого перемещения принимает вид:

$$\delta(\tau_n) = 2\pi\tau_n - C_{oc}^{ct} \sin[\delta(\tau_n) + \theta], \quad (4.26)$$

где $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi = 2l / (\lambda / 2)$ – нормированное (безразмерное) время; $C_{oc}^{ct} = \Delta\omega_{ма}^{ct} \tau$ – параметр внешней обратной связи [5, 40] САД. Величина этого параметра C_{oc}^{ct} находится с известным параметром C_{oc} внешней обратной связи обычного АД в соотношении, описываемом выражением (4.25): $C_{oc} / C_{oc}^{ct} = \Delta\omega_{ма} / \Delta\omega_{ма}^{ct} = S_f$.

Трансцендентное уравнение (4.26) является неявным относительно переменной $\delta(\tau_n)$. В общем виде решение этого уравнения k -го приближения методом последовательных приближений для установившихся значений фазы имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(\tau_n) = & [2\pi\tau_n]_{(0)} - C_{oc}^{ct} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(1)} + \theta - \\ & - C_{oc}^{ct} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(2)} + \theta - \dots C_{oc}^{ct} \sin\{[2\pi\tau_n]_{(k)} + \theta\} \dots\}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Здесь отметим, что нормированные по амплитудному значению автодинные отклики по изменениям тока смещения АЭ $i(t) \equiv i(\tau_n)$ и амплитуды колебаний $a_1(t) \equiv a_1(\tau_n)$ в выражениях (4.22), (4.23) отличаются лишь углами относительного фазового смещения ψ_0^{ct} и ψ_1^{ct} . Поэтому далее будем вести расчёты для обобщённого отклика $a(\tau_n)$, в котором учитывается угол смещения ψ^{ct} . При этом под $a(\tau_n)$ будем иметь в виду $i(\tau_n)$ или $a_1(\tau_n)$. Тогда выражения для установившихся значений нормированных характеристик автодинных изменений частоты $\chi_n(\tau_n)$ и обобщённого отклика $a_n(\tau_n)$ примут вид:

$$\chi_n(\tau_n) = \chi(\tau_n)/\chi_m = -\sin[\delta(\tau_n) + \theta], \quad (4.28)$$

$$a_n(\tau_n) = a(\tau_n)/a_m = \cos[\delta(\tau_n) - \psi^{ct}], \quad (4.29)$$

где $\chi_m = \Gamma L_a^{ct}$ и $a_m = \Gamma K_a^{ct}$ или $a_m = \Gamma K_0^{ct}$ – максимальные (амплитудные) относительные изменения частоты и обобщённого отклика. Напомним, что в теории АД $\chi_n(\tau_n)$ принято называть частотной характеристикой, сокращённо «ЧХА», а $a_n(\tau_n)$ – амплитудной характеристикой АД, или «АХА» [9, 18, 40].

На рис. 4.4 представлены рассчитанные согласно выражений (4.27) – (4.29) ФХА $\delta(\tau_n)$, их производные $\Omega_a(\tau_n) = (1/2\pi) d[\delta(\tau_n)]/d\tau_n$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_n(\tau_n)$ для случаев обычного АД (кривые 1) и САД (кривые 2), у которых $C_{oc} = 0,8$ и $C_{oc}^{ct} \ll 1$ соответственно. Данные значения параметров обратной связи взяты из соображений высокого значения коэффициента стабилизации S_f САД при условии одинакового уровня отражённого излучения $\Gamma = \Gamma^{ct}$.

Из сравнения кривых на рис. 4.4 следует, что автодинные изменения частоты САД (см. кривую 2 на ЧХА $\chi_n(\tau_n)$) вследствие выполнения неравенства $C_{oc}^{ct} \ll 1$ практически гармонические, при этом набег фазы отражённой волны $\delta(\tau_n)$ изменяется почти линейно. Скорость изменения фазового набега, характеризуемая, как мгновенная разность частот излучённого и отражённого колебаний $\Omega_a(\tau_n)$, при этом изменяется слабо и практически всегда равна нормированной частоте Доплера $\Omega_a = \Omega_d = 1$, как у радиолокаторов с гомодинным построением приёмо-передатчика. Поэтому ЧХА и АХА САД при принятых здесь условиях отличаются отсутствием ангармонических искажений автодинного отклика.

Ещё одной характеристикой, используемой для наглядного представления процессов в АД, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) автодина, которая строится в координатах «автодинные изменения частоты – изменения амплитуды» и показывает неразрывную связь ЧХА и АХА. Эта характеристика, обсуждавшаяся в разделе 2.5, обычно

имеет форму эллипса, параметры и угол наклона осей которого зависят от параметров исследуемого генератора.

Пример АЧХ, рассчитанной для обычного АД при значениях коэффициентов $\gamma=1$, $\rho=-0,2$ и величине $C_{oc}=0,8$, представлен на рис. 4.5 (а). Жирными точками на эллипсе обозначены положения изображающей точки через одну десятую периода АД отклика. Скорость движения данной точки неравномерна, что хорошо видно по интервалам между жирными точками. При больших значениях параметра C_{oc} эта скорость на «нижней» стороне эллипса выше, чем на «верхней». Как видно из рисунка 4.5 (б), в случае САД, имеющего параметр обратной связи $C_{oc}^{ct} \ll 1$, движение изображающей точки становится равномерным.

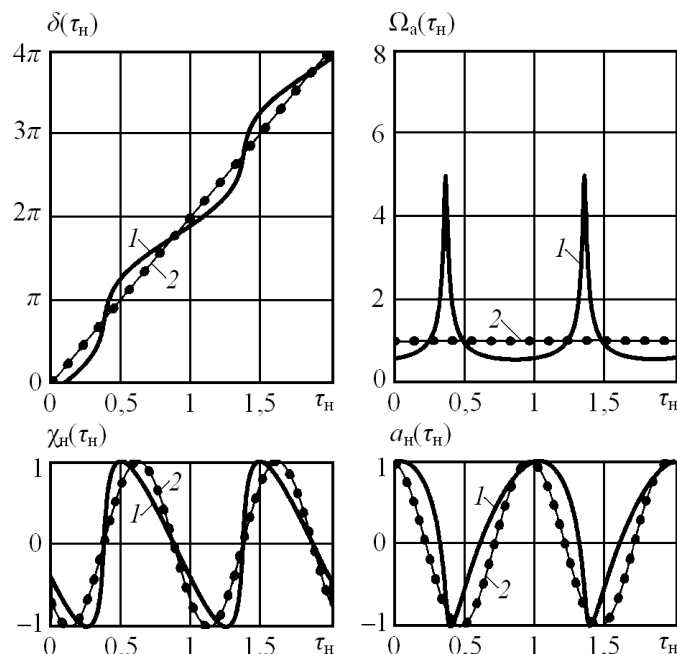
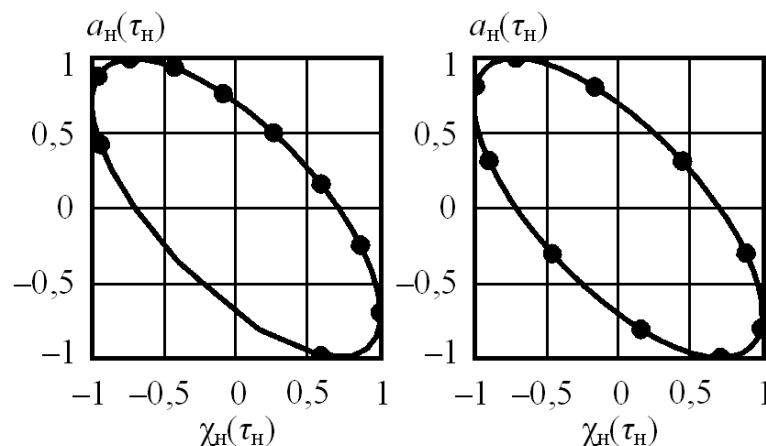


Рис. 4.4. ФХА $\delta(\tau_n)$ и их производные $\Omega_a(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_n(\tau_n)$, рассчитанные при $\gamma=1$, $\rho^{ct}=0$ и различных величинах параметров искажений: $C_{oc}=0,8$ для обычного АД (кривые 1), $C_{oc}^{ct} \ll 1$ для САД (кривые 2)



(а) (б)

Рис. 4.5. АЧХ обычного (а) и стабилизированного (б) АД

Резюмируя данный раздел, ещё раз отметим, что из полученных здесь результатов следует, что САД по сравнению с обычным АД обеспечивает значительное уменьшение величины девиации частоты и, соответственно, снижение степени искажений сигналов при сохранении функциональных возможностей АД. Эффективность применения данного способа стабилизации достаточно высока. Например, при величине C_{oc} для обычного АД, близкой к критическому значению, порядка единицы, у САД с коэффициентом $S_f \approx 100$ данный параметр имеет величину $C_{oc}^{ct} = 0,01$, т.е. сигнал является практически гармоническим. Однако в каждом случае радиолокационного применения любого АД целесообразны вычисления параметра внешней обратной связи для конкретных условий функционирования системы.

4.3. Влияние расстройки резонатора на автодинные параметры и характеристики

В настоящем разделе рассмотрим характеристики САД в зависимости от расстройки частоты генерации и собственной частоты стабилизирующего резонатора. При этом влиянием внутренних шумов генератора пренебрегаем.

Для разработки математической модели процессов в таком АД используем в качестве исходной системы уравнений выражения (4.19) – (4.21), в которых параметры ε_{11} и ξ_{11} в данном случае являются зависимыми от нормированной расстройки частоты генерации ν . Учитывая выполнение неравенств $\varepsilon_3 \ll \varepsilon_{kc}$ и $\xi_3 \ll \xi_{kc}$ при условии точной настройки ($\nu = 0$), рассмотрим далее: $\varepsilon_{11} \equiv \varepsilon_{kc}(\nu)$ и $\xi_{11} \equiv \xi_{kc}(\nu)$. При этом полагаем также, что автодинные изменения частоты настолько малы, что параметром $\varepsilon_{2н}$ нелинейности амплитудной характеристики АД можно пренебречь: $\varepsilon_{2н} = 0$.

Тогда, решая систему (4.19) – (4.21) с учётом принятых допущений, получим выражения для текущих значений $i(t)$, $a_1(t)$ и $\omega(t)$ в виде:

$$i(t) = \Gamma \eta K_0 K_{0н}(\nu) \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0(\nu)], \quad (4.30)$$

$$a_1(t) = \Gamma \eta K_a K_{ан}(\nu) \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1(\nu)], \quad (4.31)$$

$$\omega(t) = \omega_0 - \Gamma \eta \omega_0 L_{ct} L_n(\nu) \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (4.32)$$

где $K_{0н}(\nu) = K_0(\nu) / K_0$, $K_n(\nu) = K_a(\nu) / K_a$, $L_n(\nu) = L_a(\nu) / L_{ct}$ – нормированные коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты генерации, зависящие от частоты нормированной расстройки ν , причём:

$$K_0(v) = [\alpha_{01} K_a(v) \cos \psi_1(v) - \varepsilon_{01} L_a(v) \sin \theta] / \cos \psi_0(v), \quad (4.33)$$

$$K_a(v) = 1 / \alpha_{11} [1 - \gamma \rho(v)] \cos \psi_1(v), \quad (4.34)$$

$$L_a(v) = 1 / \xi_{\text{кс}}(v) [1 - \gamma \rho(v)] \cos \theta, \quad (4.35)$$

$\psi_0(v) = \arctg [\kappa_{\text{см}}(v)]$, $\psi_1(v) = \arctg [\rho(v)]$ – углы относительного фазового смещения сигнала, регистрируемого в цепи смещения АЭ, а также автодинных изменений амплитуды колебаний; $\kappa_{\text{см}}(v) = [\rho - \kappa_{\text{чд}}(v)] / [1 - \kappa_{\text{чд}}(v)\gamma]$, $\rho(v)$, $\kappa_{\text{чд}}(v)$ – зависящие от относительной отстройки v коэффициенты смещения, неиздромности и частотного детектирования АД:

$$\rho(v) = \frac{\varepsilon_{\text{кс}}(v)}{Q_{\text{с2}} q_{\text{кс}}(v)} = \frac{2(1 + \beta_2)v}{Q_{\text{с2}} [(1 + \beta_2)^2 - v^2]}, \quad (4.36)$$

$$\kappa_{\text{чд}}(v) = \frac{\varepsilon_{01} \alpha_{11}}{\alpha_{01} Q_{\text{с2}} q_{\text{кс}}(v)} = \frac{\varepsilon_{01} \alpha_{11}}{\alpha_{01}} \frac{[(1 + \beta_2)^2 + v^2]^2}{\beta_1 \beta_2 Q_{\text{с2}} [(1 + \beta_2)^2 - v^2]}, \quad (4.37)$$

Выражения (4.30) – (4.32) при величине отстройки $v = 0$ полностью совпадают с аналогичными выражениями (4.22) – (4.24) и их экспликациями, полученными выше для случая точной настройки резонатора.

Рассмотрим поведение зависящих от величины расстройки v функций коэффициентов неиздромности $\rho(v)$, частотного детектирования $\kappa_{\text{чд}}(v)$, автодетектирования $K_{\text{он}}(v)$, автодинного усиления $K_{\text{н}}(v)$ и девиации частоты $L_{\text{н}}(v)$, а также углов фазового смещения $\psi_0(v)$ и $\psi_1(v)$ при реальных величинах параметров САД.

Результаты расчетов при $\beta_1 = 10$; $\beta_2 = 1$; $Q_{\text{н1}} = 100$; $Q_{\text{с2}} = 5000$; $\alpha_{11} = 0,1$; $\varepsilon_{01} = \alpha_{01} = 10$ этих характеристик и углов смещения, выполненные согласно (4.33) – (4.37), представлены на рис. 4.6 и рис. 4.7. При построении графиков рис. 4.7 для различных значений коэффициента связи β_1 оказалось, что кривые для нормированных характеристик коэффициентов автодетектирования $K_{\text{он}}(v)$ и автодинного усиления $K_{\text{н}}(v)$ практически сливаются в одну общую характеристику (см. кривые 2 на рис. 4.7 (а), 4.7 (б)). Поэтому далее будем рассматривать их под общим обозначением как $K_{\text{н}}(v)$.

Из графиков рис. 4.6 (а), 4.6 (б) и выражений (4.36), (4.37) видно, что в пределах полосы пропускания стабилизирующего резонатора, где $|v| < 1$, благодаря его высокой добротности величины коэффициентов неиздромности и частотного детектирования пренебрежимо малы. По этой причине углами фазового смещения $\psi_0(v)$ и $\psi_1(v)$ в пределах полосы пропускания этого резонатора для САД также можно пренебречь (см. графики рис. 4.6 (в), 4.6 (г)). Однако за пределами этой полосы величины указанных коэффициентов и углов смещения резко возрастают. При этом вариации величины коэффициента связи β_1 оказывают слабое влияние на

общий характер указанных зависимостей (см. графики рисунков 4.6 (б) и 4.6 (з)). Необходимо отметить также, что фазовое смещение θ характеристики автодинной девиации частоты $L_n(v)$ не зависит от расстройки частоты v стабилизирующего резонатора.

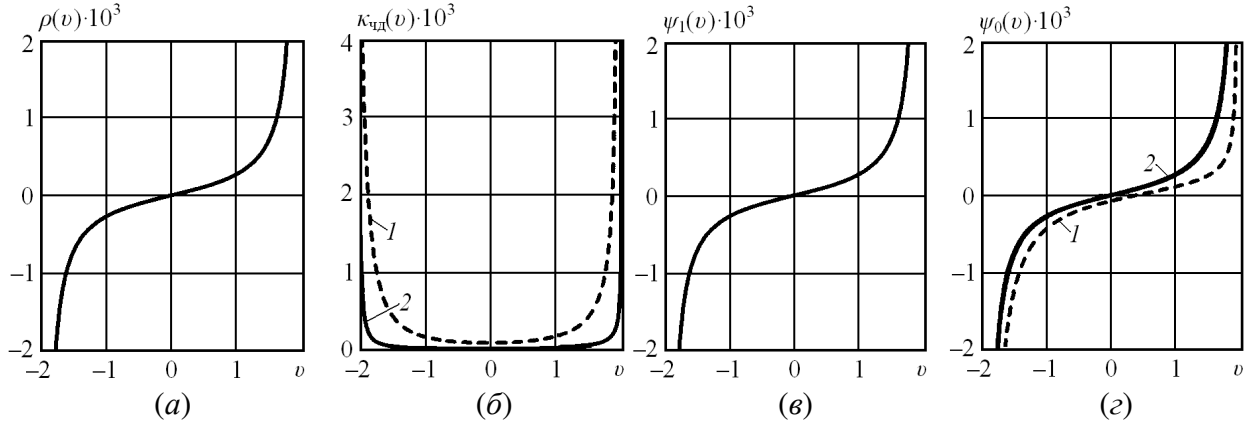


Рис. 4.6. Графики характеристик коэффициентов $\rho(v)$ (а), $\kappa_{нд}(v)$ (б) и углов фазового смещения $\psi_1(v)$ (в), $\psi_0(v)$ (г) (кривые 1 рассчитаны при $\beta_1 = 1$, а кривые 2 – при $\beta_1 = 10$).

Из графиков рис. 4.7 следует, что величины коэффициентов $K_n(v)$ и $L_n(v)$ внутри полосы стабилизирующего резонатора, когда $|v| < 1$, изменяется слабо, абсолютные отклонения их не превышают 3 дБ. Однако за пределами граничной частоты, когда $|v| > 1$, величины этих коэффициентов резко возрастают, причём характеристика частотной зависимости $L_n(v)$ растёт быстрее, чем коэффициентов $K_n(v)$. Кроме того, характеристика частотной чувствительности $L_n(v)$ является симметричной функцией, а характеристика $K_n(v)$ – асимметрична относительно оси ординат. Данная асимметрия обусловлена совместным действием неиздромности и неизохронности генератора. При смене знака одного из этих параметров происходят зеркальные изменения хода кривой $K_n(v)$ относительно оси ординат.

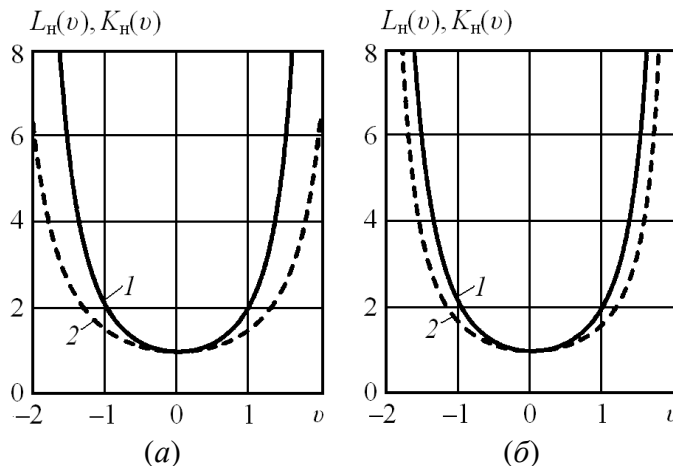


Рис. 4.7. Нормированные характеристики коэффициентов автодинной девиации частоты $L_n(v)$ (кривые 1), автодетектирования и усиления $K_n(v)$ (кривые 2), рассчитанные при $\beta_1 = 1$ (а) и

$$\beta_1 = 10 \text{ (б)}.$$

Несложно показать, что частотная зависимость коэффициента стабилизации частоты $S_f(\nu)$, показывающего степень уменьшения автодинной девиации частоты генератора, является обратной функции $L_n(\nu)$. Это означает, что за пределами граничной полосы, где $|\nu| > 1$, стабилизирующее действие внешнего высокочастотного резонатора значительно ослабевает, конкретно, в $1/L_n(\nu)$ раз. Поэтому параметр внешней обратной связи C_{oc}^{ct} , необходимый для расчёта ФХА (4.27) САД, также зависит от частоты ν отстройки: $C_{oc}^{ct} \equiv C_{oc}^{ct}(\nu) = \Delta\omega_{am}^{ct}(\nu) \cdot \tau$, где $\Delta\omega_{am}^{ct}(\nu) = \Gamma \omega_0 L_a^{ct} L_n(\nu)$ – величина автодинной девиации частоты.

Из выполненного здесь анализа следует, что в АД, стабилизированном внешним высокочастотным резонатором, связанным с основным рабочим резонатором резистивно, стабилизирующее действие проявляется в наибольшей степени при точной настройке этого резонатора на частоту генерации. При этом условии САД по сравнению с обычным автодином обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов.

Наличие расстройки частоты резонатора относительно рабочей частоты генерации вызывает ослабление стабилизирующего действия этого резонатора, увеличение как амплитудных, так и частотных изменений колебаний АД, а также амплитуды сигнала автодетектирования. Данные свойства САД в ряде случаев могут найти своё применение в различных радиоволновых датчиках и измерителях, однако при этом выбор режима его работы требует учёта известного компромисса с условиями устойчивости.

4.4. Анализ «нелинейности по амплитуде» автодинных характеристик

В процессе настройки и испытаний автодинных СБРЛ, выполненных на основе САД, были обнаружены специфические искажения сигналов, характер которых не имел объяснения в известной теории одноконтурных АД. Авторами работы [44] была предложена и разработана простая математическая модель, которая позволила установить причины и найти аналитическое решение нелинейной задачи, не выходя за границы малосигнального приближения. Суть её состоит в следующем.

Если обратиться к характеристикам рис. 4.3 (б) то из них видно, что при достаточно малой амплитуде автодинных изменений частоты χ влиянием нелинейности реактивной проводимости $b_{kc}(\omega)$ можно пренебречь. При этом резистивная проводимость $g_{kc}(\omega)$ (см. рис. 4.3 (а)) на данном участке характеристики отличается значительной нелинейностью. Данная

нелинейность в исходной системе уравнений (4.19) – (4.21) учтена параметром «нелинейности амплитудной характеристики» $\varepsilon_{2н}$. Кроме того, при условии «точной настройки», будем учитывать здесь тот факт, что частотная зависимость Y_3 обычно является медленно меняющейся функцией по сравнению с зависимостью проводимостей $G_{кc}$ и $B_{кc}$ от частоты. Для принятых условий система уравнений (4.19) – (4.21) принимает следующий вид:

$$\alpha_{11}a_1 + \varepsilon_3\chi + \varepsilon_{2н}\chi^2 = \Gamma\eta\cos\delta(t, \tau), \quad (4.38)$$

$$\beta_{11}a_1 + Q_{экв}\chi = -\Gamma\eta\sin\delta(t, \tau), \quad (4.39)$$

$$\alpha_{01}a_1 + \varepsilon_0\chi = i, \quad (4.40)$$

Полагая для облегчения анализа АГ изохронным $\beta_{11} = 0$, что существенно не влияет на результаты анализа рассматриваемого процесса, решение системы (4.38) – (4.40) для $i(t)$, $a_1(t)$ и $\chi(t)$ с учётом квадратичной зависимости автодинного отклика от изменений частоты χ получим:

$$i(t) = -\Gamma^2k_{0н} + \Gamma K_{0н}\cos[\delta(t, \tau) - \psi_{0н}] + \Gamma^2k_{0н}\cos 2\delta(t, \tau), \quad (4.41)$$

$$a_1(t) = -\Gamma^2K_{ан}k_{ан} + \Gamma K_{ан}\cos[\delta(t, \tau) - \psi_{1н}] + \Gamma^2K_{ан}k_{ан}\cos 2\delta(t, \tau), \quad (4.42)$$

$$\chi(t) = -\Gamma L_{и}\sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (4.43)$$

где $K_{0н} = \eta\alpha_{01}\sqrt{1 + \kappa_{и}^2}/\alpha_{11}$, $K_{ан} = \eta\sqrt{1 + \rho^2}/\alpha_{11}$, $L_{и} = \eta/Q_{экв}$ – коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты автодинного отклика изохронного генератора; $k_{ан} = \eta\varepsilon_{2н}\cos\psi_1/(2Q_{экв}^2)$, $k_{0н} = \eta^2\alpha_{01}\varepsilon_{2н}/2Q_{экв}^2\alpha_{11}$ – коэффициенты, характеризующие процесс усиления и автодетектирования продуктов преобразования второго порядка; $\psi_{0н} = \arctg(\kappa_{и})$, $\psi_{1н} = \arctg(\rho)$ – углы относительного фазового смещения автодинных изменений сигнала автодетектирования и амплитуды автоколебаний; $\kappa_{и} = \rho - \kappa_{чд}$ – коэффициент амплитудно-частотного смещения характеристики автодетектирования автодинного генератора.

Из выражений (4.41) и (4.42) следует, что в данном случае отклик в цепи смещения АЭ $i(t)$ и по изменению амплитуды колебаний $a_1(t)$, кроме основной составляющей (вторые слагаемые), содержит также результаты нелинейного преобразования: постоянную составляющую (первые члены) и вторую гармонику (третьи члены). При этом уровень составляющих нелинейного преобразования пропорционален квадрату величины модуля коэффициента отражения Γ . Учитывая отличие этих сигналов только в фазах $\psi_{0н}$ и $\psi_{1н}$, перепишем (4.44) и (4.45) в общем, нормированном относительно максимальных (амплитудных) значений ($a_m = \Gamma K_{ан}$ или $a_m = \Gamma K_{0н}$), виде:

$$a_n(\tau_n) = a(\tau_n) / a_m = -a_{m2} + \cos[\delta(t, \tau) - \psi] + a_{m2} \cos 2\delta(t, \tau), \quad (4.44)$$

где $a_{m2} = \Gamma k_{an}$ – относительные уровни постоянной составляющей и второй гармоники отклика.

На рис. 4.8 представлены рассчитанные согласно (4.44) с учётом (4.27) АХА $a_n(\tau_n)$ для случаев, когда $C_{oc}^{ct} \ll 1$ (см. рис. 4.8 (а) – 4.8 (б)) и $C_{oc}^{ct} = 0,8$ (см. рис. 4.8 (г) – 4.8 (е)), при величинах относительной амплитуды: $a_{m2} = 0$ (а), (г), $a_{m2} = 0,2$ (б), (д), $a_{m2} = 0,5$ (в), (е).

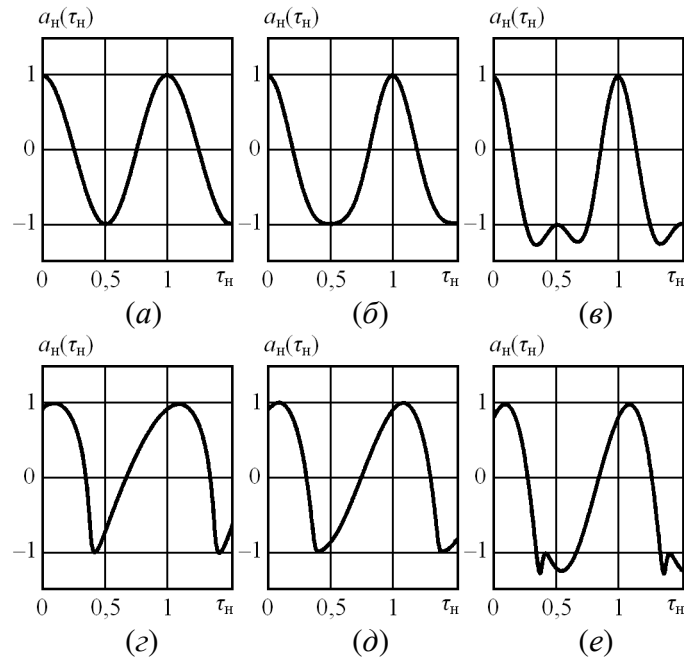


Рис. 4.8. АХА, рассчитанные с учётом «нелинейности» автодина по амплитуде

Из полученных характеристик (см. рис. 4.8 (а), 4.8 (б)) видно, что, несмотря на высокую стабильность частоты колебаний генератора и малую величину параметра C_{oc}^{ct} , в АД с высокочастотным внешним резонатором при воздействии отражённого излучения высокого уровня могут присутствовать дополнительные искажения сигнала. Как следует из результатов проведенного анализа, данные искажения обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы. Характер этих искажений существенно отличается от исследованных ранее искажений в одноконтурных АД, вызванных деформацией ФХА из-за автодинных изменений частоты колебаний, динамикой формирования АД отклика или амплитудными ограничениями электронной проводимости АЭ.

4.5. Шумовые параметры стабилизированных генераторов

Используя разработанную выше математическую модель САД, выполним анализ влияния внутренних параметров генератора, таких как его неизохронность и неизодромность, а также величины расстройки стабилизирующего резонатора относительно частоты генерации, на уровень амплитудного и частотного шума, а также шума в цепи смещения АЭ автономного

генератора. Решение системы (4.19) – (4.21) методом Крамера, с учетом тождеств $\varepsilon_{11} \equiv \varepsilon_{11}(v)$, $\xi_{11} \equiv \xi_{11}(v)$ и при отсутствии отражённого излучения, когда $\Gamma = 0$, а также без учёта «нелинейности» автодина по амплитуде имеет вид:

$$\chi_{ш}(v, t) = -\frac{a_s(t) + \gamma a_c(t)}{\xi_{11}(v)[1 - \gamma\rho(v)]}, \quad (4.45)$$

$$a_{ш}(v, t) = \frac{a_c(t) + \rho(v)a_s(t)}{\alpha_{11}[1 - \gamma\rho(v)]}, \quad (4.46)$$

$$i_{ш}(v, t) = k_{01}[1 - \gamma\kappa_{чд}(v)] \frac{a_c(t) + \kappa_{см}(v)a_s(t)}{1 - \gamma\rho(v)}. \quad (4.47)$$

Полученные выражения (4.45) – (4.47) отличаются от приведенных выше аналогичных выражений (3.6) одноконтурного генератора их частотной зависимостью от величины v .

Используя разработанный выше подход, перепишем выражения (3.8) – (3.11) для расчета эффективных значений частотного шума $\Delta f_{эфф}(v)$, относительных уровней шума амплитуды колебаний $a_{шэфф}(v)$, среднего значения флуктуаций тока $i_{шэфф}(v)$ смещения АЭ, а также предельного энергетического потенциала $\Pi_{пр}(v)$ АД при регистрации сигналов по изменению амплитуды $\Pi_{пр}^{(a)}(v)$ и в цепи смещения АЭ $\Pi_{пр}^{(i)}(v)$ с учётом величины относительной расстройки v стабилизирующего резонатора в виде:

$$\Delta f_{эфф}(v) = \sqrt{[\Delta f(v, t)]^2} = \frac{2f_0\sqrt{1 + \gamma^2}}{\xi_{11}(v)(1 - \gamma\rho(v))} \sqrt{\frac{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F}{P_0}}; \quad (4.48)$$

$$a_{шэфф}(v) = \sqrt{|a_{ш}(v, t)|^2} = \frac{2\sqrt{1 + [\rho(v)]^2}}{\alpha_{11}[1 - \gamma\rho(v)]} \sqrt{\frac{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F}{P_0}}; \quad (4.49)$$

$$i_{шэфф}(v) = \sqrt{[i_{ш}(v, t)]^2} = 2k_{01}\sqrt{1 + [\kappa_{см}(v)]^2} \frac{1 - \gamma\kappa_{чд}(v)}{1 - \gamma\rho(v)} \sqrt{\frac{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F}{P_0}}; \quad (4.50)$$

$$\Pi_{пр}^{(a)}(v) = 1/|a_{ш}(v, t)|^2, \quad \Pi_{пр}^{(i)}(v) = 1/[i_{ш}(v, t)]^2. \quad (4.51)$$

При этом в ходе получения данных выражений учитывали статистическую независимость квадратурных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$, произведение которых при усреднении равно нулю: $\overline{a_s(t)a_c(t)} = 0$, а также известные энергетические соотношения (3.7) между ними.

Результаты вычислений согласно выражениям (4.48) – (4.51) для стабилизированного генератора при точной настройке ($v = 0$) представлены в таблице 4.1. Исходные данные для расчётов имели следующие значения: $\gamma = 1$; $\varepsilon_3 = 10$; $\alpha_{11} = 0,05$; $\varepsilon_{01} = 0,5$; $\alpha_{01} = 0,5$; $T_{ш} = 300$ К; $M_{ш} = 20$ дБ; $\xi_{11}(v = 0) = Q_{экв} = 2000$; $\Delta F = 1000$ Гц; $f_0 = 37,5$ ГГц; $P_0 = 0,012$; $A_0 = 3$ В; $I_{30} = 0,2$ А. В первой строчке этой таблицы для сравнения приведены данные из таблицы 4.1,

рассчитанные для обычного генератора.

Из данных таблицы 4.1 видно, что у генератора с внешним дополнительным резонатором флуктуации частоты значительно меньше, чем у нестабилизированного генератора, при этом остальные показатели по уровню шумов, а также энергетическим потенциалам отличаются незначительно.

Таблица 4.1. Расчетные значения шумовых параметров АГ

Тип генератора	$\Delta A_{эфф}$ (мкВ)	$\Delta I_{эфф}$ (мкА)	$\Delta f_{эфф}$ (Гц)	$\Pi_{пр}^{(a)}$ (дБ)	$\Pi_{пр}^{(i)}$ (дБ)
Нестабиллизированный	30,3	1,01	479,6	99,9	105,9
Стабилизированный	28,3	0,94	12,52	100,5	106,5

Учёт в выражениях (4.48) – (4.50) зависимости параметров $\xi_{кс} \equiv \xi_{кс}(v)$, $\rho \equiv \rho(v)$ и $\kappa_{чд} \equiv \kappa_{чд}(v)$ от величины частотной расстройки v , как это сделано в разделе 4.3, позволяет установить влияние отстройки v частоты стабилизирующего резонатора на шумовые характеристики⁴ генератора. Результаты расчётов по формулам (4.48) – (4.50) этих характеристик с учётом зависимостей (4.36) и (4.37) в виде графиков: $\Delta f_{эфф}(v)$, $a_{шэфф}(v)$ и $i_{шэфф}(v)$, при $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 1$ и прежних прочих значениях параметров представлены на рис. 4.9.

Из кривой 1 рис. 4.9 видно, что величина эффективной шумовой модуляции частоты $\Delta f_{эфф}(v)$ также, как и автодинной девиация частоты (см. кривые 1 на рис. 4.7), имеет наименьшее значение при условии точной настройки стабилизирующего резонатора: $v = 0$. За пределами полосы этого резонатора ($|v| > 1$) ширина «спектральной линии» генерации быстро растёт. При этом уровни эффективных значений амплитудного шума $a_{шэфф}(v)$ и шумового тока $i_{шэфф}(v)$ смещения АЭ в полосе стабилизирующего резонатора ($|v| < 1$) практически не изменяются (см. кривые 2 и 3 на рис. 4.9). В то же время амплитудная и автодетекторная чувствительности САД, как показано выше (см. кривые 2 на рис. 4.7) при наличии расстройки v заметно увеличивается. Это означает, что за счёт некоторой расстройки резонатора у автодина со стабилизацией частоты внешним резонатором, есть возможность несколько увеличить энергетический потенциал автодинной системы.

Таким образом, результаты теоретического анализа и расчетов показали, что стабилизация

⁴ Данные выражения здесь не приводим из-за их громоздкости.

частоты с помощью дополнительного высокочастотного резонатора значительно снижает частотные шумы генератора, что согласуется с известными результатами (см. стр. 83, [73]). При этом уровни амплитудного шума генератора, энергетического потенциала АД и шума в цепи смещения АЭ при использовании такого резонатора изменяются незначительно.

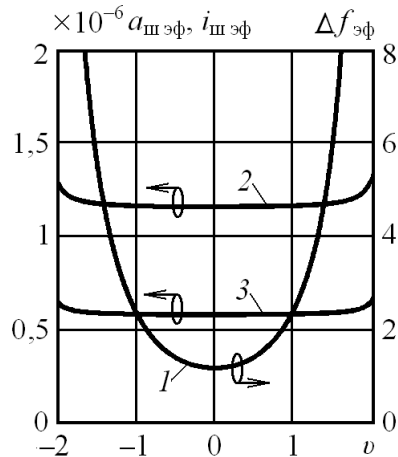


Рис. 4.9. Характеристики зависимости эффективных значений флуктуаций частоты $\Delta f_{эф}(v)$ (кривая 1), уровня амплитудного шума $a_{ш\ эф}(v)$ (кривая 2) и шумового тока $i_{ш\ эф}(v)$ (кривая 3) в цепи смещения генератора от величины относительной расстройки v стабилизирующего резонатора

4.6. Автодинные и шумовые характеристики

Решение исходной системы уравнений (4.17) – (4.19) с учётом зависимости входящих в них параметров от расстройки частоты v методом Крамера для нормированных изменений частоты $\chi_n(v, \tau_n, t)$, амплитуды $a_n(v, \tau_n, t)$ и величины смещения $i_n(v, \tau_n, t)$ на АЭ при автодетектировании имеет вид:

$$\chi_n(v, \tau_n, t) = -\chi_{шн}(t) - \sin[\delta(v, \tau_n, t) + \theta], \quad (4.52)$$

$$a_n(v, \tau_n, t) = a_{шн}(v, t) + \cos[\delta(v, \tau_n, t) - \psi_1(v)], \quad (4.53)$$

$$i_n(v, \tau_n, t) = i_{шн}(v, t) + \cos[\delta(v, \tau_n, t) - \psi_0(v)], \quad (4.54)$$

где $\chi_{шн}(v, t)$, $a_{шн}(v, t)$, $i_{шн}(v, t)$ – составляющие нормированного (относительного) уровня частотного и амплитудного шума, а также шума в цепи смещения АЭ соответственно:

$$\chi_{шн}(v, t) = [a_s(t) + \gamma a_c(t)] / L_{сш}, \quad (4.55)$$

$$a_{шн}(v, t) = [a_c(t) + \rho(v) a_s(t)] / K_{сш}(v), \quad (4.56)$$

$$i_{шн}(v, t) = [a_c(t) + \kappa_{см}(v) a_s(t)] / M_{сш}(v), \quad (4.57)$$

$L_{сш}$, $K_{сш}(v)$, $M_{сш}(v)$ – коэффициенты, характеризующие отношение сигнал/шум автодинных изменений частоты и амплитуды, а также сигнала автодетектирования соответственно:

$$L_{c/ш} = \Gamma \eta \sqrt{1 + \gamma^2}, \quad K_{c/ш}(v) = \Gamma \eta \sqrt{1 + [\rho(v)]^2}, \quad M_{c/ш}(v) = \Gamma \eta \sqrt{1 + [\kappa_{cm}(v)]^2}; \quad (4.58)$$

$\delta(v, \tau_n, t) = \omega \tau$ – набег фазы СВЧ излучения за время τ с учётом шумов генератора:

$$\delta(v, \tau_n, t) = 2\pi\tau_n - p_{ш}(v, t) - C_{oc}(v) \sin[\delta(v, \tau_n, t) + \theta], \quad (4.59)$$

$p_{ш}(v, t) = \Delta\omega_{ш}(v, t)\tau = C_{oc}(v)\chi_{ш}(v, t)$ – индекс модуляции фазы, обусловленный частотными шумами АД; $\Delta\omega_{ш}(v, t)$ – шумовая модуляция частоты колебаний:

$$\Delta\omega_{ш}(v, t) = \omega_0[a_s(t) + \gamma a_c(t)]/\xi_{11}(v)[1 - \gamma\rho(v)]. \quad (4.60)$$

При выполнении условий $C_{oc}(v) < 1$ решение уравнения (4.59) методом последовательных приближений n -го порядка имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(v, \tau_n, t)_{(n)} = & [2\pi\tau_n]_{(0)} - p_{ш}(v, t) - C_{oc}(v) \sin\{[2\pi\tau_n]_{(1)} - \\ & - p_{ш}(v, t) + \theta - C_{oc}(v) \sin\{[2\pi\tau_n]_{(2)} - p_{ш}(v, t) + \theta - \dots \\ & \dots - C_{oc}(v) \sin\{[2\pi\tau_n]_{(n-1)} - p_{ш}(v, t) + \theta - C_{oc}(v) \sin\{[2\pi\tau_n]_{(n)} - p_{ш}(v, t) + \theta\} \dots\}\}. \end{aligned} \quad (4.61)$$

Полученные здесь выражения (4.52) – (4.57) с учётом (4.61) в случае точной настройки стабилизирующего резонатора, когда $v = 0$, полностью соответствуют выражениям (3.1) – (3.2) полученным для одноконтурных АД. При этом результаты выполненных в главе 3 исследований полностью переносятся на рассматриваемый здесь случай. Это означает, что в условиях одновременно сравнительно большой дальности до объекта и высокого уровня отражённого излучения, когда $C_{oc} \sim 1$, в САД также, как в обычных АД, могут наблюдаться ангармонические искажения автодинного отклика и периодическая нестационарность уровня шумов. Такая ситуация возможна на практике в случаях, например, когда излучение распространяется до отражателя по волноводу или диаграмма направленности антенны очень узкая.

Однако при сравнении этих автодинов в условиях одинакового уровня отражённого излучения, высокое значение коэффициента стабилизации частоты генератора с внешним высокочастотным резонатором обеспечивает значительное уменьшение уровня искажений сигнала и, соответственно, обсуждавшаяся выше нестационарность уровня шумов у САД может отсутствовать.

Наличие расстройки стабилизирующего резонатора относительно частоты генерации вызывает рост величины автодинной девиации частоты (см. рис. 4.7), уровня аддитивной составляющей собственных шумов (см. рис. 4.9) и появление дополнительных углов фазового смещения $\psi_1(v)$ и $\psi_0(v)$ автодинных изменений $i(t)$, $a_1(t)$ и $\omega(t)$ (см. рис. 4.6) САД.

4.7. Динамический диапазон

Наблюдающееся у всех типов АД явление скачков сигнала, когда величина параметра внешней обратной связи достигает граничного значения $C_{oc} = 1$, является основной причиной ограничения (сверху) динамического диапазона автодинных СБРЛ. С другой стороны (снизу) динамический диапазон зависит от уровня собственных шумов АД, который связан с предельным энергетическим потенциалом $\Pi_{пр}$ СБРЛ. Выше (см. главу 3) получена формула (3.17) для расчёта динамического диапазона d_a одноконтурного АД для случаев регистрации сигналов по изменению амплитуды колебаний или в цепи смещения АЭ. Для расчёта динамического диапазона $d_a^{ст}$ САД данная формула имеет вид:

$$d_a^{ст} = \Gamma_{пр}^{ст} \sqrt{\Pi_{пр}^{ст}} = N_{пр}^{ст} / N, \quad (4.62)$$

где $\Gamma_{пр}^{ст}$ – предельное значение коэффициента затухания Γ , при котором начинаются скачки выходного сигнала САД; $N_{пр}^{ст}$ – предельное расстояние, выраженное в количестве полуволн СВЧ излучения, до которого скачки сигналов САД могут отсутствовать:

$$N_{пр}^{ст} = \sqrt{\Pi_{пр}^{ст}} \frac{Q_{эkv} (1 - \gamma \rho^{ст})}{2\pi\eta\sqrt{1 + \gamma^2}}. \quad (4.63)$$

Если пренебречь в выражениях (4.62), (4.63) отличием величин коэффициентов $\rho^{ст}$, ρ и предельных потенциалов $\Pi_{пр}^{ст}$, $\Pi_{пр}$ для стабилизированного и нестабилизированного автодинов, то выигрыш по ширине динамического диапазона $\Delta_{ст}$, обеспечиваемого стабилизированным генератором, определяется практически величиной коэффициента стабилизации S_f частоты. Тогда приближённое выражение для оценки этого выигрыша с учетом (4.9) имеет вид:

$$\Delta_{ст} \approx Q_{эkv} / Q_n = S_f. \quad (4.64)$$

Результат вычисления $N_{пр}^{ст}$ согласно (4.63) для обычного модуля «Тигель-08» при $\gamma = 1$; $\rho = -0,2$; $Q_n = 55$; $\eta = 1$ и реальном значении предельного потенциала в полосе частот от 0,5 кГц до 1,5 кГц $\Pi_{пр} = 83$ дБ получен следующим: $N_{пр} = 104918$, что составляет в диапазоне 8-мм предельное расстояние $l_{пр} = 419$ м.

Результаты аналогичных вычислений для этого же модуля, но стабилизированного по частоте внешним резонатором с точной настройкой, имеющего прежнее значение потенциала и $Q_{эkv} = 2000$, следующие: $N_{пр}^{ст} = 3,18 \cdot 10^6$, т.е. $l_{пр} = 12717$ м. Данные результаты означают, что на

расстоянии 10 м до отражающего объекта динамический диапазон d_a нестабилизированного АД составляет 32,4 дБ, а для стабилизированного – 62,1 дБ. Расчёт по формуле (3.64) даёт значение выигрыша в 31,2 дБ, что практически совпадает с разницей рассчитанных выше значений.

Таким образом, из результатов теоретического анализа и расчетов следует, что применение стабилизации частоты АД внешним высокочастотным резонатором обеспечивает значительное расширение динамического диапазона автодинной СБРЛ.

4.8. Выводы

В результате выполненных исследований особенностей автодинных сигнала в САД с внешним высокочастотным резонатором установлено, что основные параметры данных АД, такие как коэффициенты автодетектирования и автодинного усиления у них практически такие же, как и у обычных (не стабилизированных) АД. Кроме того, им также свойственны искажения сигналов, как и обычным АД, но уровень этих искажений существенно ниже вследствие меньшего значения величины автодинной девиации частоты, что существенно расширяет динамический диапазон СБРЛ.

Степень уменьшения девиации частоты и параметра искажений САД предложено характеризовать коэффициентом стабилизации, который показывает во сколько раз величина автодинной девиации частоты исследуемого генератора меньше, чем у обычного АД при одном и том же уровне отражённого излучения. Данный параметр САД является важнейшим, поскольку он характеризует выигрыш по ряду основных параметров автодинной системы.

Из полученных результатов следует, что в АД, стабилизированных внешним высокочастотным резонатором, связанным с основным рабочим резонатором резистивно, стабилизирующее действие проявляется в наибольшей степени при точной настройке этого резонатора на частоту генерации АД. Наличие расстройки частоты резонатора относительно рабочей частоты генерации вызывает ослабление стабилизирующего действия этого резонатора, увеличение как амплитудной, так и частотной чувствительности. Данное свойство САД в ряде случаев может найти своё применение в различных радиоволновых датчиках и измерителях, однако при этом выбор режима его работы требует учёта известного компромисса с условиями устойчивости.

Выявленные в настоящей работе специфические ангармонические нелинейные искажения автодинного сигнала, которые наблюдаются при увеличении уровня отражённого излучения, в отличие от обычных (одноконтурных) АД обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы. Природа данных искажений состоит в том, что при

автодинных изменениях частоты автоколебаний происходит дополнительная модуляция амплитуды генерации на каждом скате частотной характеристики с удвоенной частотой. Эта модуляция накладывается на естественные автодинные изменения амплитуды, которые обусловлены изменениями фазы отражённой волны.

Исследования шумовых характеристик САД показали, что данным автодинам также, как и обычным АД с одноконтурной КС в случае сильной обратной связи, когда величина этого параметра соизмерима с единицей, в автодине наблюдается периодическая, кратная половине длины волны нестационарность уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающей поверхности, причём в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю малой величины обратной связи могут заметно снижаться, а в других – значительно расти. При этом увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики АД, а его уменьшению – более пологие.

Стабилизация частоты АД с помощью дополнительного высокочастотного резонатора способствует исключению данной нестационарности шумовых характеристик и улучшению иных тактико-технических показателей автодинных систем при одном и том же уровне отражённого излучения. Например, введением некоторой расстройки стабилизирующего резонатора относительно частоты генерации можно несколько увеличить потенциал системы, поскольку при этом амплитудная и автодетекторная чувствительность АД к отражённому сигналу возрастает, а уровень шумов сохраняется практически прежним.

Данные особенности формирования автодинных и шумовых характеристик СВЧ и КВЧ генераторов необходимо учитывать при обработке выходных сигналов автодинных СБРЛ, а также датчиков вибраций и малых перемещений. При работе этих датчиков с удалёнными объектами и в условиях высокого уровня отражённого излучения необходимо учитывать возможность появления не только специфических деформаций дискриминационной характеристики, но и зависимость уровня шума АД от выбранной рабочей точки.

Результаты выполненных исследований представляются полезными при интерпретации результатов экспериментальных исследований АД со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором, при анализе особенностей формирования сигналов таких АД и прочих генераторов, работающих в условиях воздействия собственного отражённого излучения, а также при оптимизации параметров СВЧ генераторов, предназначенных для СБРЛ.

Перспективы дальнейших исследований автодинов, стабилизированных по частоте внешним резонатором, связаны с оптимизацией величины связи с резонатором и нагрузкой для реализации наибольшего энергетического потенциала системы при заданном динамическом

диапазоне уровней воздействия отраженного излучения, а также анализом шумовых характеристик с учетом флуктуаций источника смещения. Данные исследования необходимы для разработки инженерных методов расчёта автодинных режимов работы генераторов, дальнейшего улучшения качественных показателей СБРЛ, выполненных на основе автодинов, и расширения области их применения.

Полученные результаты исследований показали преимущества автодинов со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизованными) автодинами и целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, стабилизированных дополнительным высокочастотным резонатором. При этом в качестве активного элемента перспективных автодинных модулей целесообразно использовать не только мезозонных ганновских структур [17], но и полевых транзисторов, частота генерации опытных образцов которых на сегодня превосходит терагерцовый рубеж, а также предложенных авторами доклада [76] новых активных элементов с управляемой характеристикой, обладающих пониженным уровнем собственных шумов.

В качестве колебательной системы таких автодинов представляется интересным применение интегрированных с активным элементом автодина высокочастотных резонансных структур, выполненных в виде распределённых брэгговских отражателей [78, 79]. Данная структура, широко используемая в настоящее время в мазерах и лазерах, обеспечивает, с одной стороны, стабилизацию частоты генерации благодаря ее высокой частотной селективности и, с другой стороны, – возможность параметрического “электронного” управления частотой генерации. Благодаря отмеченным здесь свойствам брэгговские резонаторы могут найти применение также в автодинных модулях миллиметрового диапазона для СБРЛ с частотной модуляцией [21], однако вопрос конструкторско-технологического воплощения этой идеи требует своего дополнительного изучения.

Глава 5. Экспериментальные исследования автодинных модулей

В настоящей главе обобщены результаты экспериментальных исследований обычных и стабилизированных по частоте автодинных модулей «Тигель-08М» (см. раздел 1.1). Цель экспериментальных исследований – проверка основных выводов теоретического анализа указанных АД.

В разделе 5.1 дано описание экспериментального стенда, предназначенного для изучения АД. В последующих разделах представлены результаты экспериментальных исследований автодинных параметров и характеристик обычных АД (см. раздел 5.2), рассмотрены отличия характеристик обычного и стабилизированного АД (см. раздел 5.3), показано влияние на эти параметры и характеристики расстройки частоты резонатора САД (см. раздел 5.4). В разделе 5.5 рассмотрены особенности сигналов при наличии «нелинейности по амплитуде». Шумовые параметры и характеристики стабилизированных генераторов рассмотрены в разделе 5.6, а САД – в разделе 5.7. Итоги исследований подведены в разделе 5.8 «Выводы».

Основные результаты настоящей главы опубликованы в журнальных статьях [29 – 33, 38 – 40, 44], в материалах докладов различных научно-технических конференций [28, 41, 42, 45] и представлены в отчёте о НИР [33].

5.1. Экспериментальный стенд и оборудование

Среди измерительных стендов для экспериментальных исследований и определения параметров как автодинных, так и гомодинных приёмо-передающих устройств СВЧ диапазонов, используемых в радиолокационных системах, нашли широкое применение стенды, в которых взаимодействие радиолокатора и имитатора посредством электромагнитного излучения происходит через волноводный тракт [9, 17–22, 122–124]. Проведение исследований на таких стендах обеспечивает отсутствие помех излучения, отражённого от посторонних предметов, и более высокую точность измерений в широком диапазоне уровней отражённого сигнала, чем это возможно на стендах открытого типа, в которых такое взаимодействие происходит через пространство с применением приёмо-передающих антенн [125, 126].

В настоящей работе для исследований обычных (нестабилизированных) АД и АД со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором используется экспериментальный стенд, функциональная схема которого приведена на рис. 5.1. Данный стенд обеспечивает возможность регистрации автодинного отклика в цепи питания, а также по

изменению амплитуды и частоты при вариации расстояния до отражателя-имитатора, скорости его перемещения, уровня отражённого сигнала и других факторов.

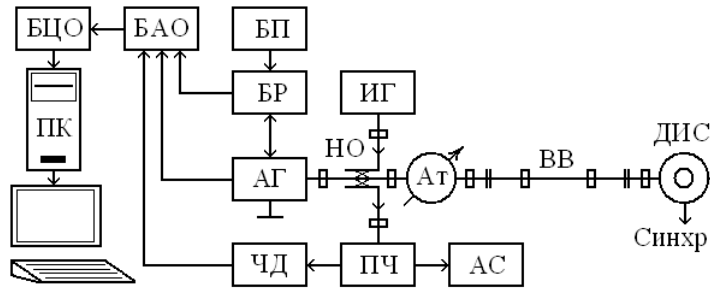


Рис. 5.1. Функциональная схема экспериментальной установки для изучения АД

Исследуемый генератор в этом стенде (см. рис. 5.1) связан с доплеровским имитатором сигнала ДИС волноводным трактом ВВ, в котором находятся также переменный аттенюатор Ат, моделирующий затухание распространяющегося в пространстве излучения, и направленный ответвитель НО. Отрезок волновода ВВ в стенде требуемой длины предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения. Боковые плечи направленного ответвителя НО связаны через развязывающие вентили с преобразователем частоты ПЧ, переносящим спектр излучения АГ на частоту примерно 1,0 GHz, и измерительным генератором СВЧ ИГ. Выходной сигнал преобразователя частоты ПЧ далее следует на широкополосный частотный дискриминатор ЧД и анализатор спектра АС типа USB-SA44B. Питание от стабилизированного блока питания БП на исследуемый АГ подаётся через блок регистрации БР автодинного сигнала, который предназначен для преобразования автодинных вариаций среднего значения тока АЭ генератора в напряжение выходного сигнала [111].

Сигналы с выходов блока регистрации БР (сигнал автодетектирования $a_0(\tau)$), детектора огибающей (отклик по изменению амплитуды $a_1(\tau)$) колебаний генератора АГ) и частотного дискриминатора ЧД (отклик по изменению частоты колебаний $\chi(\tau)$) подаются для отдельного усиления и фильтрации в блок аналоговой обработки БАО. С выхода БАО они следуют на входы каналов аналогового ввода модуля NI-9205 фирмы National Instruments в составе платформы DAQ-9172 блока цифровой обработки БЦО. Далее оцифрованные сигналы поступают по интерфейсу USB в персональный компьютер ПК для обработки с помощью виртуального прибора, созданного в среде программирования LabVIEW.

Блок частотного дискриминатора ЧД выполнен с применением усилителей-ограничителей на входе и схемы широкополосного частотного дискриминатора на основе активного балансного смесителя (перемножителя) IAM-81008. Принцип действия блока ЧД основан на интегрировании результата перемножения прямого сигнала и сигнала, сдвинутого по фазе на

угол 90° .

Для исследований АД в стенде использовался электромеханический имитатор доплеровского сигнала. Фотография внешнего вида и эскиз его конструкции представлены на рисунке 5.2. Основой имитатора (см. рис. 5.2 (б)) является изогнутый в полуокружность отрезок прямоугольного волновода 1, в котором вдоль середины широкой стенки внутренней стороны полукольца выполнена щель 2. В полость волновода через эту щель введены штыревые отражатели 3, укрепленные на диск-маховик 4, который установлен на оси электродвигателя 5. При этом в одном из концов изогнутого волновода установлена поглощающая нагрузка 6, а второй конец является входом-выходом 7 имитатора. Коэффициент отражения Γ в имитаторе устанавливается глубиной погружения штыревых отражателей 3 в волновод 1. Фотодатчик 8, укрепленный на корпусе имитатора за пределами полукольца волновода 1, служит для фиксации момента прохождения штыревым отражателем узкого просвета между оптоэлектронной парой светодиод – фотодиод. Выходные импульсы 9 фотодатчика предназначены для синхронизации развёртки осциллографа.

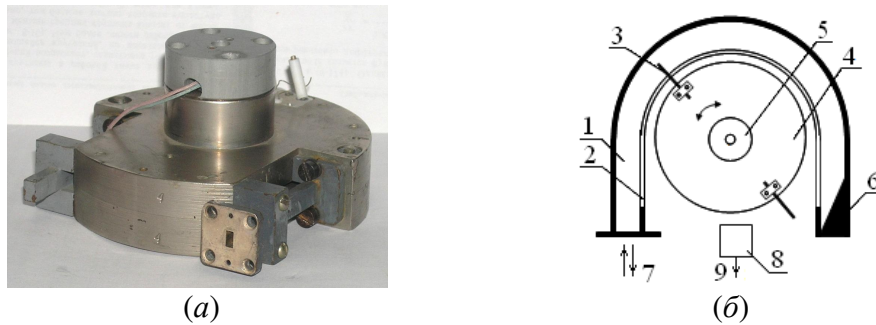


Рис. 5.2. Фотография внешнего вида (а) и эскиз конструкции (б) доплеровского имитатора

Движение отражателей под действием электродвигателя с круговой скоростью V_R вызывает изменение набега фазы $\delta(t, \tau)$ отражённой волны с доплеровской частотой $\Omega_{дв}$, полученной в волноводе (отсюда в обозначении частоты Доплера $\Omega_{дв}$ добавлен индекс «в»). Значение этой частоты отличается от частоты Ω_d доплеровского сигнала, полученного от движущегося объекта с такой же скоростью V_R в свободном пространстве, на множитель d_v : $\Omega_{дв} = \Omega_d d_v$. Последний определяется параметрами материала, заполняющего волновод имитатора ($\epsilon\mu$), и отношением длины волны излучения λ в свободном пространстве к критической длине волны $\lambda_{кр}$ для выбранного типа волновода: $d_v = [\epsilon\mu - (\lambda / \lambda_{кр})^2]^{1/2}$, где значение $\lambda_{кр}$ для волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе равно его удвоенной ширине. Как следует из последнего выражения, в случае применения в имитаторе волновода без заполнения

($\epsilon\mu = 1$) выполняется неравенство: $\Omega_{\text{дв}} < \Omega_{\text{д}}$, а в случае использования волновода, заполненного диэлектриком с соответствующими параметрами ($\epsilon\mu > 1$), можно значительно увеличить частоту имитируемого сигнала Доплера, на что указано также в [122]. Последняя возможность позволяет снять верхнее ограничение по круговой скорости движения отражателей, вызванное механическими перегрузками при её приближении к звуковому барьеру.

Основными достоинствами электромеханических имитаторов являются широкий диапазон линейного изменения набега фазы и равномерность амплитуды отражённой волны. Поэтому они широко используются для настройки, калибровки и экспериментальных исследований гомодинных и автодинных радиолокаторов, а также являются предметом дальнейших усовершенствований.

5.2. Исследование параметров и характеристик обычных автодинов

Целью настоящих исследований является решения обратной задачи по определению внутренних свойств СВЧ и КВЧ генераторов при помощи экспериментально полученных амплитудных (АХА), частотных (ЧХА) и характеристик автодетектирования (ХАД), а также связанных с ними амплитудно-частотных (АЧХ) и автодетекторно-частотных (ХАЧ) характеристик. Для этого указанные характеристики сначала были сняты «по точкам» путём регистрации постоянной составляющей соответствующего автодинного отклика при «квазистатическом» перемещении короткозамыкающего поршня на конце волноводного тракта. Данные характеристики, полученные при различных величинах параметра внешней обратной связи $C_{\text{ос}}$, представлены на рис. 5.3 [30].

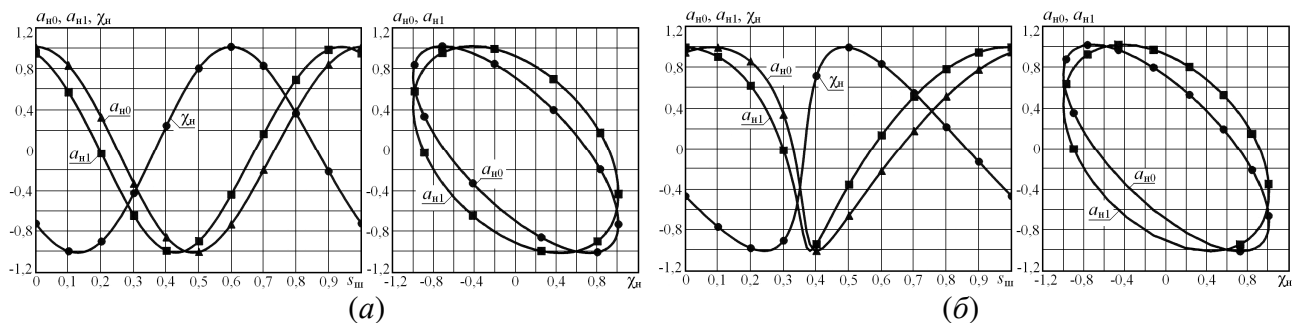


Рис. 5.3. Нормированные характеристики автодинных изменений сигнала автодетектирования $a_{\text{н}0}(l_{\text{н}})$, амплитуды $a_{\text{н}1}(l_{\text{н}})$ и частоты $\chi_{\text{н}}(l_{\text{н}})$ колебаний, характеристики автодетекторно-частотные $a_{\text{н}0}(\chi_{\text{н}})$ и амплитудно-частотные $a_{\text{н}1}(\chi_{\text{н}})$, полученные при $C_{\text{ос}} = 0,08$ (а), $C_{\text{ос}} = 0,8$ (б) и изменении положения отражателя с шагом $l_{\text{н}}$ через $1/10$ половины длины волны в волноводе: $l_{\text{н}} = l / (\lambda_{\text{в}} / 2)$.

Вычисления относительных размеров и параметров эллипсов по приведённым в разделе

2.5 формулам (2.37) – (2.40) дали следующие значения: $\varepsilon_{30} = 0,91$; $\varepsilon_{31} = 0,77$; $a_{30} = 1,31$; $b_{30} = 0,53$; $a_{31} = 1,19$; $b_{31} = 0,76$. С учётом полученных данных были рассчитаны углы фазового смещения: $\theta = 0,85$; $\psi_1 = -0,05$; $\psi_0 = -0,42$ и значения коэффициентов γ , ρ и $\kappa_{\text{чд}}$: $\gamma = 1,15$; $\rho = -0,44$; $\kappa_{\text{чд}} = -0,36$. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными, полученными в работе [29] несколько иным методом.

При снятии «динамических» автодинных характеристик с помощью описанного выше доплеровского имитатора сигнала, осциллографа и других виртуальных приборов, создаваемых в среде LabVIEW, получение необходимых данных эксперимента отличается оперативностью измерений.

На рисунке 4.5 представлены результаты экспериментов по определению внутренних параметров АД в виде осциллограмм (слева) автодинных сигналов по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды (кривые 2) колебаний и сигнала автодетектирования (кривые 3), а также спектрограмм (справа) сигналов по изменению амплитуды колебаний АД [29].

Эксперимент выполнялся при скорости вращения вала двигателя 300 об/мин. Расчётное значение круговой скорости движения отражателя при этом составляло 1,18 м/с. Данному значению скорости (при радиусе полукольца волновода сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ до середины его высоты 0,0376 м) для среды без заполнения ($\varepsilon\mu = 1$) соответствует величина частоты доплеровского смещения около 245 Гц. Направление перемещения отражателей поддерживалось в этом опыте от генератора. Длина волноводного тракта от генератора до середины полукольца имитатора составляла $l = 4,18 \text{ м}$ ($N = 870$).

Диаграммы, представленные на рис. 5.4 (а), получены для случая «слабого» сигнала, когда величина модуля коэффициента отражения $\Gamma = 0,0007$, а на рис. 5.4 (б) – для «сильного» сигнала, когда $\Gamma = 0,007$. При этом величина этого коэффициента Γ вычислялась по формуле: $\Gamma = (10^{-0,1D})^{1/2}$, где $D = 2(D_{\text{ат}} + D_{\text{вт}} + D_{\text{им}})$ – общее затухание излучения от генератора до имитатора и обратно; $D_{\text{ат}}$, $D_{\text{вт}}$, $D_{\text{им}}$ – выраженные в дБ затухания в аттенюаторе, волноводном тракте и имитаторе, соответственно; затухание волны в имитаторе $D_{\text{им}} = 1,5 \text{ дБ}$; в волноводном тракте $D_{\text{вт}} = 2,5 \text{ дБ}$. В случае «слабого» сигнала (см. рис. 5.4 (а)) на аттенюаторе устанавливалась величина затухания $D_{\text{ат}} = 27,5 \text{ дБ}$, а в случае «сильного» (см. рис. 5.4 (б)) – $D_{\text{ат}} = 17,5 \text{ дБ}$.

Значения параметра внешней обратной связи C_{oc} АД в этом опыте вычислялись по формуле: $C_{\text{oc}} = 4\pi\Delta f_m l / cd_v$, где Δf_m – величина автодинной девиации частоты, определяемая,

как её максимальное отклонение от частоты стационарных колебаний, определялась с помощью анализатора спектра АС (см. рис. 5.4). Расчётные значения параметра внешней обратной связи получены: $C_{oc} = 0,08$ в первом случае и $C_{oc} = 0,8$ – во втором, при этом девиация частоты СВЧ колебаний составляла $\Delta f_m = 0,38$ МГц и $\Delta f_m = 3,8$ МГц соответственно.

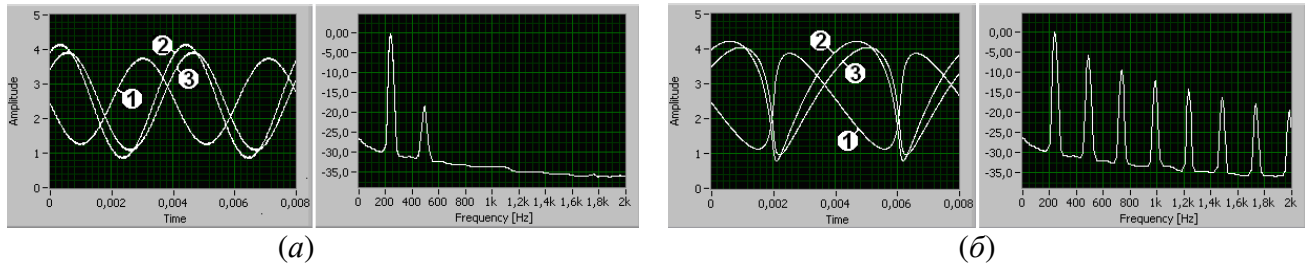


Рис. 5.4. Осциллограммы (слева) автодинных сигналов по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды (кривые 2) колебаний и сигнала автодетектирования (кривые 3), а также спектрограмм (справа) сигналов по изменению амплитуды колебаний АД

Из анализа осциллограмм рис. 5.4 следует, что углы относительного смещения выходных сигналов детектора $a_1(\tau)$ и автодетектирования $a_0(\tau)$ имеют следующие значения: $\psi_1 = -11^\circ$, $\psi_0 = 10^\circ$. При этом углу ψ_1 соответствует значение коэффициента неизодромности $\rho = -0,187$, а углу ψ_0 – коэффициента смещения $\kappa_{чд} = 0,168$. С помощью программы вычислений автодинных сигналов, составленной в среде «MathCAD» для персональных компьютеров, с учётом полученных выше значений ρ и $\kappa_{чд}$ выполнен подбор остальных параметров АД так, чтобы форма полученных осциллограмм автодинных сигналов соответствовала форме теоретических кривых при величине параметра внешней обратной связи $C_{oc} = 0,8$. В результате выполненных вычислений получили значения остальных параметров исследуемого генератора: $Q_{вн} = 55$; $\gamma = 0,92$; $\kappa_{чд} = -0,42$.

Как видно из полученных спектрограмм (см. рис. 5.4), при увеличении затухания аттенюатора всего на 10 дБ и, соответственно, параметра обратной связи, уровень высших гармонических составляющих в спектре автодинного отклика существенно растёт. Так, например, уровень второй гармоники при этом изменяется с -18 дБ до -5 дБ.

В развитие исследований спектральных характеристик автодинных сигналов на рис. 5.5 представлены графики коэффициентов гармоник отклика АД по изменению частоты K_χ и амплитуды K_Γ колебаний, а также параметра внешней обратной связи C_{oc} и уровня первых пяти гармонических составляющих ($n = 1, \dots, 5$) спектров в зависимости от величины модуля коэффициента отражения Γ [29]. Графики этих зависимостей получены при сохранении прежней длины волноводного тракта и изменении аттенюатором затухания $D_{ат}$ в пределах от

26 до 16 дБ.

Из кривых рис. 5.5 видно, что графики этих зависимостей обрываются при величине модуля коэффициента отражения $\Gamma = 0,009$ ($D_{\text{ат}} = 16$ дБ), поскольку дальнейшее его увеличение вызывает скачки сигнала ($C_{\text{ос}} > 1$). Ход полученных экспериментальных зависимостей (см. рис. 5.5) совпадает с аналогичными графиками, полученными расчётным путём (см. рис. 2.6). Измеренное отношение уровня выходного сигнала, при котором начинаются скачки, к уровню собственных шумов автодина составило величину порядка 52. Данный результат при величине потенциала $\Pi_{\text{ш}} = 76$ дБ, числе полувольт $N = 870$ и полученных выше значениях внутренних параметров автодина хорошо стыкуется с результатами расчётов по формуле (3.17): $d_a = 33,7$ дБ.

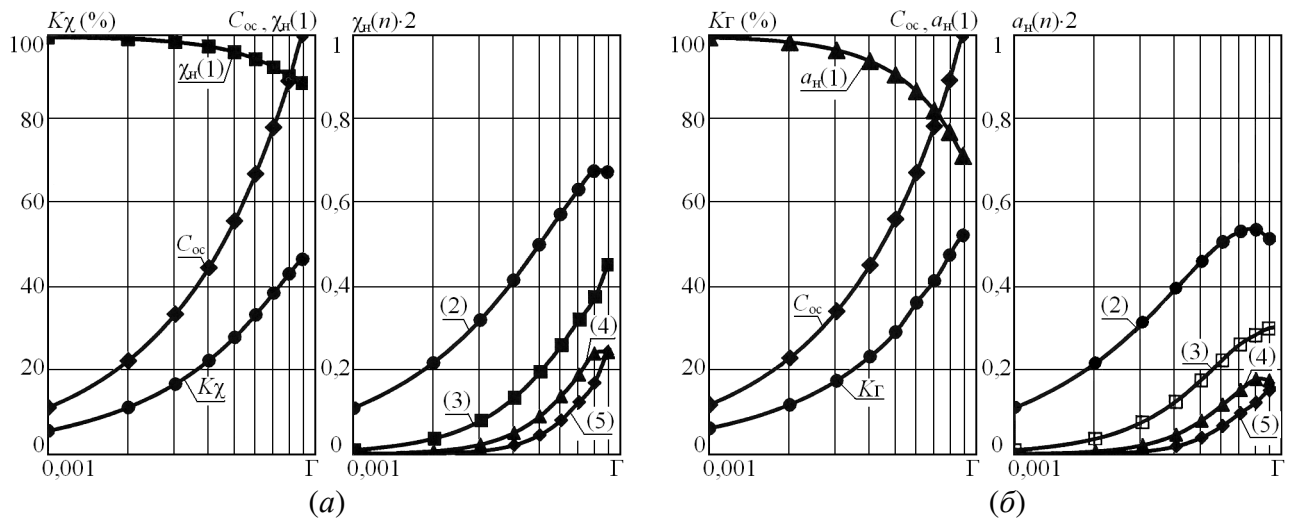


Рис. 5.5. Графики экспериментальных зависимостей коэффициентов гармоник сигналов по изменениям частоты K_χ и амплитуды K_Γ колебаний АД, параметра внешней обратной связи $C_{\text{ос}}$ и уровня первых пяти гармонических составляющих ($n = 1, \dots, 5$) спектров автодинного отклика исследуемого модуля по изменению частоты $\chi_n(n)$ и амплитуды $a_n(n)$ колебаний от расчётной величины модуля коэффициента отражения Γ .

Представляющие большой практический интерес результаты экспериментов по определению свойств автодинных сигналов в зависимости от скорости отражателя, уровня отражённого излучения и направления движения отражающего объекта представлены на рис 5.6 (а) и 5.6 (б) в виде осциллограмм автодинных сигналов по изменению амплитуды колебаний $a_1(\tau)$ (кривые 1) и автодетектирования $a_0(\tau)$ (кривые 2) [29]. Осциллограммы с левой стороны получены для случая движения отражателя от генератора, а с правой – к генератору. В данном опыте по отношению к предыдущему эксперименту при сохранении длины волноводного тракта ($l = 4,18$ м) значительно увеличена скорость вращения вала двигателя имитатора:

$n = 3700$ об/мин. Этой скорости вращения соответствует доплеровская частота сигнала 3,14 кГц. Осциллограммы, приведенные на рис. 5.6 (а) получены при величине коэффициента отражения $\Gamma = 0,0007$ ($D_{\text{ат}} = 27,5$ дБ), а на рис. 5.6 (б) – при $\Gamma = 0,007$ ($D_{\text{ат}} = 17,5$ дБ).

Как видно из сравнения полученных осциллограмм (см. рис. 5.4 и 5.6), особенности автодинных сигналов (характер искажений) сохраняются при значительном изменении скорости движения отражателя. Кроме того, из этих осциллограмм видно, что в случае «сильного» отражённого сигнала, когда величина параметра внешней обратной связи $C_{\text{oc}} \sim 1$, при смене направления движения меняется порядок следования пологих и крутых участков (см. рис. 5.6 (б)). Результаты аналогичного эксперимента для сигнала автодетектирования были впервые опубликованы в статье [8]. В данной статье приведена также схема обработки сигналов, анализирующая крутизну «фронтов» сигнала для определения направления движения объекта. Однако в случае «слабого» сигнала, когда искажения практически отсутствуют (см. рис. 5.6 (а)) описанная в этой работе схема явно неработоспособна.

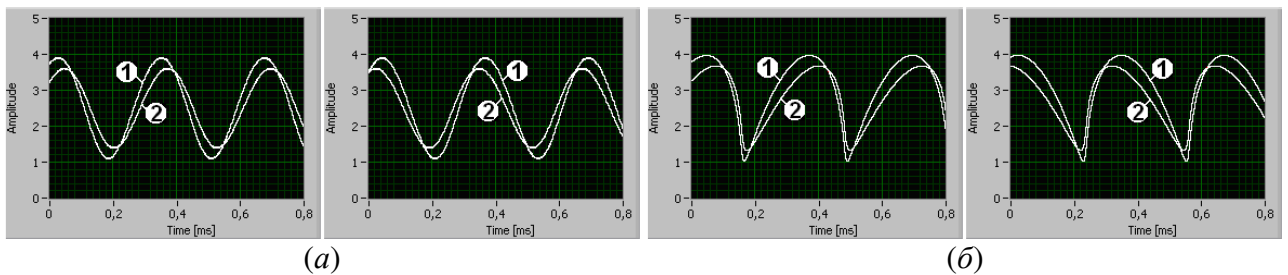


Рис. 5.6. Осциллограммы автодинных сигналов по изменению амплитуды колебаний (след 1) и автодетектирования (след 2), полученные для случая движения отражателя от генератора (а) и к генератору (б).

Из полученных результатов теоретических исследований (см. выражения (2.29) – (2.31)) и представленных здесь осциллограмм (см. рис. 5.4, 5.6) видно, что между сигналами по изменению амплитуды $a_1(\tau)$ колебаний и автодетектирования $a_0(\tau)$ сохраняется относительный фазовый сдвиг $\Delta\psi = \psi_0 - \psi_1$. В рассматриваемом случае он составляет угол $\Delta\psi_0 = 21^\circ$. Знак этой разности фаз $\Delta\psi$, не зависящий от степени искажения сигналов. При смене направления относительного движения отражателя он изменяется на противоположный: $\Delta\psi = -21^\circ$. Регистрация изменений этого знака с помощью фазового компаратора обеспечивает возможность определения направления движения отражающих объектов как при слабых, так и «сильных» сигналах.

5.3. Сравнение характеристик обычных и стабилизированных автодинов

Целью представленных в настоящем разделе результатов исследований является

сравнение основных параметров и характеристик обычного (нестабилизованного) АД и генератора с дополнительным внешним резонатором в одних и тех же условиях эксперимента. Для этого рассмотрим особенности спектра СВЧ колебаний и формы автодинного отклика обычного и стабилизированного АД при изменении расстояния до отражающего объекта, уровня отражённого излучения и направления перемещения объекта, а также определим величину коэффициента стабилизации S_f САД.

Для экспериментов с движущимся объектом были реализованы следующие условия. Длина l_b волноводного тракта ВВ сечением $7,2 \times 3,4$ мм² между генератором и имитатором ДИС (см. рис. 5.1) равнялась $l_b = 12$ м, т.е. время запаздывания отражённого излучения в волноводе, рассчитанное по формуле: $\tau = 2l_b / c \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны волновода, составляло $\tau \approx 96 \cdot 10^{-9}$ с, а число полуволн N , укладывающееся на его длине, $N = 2494$. Переменным аттенуатором Ат в волноводном тракте устанавливалась величина коэффициента затухания Γ , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_{ма} \approx 2\pi \cdot 1,3 \cdot 10^6$.

Для получения указанных условий эксперимента при использовании нестабилизированного модуля величина коэффициента затухания СВЧ излучения в волноводном тракте получена $\Gamma \approx 0,0024$ ($D_{ат} = 17,2$ дБ). При сохранении величины этого затухания аттенуатора были получены спектрограммы выходных СВЧ колебаний для обычного и стабилизированного модулей. Данные спектрограммы представлены на рис. 5.7. Соответствующие этим случаям осциллограммы и спектрограммы автодинного отклика представлены на рисунках 5.8 (а) и 5.8 (б).

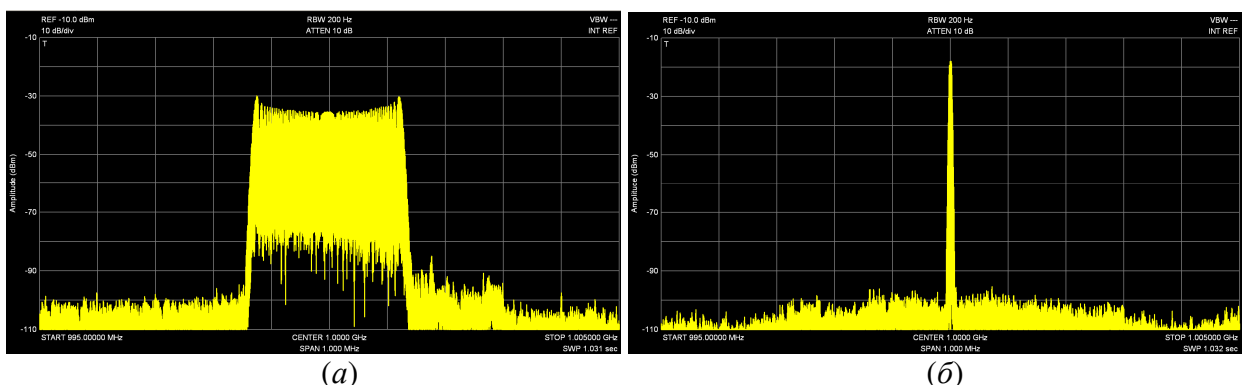


Рис. 5.7. Спектрограммы СВЧ колебаний выходных сигналов обычного (а) и стабилизированного (б) АД, полученные от движущегося отражателя.

Скорость вращения вала двигателя в этих экспериментах поддерживалась постоянной: 2000 оборотов в минуту. Расчётное значение круговой скорости движения отражателя при этом

составляло 7,875 м/с, а значение частоты доплеровского смещения (в волноводе) – около 1,637 кГц. Направление перемещения отражателей поддерживалось от генератора. Ширина спектра $\Delta f_{\text{сн}}$ СВЧ колебаний в первом случае составляла $\Delta f_{\text{сн}} \approx 2,5$ МГц, а во втором – около 40 кГц. Расчетное значение параметра обратной связи во втором случае получено $C_{\text{oc}}^{\text{ст}} \approx 0,014$.

Ширина спектра СВЧ колебаний в первом случае составляла $\Delta f_{\text{сн}} = 2,5$ МГц, а во втором – около 40 кГц, при этом автодинная девиация частоты $\Delta f_{\text{м}}$ (отклонения от средней частоты f_0 спектра) составляла половину указанных величин. Расчётные значения параметра искажений получены в первом случае $C_{\text{oc}} \approx 0,8$ и $C_{\text{oc}}^{\text{ст}} \approx 0,014$ – во втором. Из сравнения указанных величин следует, что коэффициент стабилизации частоты исследуемого САД равен $S_f = C_{\text{oc}} / C_{\text{oc}}^{\text{ст}} \approx 60$. Это означает, что динамический диапазон САД почти на 35 дБ шире, чем у обычного модуля.

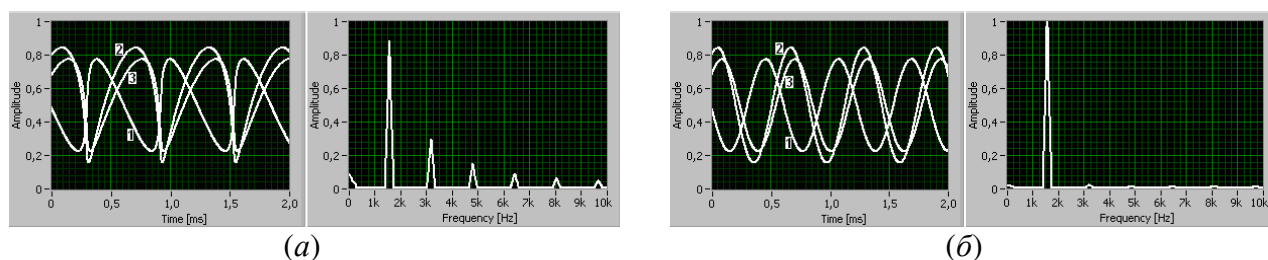


Рис. 5.8. Осциллограммы (слева) АД отклика по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды колебаний (кривые 2), сигнала автодетектирования (кривые 3) и спектрограммы (справа) для отклика по изменению амплитуды колебаний обычного (а) и стабилизированного (б) АД, полученные от движущегося отражателя.

Из анализа осциллограмм рис. 5.8 следует также, что углы относительного смещения выходных сигналов амплитудного детектора и автодетектирования имеют следующие значения: $\psi_1 = -11^\circ$, $\psi_0 = 10^\circ$. Программа вычислений автодинных сигналов, составленная в среде «MathCAD», позволила определить параметры исследуемых АД: коэффициент неизохронности $\gamma \approx 0,9$; внешняя добротность обычного модуля $Q_{\text{вн}} \approx 55$; эквивалентная добротность САД $Q_{\text{экр}} \approx 3500$.

Нелинейные искажения сигналов обычного АД в первом случае составляли величину около 45%, а во втором (обычного модуля) – менее 5%. Из полученных спектрограмм (см. рис. 5.8) и значений коэффициентов гармоник видно, что уровень высших гармонических составляющих у САД значительно ниже, чем у обычного автодина.

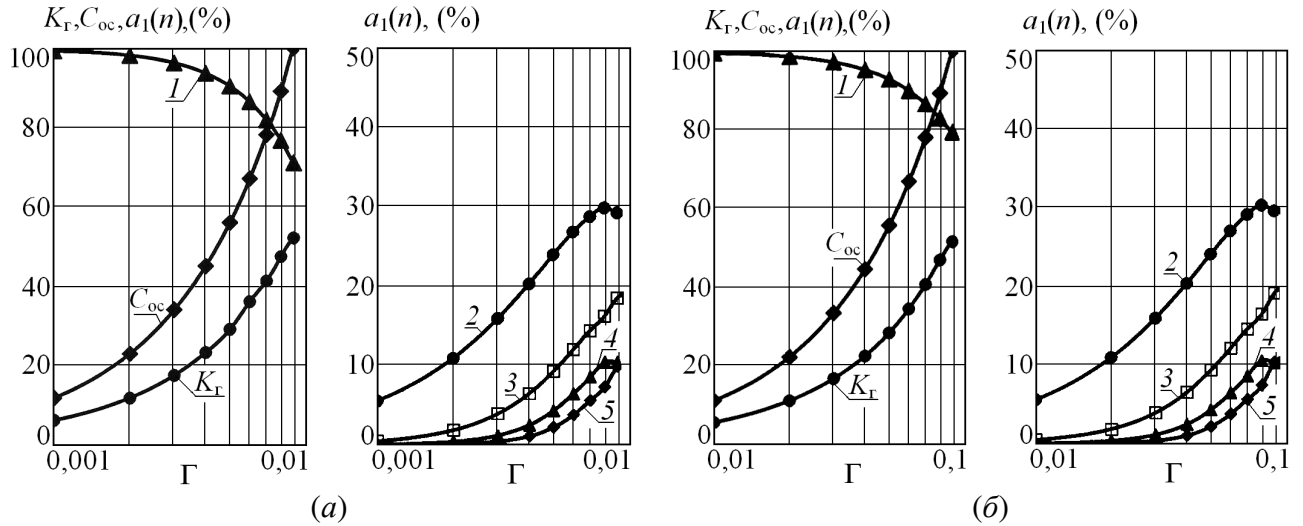


Рис. 5.9. Графики зависимостей коэффициентов гармоник K_{Γ} (кривая 1), величины параметра C_{oc} (кривая 2), и уровня гармонических составляющих $a_1(n)$ ($n = 1 \dots 5$) спектров автодинного отклика (кривые 3...5) АД от величины модуля коэффициента отражения Γ для обычного (а) и стабилизированного (б) АД

Результаты более обстоятельных исследований особенностей автодинных сигналов, при которых снимались зависимости их коэффициента гармоник по изменению амплитуды K_{Γ} колебаний, параметра внешней обратной связи C_{oc} и уровня первой гармоники $a_1(1)$ обычного (а) модуля и модуля со стабилизацией частоты (б) от величины модуля коэффициента отражения Γ , представлены на рис. 5.9 [39]. Стабилизированный модуль в этом эксперименте имел меньшее значение коэффициента связи с внешним резонатором, поэтому его эквивалентная добротность была около 1500. В первом случае графики этих зависимостей получены при длине волноводного тракта $l_1 = 4,18$ м, а во втором – при $l_2 = 11,06$ м. В ходе снятия этих характеристик затухание аттенюатора $D_{ат}$ изменялось в пределах от 26 до 16,5 дБ в первом случае и от 12 до 2,3 дБ – во втором.

Из графиков (см. рис. 5.9) видно, что при малом отражённом сигнале ход полученных экспериментальных зависимостей качественно совпадает с расчётами, выполненными выше в главе 2 и для одноконтурного АД. При этом с увеличением коэффициента отражения Γ уровень первой гармоники $a_1(1)$ падает, а величины коэффициента гармоник K_{Γ} , параметра обратной связи C_{oc} и уровни высших гармонических составляющих $a_1(n)$ растут. Отличия характеристик, представленных на рис. 5.9 (а) и 5.9 (б), состоят только в величинах предельного значения коэффициента отражения, при котором возникают скачки сигнала ($C_{oc} = 1$). В первом случае они начинаются при величине модуля коэффициента отражения $\Gamma_1 = 0,009$ ($D_{ат} = 16,5$ дБ), а во втором – при $\Gamma_2 = 0,09$ ($D_{ат} = 2,3$ дБ). Поскольку скачки сигнала

во всех случаях начинаются при величине параметра внешней обратной связи $C_{oc} = 1$, то отношение $\Gamma_2 l_2 / \Gamma_1 l_1$ даёт выигрыш в величине динамического диапазона d_a АД за счёт стабилизации частоты. Для данного генератора с установленной в нём величиной связи между резонаторами она составила величину $d_a = 28,5$ дБ.

5.4. Влияние расстройки резонатора на автодинные параметры и характеристики

Приведённые выше результаты получены при точной настройке стабилизирующего резонатора, когда его собственная частота совпадает с частотой генерации. В этом случае, как отмечалось выше, амплитудная и частотная чувствительность АД минимальная. На рис. 5.10 представлены графики нормированных зависимостей автодинной чувствительности частоты $L_n(m)$ (кривая 1) и амплитуды $K_n(m)$ (кривая 2) АД от величины частотной расстройки.

Расстройка частоты вносилась изменением положения регулировочного винта на объёмном резонаторе. С помощью этого винта через одну четверть оборота производилось смещение собственной частоты резонатора (в условных единицах m) относительно её номинального значения, где чувствительность была наименьшей и делались соответствующие отсчёты величин. Амплитудная чувствительность $K_n(m)$ контролировалась по изменению уровня АД сигнала на осциллограммах, а частотная чувствительность $L_n(m)$ – по величине расширения спектра СВЧ колебаний при помощи анализатора спектра АС.

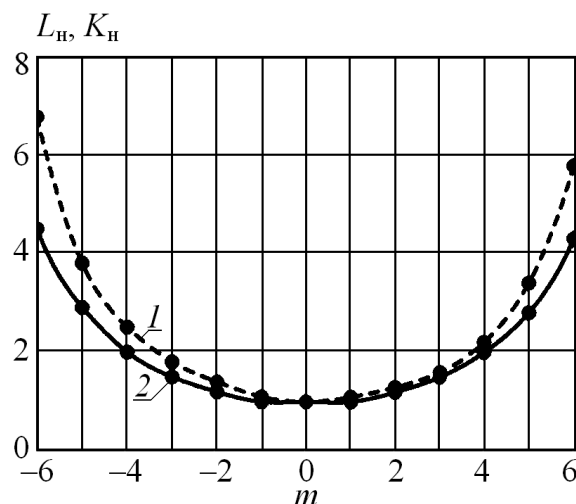


Рис. 5.10. Графики нормированных зависимостей автодинной чувствительности частоты $L_n(m)$ (кривая 1) и амплитуды $K_n(m)$ (кривая 2) от величины частотной расстройки m стабилизирующего резонатора

Из представленных на рис. 5.10 характеристик, качественно совпадающих с расчётными (см. рис. 4.7), видно, что при введении частотной расстройки стабилизирующего резонатора

чувствительность АД может увеличиваться в несколько раз, причём характеристика частотной чувствительности $L_n(m)$ к краям полосы «захвата» резонатором растёт быстрее, чем амплитудная чувствительность $K_n(m)$. При этом необходимо учитывать также, что на краях этой полосы возрастает уровень искажений сигналов, а также уменьшается запас устойчивости режима генератора.

Одновременно со снятием характеристик расстройки (см. рис. 4.11) в характерных точках были получены осциллограммы и спектрограммы автодинного сигнала при различных величинах расстройки m частоты резонатора и неизменном уровне отражённого излучения, которые представлены на рис. 5.11. Комментарии к полученным результатам состоят в следующем.

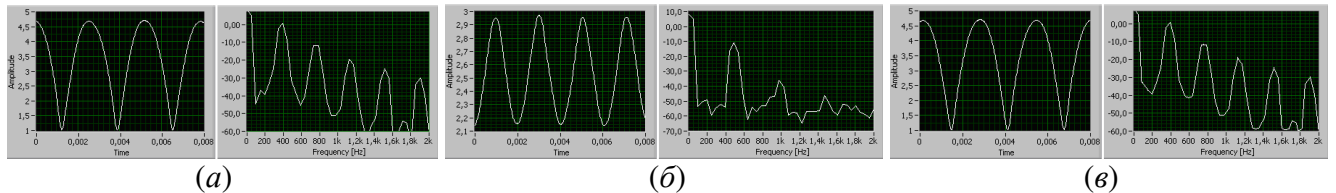


Рис. 5.11. Осциллограммы и спектрограммы АД сигналов, полученные от движущегося отражателя при различных величинах расстройки m частоты резонатора и неизменном уровне отражённого излучения: $m = -6$ (а); $m = 0$ (б); $m = 6$ (в)

В исходном состоянии АД при точной настройке резонатора ($n = 0$) девиация частоты составляла величину около 1 МГц, что соответствует параметру внешней обратной связи $C_{oc} = 0,13$. При этом сигнал по форме весьма близок к синусоидальному, а уровень второй гармоники ниже основной составляющей на 25 дБ (см. рис. 5.11 (б)). С увеличением расстройки резонатора его стабилизирующее действие ослабевает и при этом увеличивается автодинная девиация частоты (см. кривую 1 на рис. 5.10). Этот рост за счёт преобразования изменений частоты в изменения амплитуды колебаний вызывает увеличение амплитуды автодинного отклика, а также параметра внешней обратной связи C_{oc} . Поэтому сигналы, полученные при $m = \pm 6$, искажены ($C_{oc} \sim 0,8$), причём из-за наличия разного по знаку фазового смещения эти сигналы имеют незначительный наклон в противоположные стороны друг относительно друга, а уровень второй гармоники поднимается до -10 дБ (см. рис. 5.11 (а) и 5.11 (в)).

5.5. Особенности сигналов стабилизированных автодинов с учётом нелинейности по амплитуде

На рис. 5.12 (а) представлена осциллограмма и спектрограмма выходного сигнала по изменению амплитуды колебаний САД при установке attenuatorом величины $\Gamma \approx 0,01$. Общая

протяжённость волноводной вставки ВВ от АД до имитатора ДИС составляла 0,35 м. Для случая увеличенного до $\Gamma \approx 0,5$ коэффициента отражения, при котором автодинная девиация частоты составила 2,5 МГц, и при прежней длине ВВ аналогичные осциллограммы и спектрограммы сигналов представлены на рис. 5.12 (б), а при увеличенной до 6 м длине тракта и сохранении величины Γ – на рис. 5.12 (в). Расчётное значение параметра внешней обратной связи C_{oc} во втором опыте составила величину порядка $C_{oc} \approx 0,02$, а в третьем – $C_{oc} \approx 0,4$.

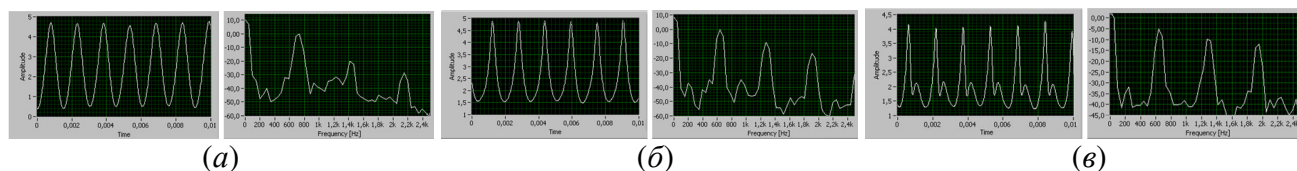


Рис. 5.12. Осциллограммы выходных сигналов САД, полученные от движущегося отражателя при слабом (а) и большом (б), (в) уровне отражённого излучения

Из полученных диаграмм рис. 5.12 (а) и 5.12 (б) видно, что, несмотря на малую величину параметра обратной связи C_{oc} , форма выходного сигнала имеет заметные искажения, при которых уровень второй гармоники с -20 дБ возрос на 10 дБ. В третьем опыте увеличение параметра обратной связи C_{oc} за счёт удлинения волновода вызвало дополнительные искажения сигнала (см. рис. 5.12 (в)), при которых вторая гармоника поднялась ещё на 5 дБ. Данные искажения, как показано выше (см. рис. 4.3), вызваны нелинейностью резистивной проводимости колебательной системы.

5.6. Шумовые характеристики автономных генераторов

Для обычного нестабилизированного модуля “Тигель-08М” и этого же модуля с дополнительным внешним резонатором при его точной настройке на частоту генерации на рис. 5.13 (а) и 5.13 (б), соответственно, представлены спектрограммы СВЧ колебаний, преобразованных на частоту около 1 ГГц. Из данных спектрограмм хорошо видно, что уровень шумов вблизи несущей у стабилизированного модуля на 20...40 дБ ниже, чем у обычного модуля. Однако данной информации недостаточно для определения потенциальных возможностей используемого генератора в качестве АД. Более полные данные о шумовых параметрах АГ представлены в таблице 5.1.

В этой таблице представлены результаты измерений в полосе частот от 0,5 кГц до 1,5 кГц эффективных значений уровня частотных $\Delta f_{эфф}$ и амплитудных $\Delta A_{эфф}$ шумов и шумов тока $\Delta I_{эфф}$ АЭ обычного и стабилизированного модуля, полученных в режиме работы модулей на согласованную нагрузку (при закрытом аттенюаторе). Кроме того, в таблице представлены

данные измерений предельного энергетического потенциала $\Pi_{\text{пр}}$ по изменению амплитуды колебаний ($\Pi_{\text{пр}} = \Pi_{\text{пр}}^{(a)}$) и сигнала автодетектирования ($\Pi_{\text{пр}} = \Pi_{\text{пр}}^{(i)}$). При этом величина предельного энергетического потенциала $\Pi_{\text{пр}}$, выраженного в децибелах, определялась в указанной полосе частот по величине общего затухания D СВЧ излучения в волноводном тракте при его распространении от генератора до имитатора ДИС и обратно при отношении сигнал/шум = 2: $\Pi_{\text{пр}} = D$.

Из данных таблицы 5.1 видно, что стабилизация частоты внешним высокочастотным резонатором значительно уменьшает уровень частотных $\Delta f_{\text{эфф}}$ шумов генератора. При этом уровни шумов амплитуды $\Delta A_{\text{эфф}}$ колебаний генератора и тока смещения $\Delta I_{\text{эфф}}$ АЭ уменьшаются незначительно. Кроме того, из полученных данных видно, что регистрация автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний обеспечивает более высокое значение энергетического потенциала, чем в цепи смещения, причём, как в случае обычного, так и стабилизированного генератора. Данный выигрыш в рассматриваемом случае составляет величину порядка 3...6 дБ и существенно зависит, как отмечено в [111], от шумовых параметров блока регистрации БР.

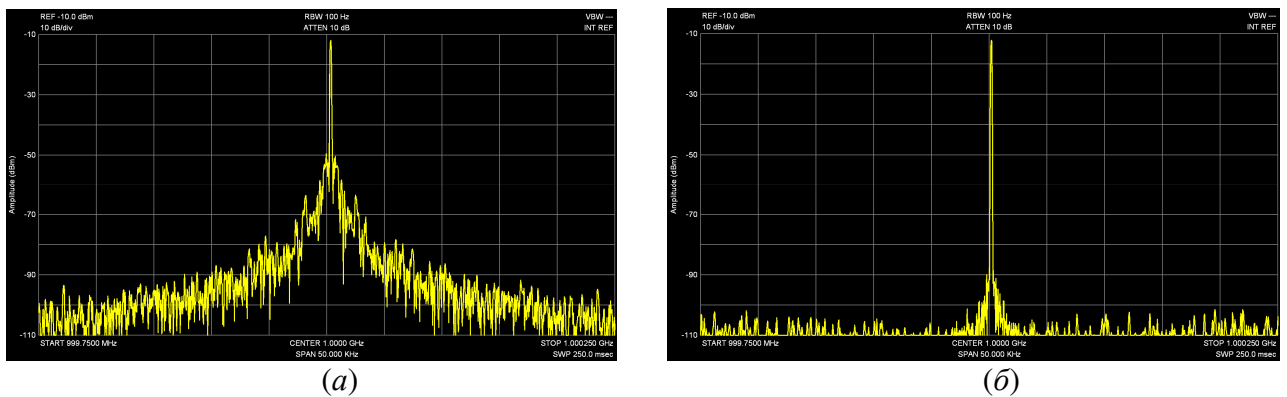


Рис. 5.13. Спектрограммы СВЧ колебаний выходных сигналов обычного (а) и стабилизированного (б) модуля «Тигель-08М».

Таблица 5.1. Экспериментальные значения шумовых параметров генераторов

Тип модуля	$\Delta A_{\text{эфф}}$ (мкВ)	$\Delta I_{\text{эфф}}$ (мкА)	$\Delta f_{\text{эфф}}$ (Гц)	$\Pi_{\text{пр}}^{(a)}$ (дБ)	$\Pi_{\text{пр}}^{(i)}$ (дБ)
Нестабилизированный	81,3	7,9	2370	91	88
Стабилизированный	60,0	7,4	45	94	88

Для исследования влияния расстройки резонатора относительно частоты генерации

стабилизированного модуля на его шумовые параметры были сняты зависимости уровня частотных $\Delta f_{\text{эфф}}(m)$ и амплитудных $\Delta A_{\text{эфф}}(m)$ шумов и шумов тока $\Delta I_{\text{эфф}}(m)$ АЭ от положения регулировочного винта на объемном резонаторе. С помощью этого винта через одну четверть оборота производилось смещение собственной частоты резонатора (в условных единицах m) относительно её положения при точной настройке ($m=0$) и делались соответствующие отсчёты величин. Результаты этих измерений в виде нормированных графиков уровней амплитудного $N_a(m)$, токового $N_i(m)$ (кривая 1) и частотного $N_\chi(m)$ (кривая 2) шума представлены на рис. 5.14, где $N_a(m) = \Delta A_{\text{эфф}}(m) / \Delta A_{\text{эфф}}(m=0)$, $N_i(m) = \Delta I_{\text{эфф}}(m) / \Delta I_{\text{эфф}}(m=0)$, $N_\chi(m) = \Delta f_{\text{эфф}}(m) / \Delta f_{\text{эфф}}(m=0)$.

Из сравнения представленных на рис. 5.14 опытных данных с соответствующими данными расчётов характеристик величины частотных флуктуаций $\Delta f_{\text{эфф}}$, уровня амплитудного шума $a_{\text{шэфф}}$ и шумового тока $i_{\text{шэфф}}$ питания АЭ, приведённых на рис. 4.9, следует качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов проведенных исследований.

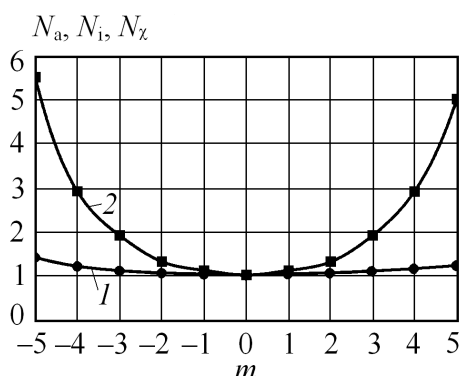


Рис. 5.14. Графики нормированных зависимостей уровня амплитудного $N_a(m)$, токового $N_i(m)$ (кривая 1) и частотного $N_\chi(m)$ (кривая 2) шума АД от величины частотной расстройки m стабилизирующего резонатора.

5.7. Шумовые характеристики автодинов

Для исследований автодинных и шумовых характеристик модулей в случае взаимодействия генератора с отражённым излучением от движущегося объекта были реализованы условия, описанные выше (см. главу 4). Длина l_b волноводного тракта ВВ при этом равнялась $l_b = 12$ м, а величина автодинной девиации частоты $\Delta\omega_{\text{ма}}$ составляла $\Delta\omega_{\text{ма}} \approx 2\pi \cdot 1,32 \cdot 10^6$. На рис. 5.15 представлены осциллограммы, на которых верхний след показывает форму сигнала по изменению частоты (а), амплитуды (б) и автодетектирования (в),

а нижний след – дорожку высокочастотного шума соответствующего канала. Шумовые дорожки получены «очисткой» от сигналов фильтрами верхних частот в составе БАО и программной реализацией в LabVIEW смеси сигнала и шума на соответствующем выходе автодинного модуля. Полоса регистрируемых шумов по уровню -3 дБ при этом составляла от 10 до 50 кГц.

В первом ряду скриншотов с монитора ПК (см. рис. 5.15.) представлены осциллограммы сигналов для случая нестабилизированного модуля при величине затухания аттенюатора $D_{ат} = 17,2$ дБ, во втором – при прежнем значении затухания аттенюатора для стабилизированного модуля, в третьем – результаты эксперимента снова со стабилизированным модулем, но при величине затухания $D_{ат} = 0$ дБ (аттенюатор полностью выведен). Имитатор обеспечивал частоту доплеровского сигнала около 2 кГц, при этом направление перемещения отражателя поддерживалось от генератора.

Из полученных осциллограмм видно, что при величине параметра обратной связи соизмеримой с единицей автодинным сигналам как обычных, так и стабилизированных АД свойственны искажения, а также нестационарность уровня шума при перемещении отражающего объекта. Данные осциллограммы качественно подтверждают результаты расчётом автодинных и шумовых характеристик, представленных на рис. 3.1.

Осциллограммы первого и третьего рядов на рис. 5.15 получены при одинаковом значении параметра внешней обратной связи автодинов, но при различных величинах затухания аттенюатора A_t : $D_{ат} = 17,2$ дБ – для обычного модуля и $D_{ат} = 0$ дБ – для стабилизированного генератора. Отсюда следует, что выигрыш в динамическом диапазоне САД, определяемый как удвоенная разность показаний аттенюатора, составил величину порядка 34,4 дБ, что согласуется с результатами выполненных выше расчётов для этого модуля.

Для количественной оценки полученных результатов были выполнены измерения эффективных значений уровней шума в моменты времени «пика» шума и его «плато» (точки O_1 и O_2 согласно обозначениям рис. 3.2). В таблице 5.2 представлены результаты указанных измерений, отнесённых к уровню соответствующего шума модуля в автономном режиме, когда аттенюатор закрыт. В нижней строчке этой таблицы приведены данные расчётов этих величин, представленные на графиках рис. 3.2.

Из сравнения полученных экспериментальных результатов с данными расчётов видно их хорошее совпадение, особенно для измерений, выполненных на «плато». Некоторые расхождения в сторону занижения результатов для данных, полученных в пике, объясняются погрешностью измерения уровня кратковременных флуктуаций, а для значений коэффициентов

$q_i(O_1)$ и $q_i(O_2)$ – наличием шумов источника смещения, которые в разработанной выше модели автодина не учтены.

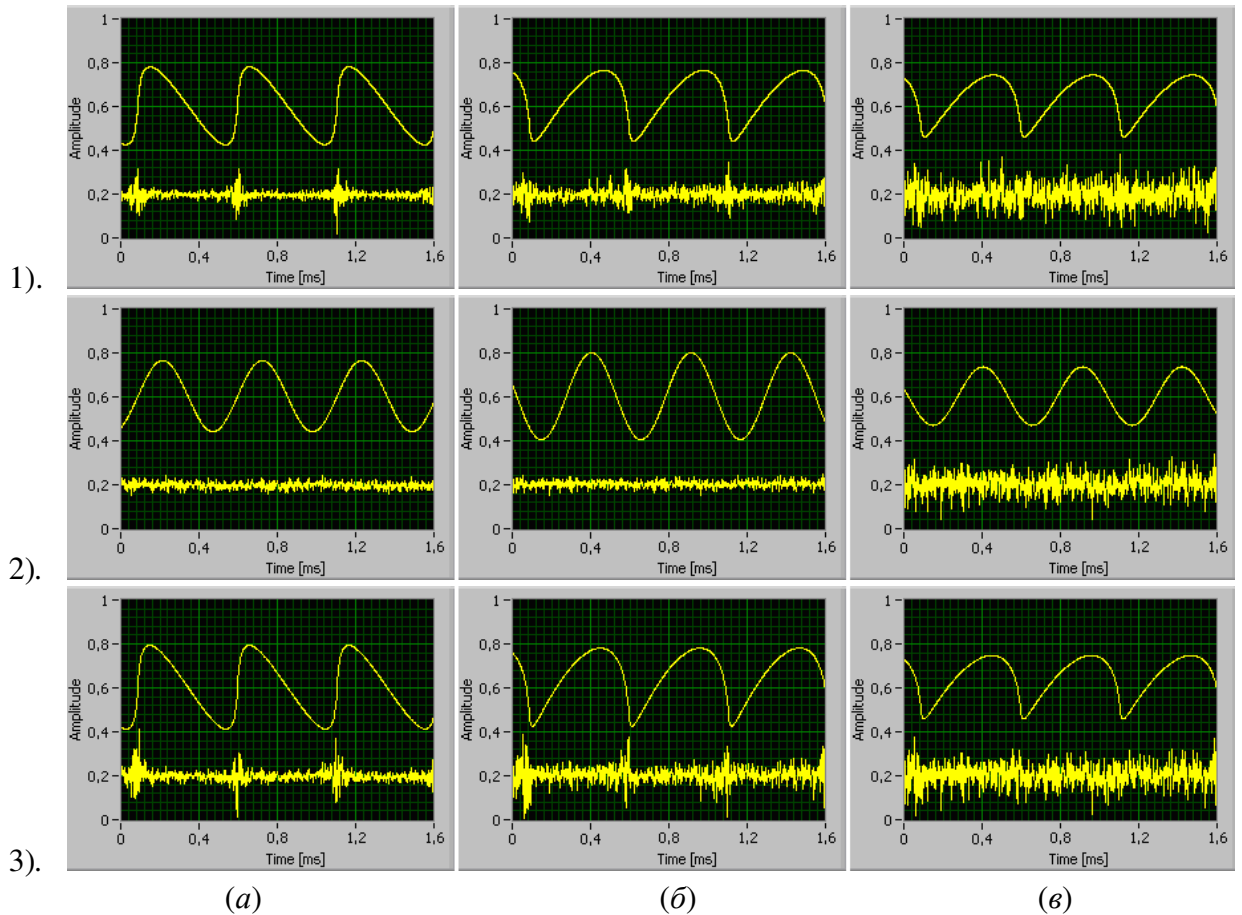


Рис. 5.15. Осциллограммы автодинных сигналов нестабилизированного (ряд 1) и стабилизированного (ряды 2 и 3) АД по изменению частоты (а), амплитуды (б) и автодетектирования (в) (верхний след) и соответствующие им шумовые дорожки (нижний след)

Таблица 5.2. Измеренные значения уровней флуктуаций в «пике» и на «плато» шумовых характеристик АД

Уровень шума →	в «пике» (точке O_1)			на «плато» (в точке O_2)		
	$q_x(O_1)$	$q_a(O_1)$	$q_i(O_1)$	$q_x(O_2)$	$q_a(O_2)$	$q_i(O_2)$
Нестабилизованный	2,7	2,0	1,2	0,55	0,64	0,96
Стабилизированный	4,8	3,0	1,5	0,53	0,76	0,76
Данные расчета	5,0	3,3	2,2	0,55	0,74	0,84

Необходимо отметить также, что с увеличением затухания аттенюатора на 20 дБ, при

котором параметр обратной связи уменьшался на порядок, выходные сигналы АД становились практически гармоническими, а шумовые дорожки – без выбросов. В случае синхронизации колебаний АД сигналом от внешнего измерительного генератора ИГ (см. рис. 5.1) периодические пульсации уровня шума на выходе АД и искажения сигналов также отсутствуют. Данные результаты указывают на то, что обсуждаемое явление периодической нестационарности шумов автодинных генераторов обусловлено одновременным присутствием частотных флуктуаций и автодинных изменений частоты генерации.

Анализ литературы по автодинной тематике и смежным вопросам теории и техники СВЧ и КВЧ генераторов показал, что нестационарность частотных и амплитудных шумов СВЧ генераторов была экспериментально показана также в работах [127, 128], посвящённых изучению нагрузочных характеристик обычных автодинов и генераторов на лавинно-пролетных диодах. Кроме того, периодическая зависимость уровня шума СВЧ генератора от времени запаздывания возвращаемого в рабочий резонатор генератора собственного СВЧ излучения исследована в работах [129 – 131], где для подавления фазовых шумов использовалась автоколебательная система с дополнительной обратной связью. Аналогичные экспериментальные данные исследований фазовых шумов лазерного автодинного интерферометра, качественно подтвердившие наши результаты, получены в работе [132].

Таким образом, результаты выполненных в настоящей работе исследований и данные других работ подтвердили адекватность разработанной математической модели для анализа шумовых характеристик стабилизированных автодинных генераторов, а также общность описанных явлений в автогенераторах различного типа.

5.8. Выводы

Выполненные экспериментальные исследования, подтвердившие основные выводы теоретических исследований, показали, что применение САД обеспечивает не только значительное улучшение спектрального состава сигнала АД и расширение динамического диапазона СБРЛ, но и повышает также такие важные эксплуатационно-технические показатели, как стабильность режима и частоты генерации в широком диапазоне внешних воздействий. Особенно привлекательно использование САД при сильной связи между резонаторами. При таком условии реализуются достоинства одновременно одноконтурного АД, имеющего линейные частотные зависимости составляющих проводимости резонансной системы, и САД, обеспечивающего высокую фиксирующую способность частоты. Однако наблюдающееся при этом снижение энергетического потенциала АД СБРЛ требует поиска компромисса в величине оптимальной связи с нагрузкой и между резонаторами.

Результаты работы представляются полезными также при разработке экспериментальных стендов для изучения автодинных генераторов, сравнении полученных данных с данными аналогичных исследований различных типов АГ, при выборе и оптимизации параметров СВЧ генераторов, предназначенных для автодинных СБРЛ и других целей.

Глава 6. Применение результатов диссертации

В настоящей главе приведено описание примеров, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований и при этом также получены новые научные результаты. В разделе 6.1 рассмотрены методы определения основных параметров и характеристик автодинных СВЧ и КВЧ генераторов. В разделе 6.2 выполнен анализ эффективности применения стабилизированных по частоте генераторов в автодинных радиолокаторах, а в разделе 6.3 – дано описание конструкции, принципа действия и результатов натурных испытаний опытного образца радиолокатора для сортировочной горки. В разделе 6.4 рассмотрены особенности формирования и обработки сигналов автодинного генератора при использовании его как датчика вибраций. В разделе 6.5 представлены результаты исследований автодинного режима работы СВЧ модуля серийного радиозонда МРЗ-3МК, а в разделе 6.6 подведены итоги настоящей главы.

Основные результаты данных исследований опубликованы в журнальных статьях [29 – 32, 40], изложены в материалах научно-технических конференций [28, 35 – 37, 41, 46 – 55] и представлены в отчётах о НИР [33] и НИОКР «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета».

6.1. Определение внутренних параметров и характеристик СВЧ и КВЧ генераторов

При изучении различных свойств и разработке СВЧ и КВЧ генераторов, в том числе автодинов, выполненных как в волноводном, так и в гибридно-интегральном исполнениях, большое значение имеют результаты анализа используемых в них нелинейных АЭ. В литературе предложено и опробовано большое число методов измерения угла запаздывания и внешней добротности генераторов, электронной проводимости и параметров комплексной восприимчивости АЭ при использовании внешней синхронизации генераторов и явления затягивания [90, 91, 133]. Известны также методы, в которых данные параметры находятся по автодинному отклику [134, 135].

Выше, в разделах 2.3 – 2.5 на основе разработанной модели КВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения, и выполненного анализа их автодинных параметров и характеристик известный метод получил своё дальнейшее развитие. Он основан на однозначной зависимости основных параметров (коэффициентов автодинного усиления, девиации частоты и коэффициента автодетектирования) и автодинных

характеристик от внутренних параметров этих генераторов. Эта зависимость позволяет по результатам полученных экспериментально автодинных характеристик при двух значениях параметра обратной связи C_{oc} решать обратную задачу по определению дифференциальных параметров АЭ.

В отличие от известных ранее методов расчёта параметров АЭ разработанный в настоящей диссертационной работе метод основан на определении обобщённых параметров генератора, таких как коэффициентов неизохронности γ , неизодромности ρ и частотного детектирования $\kappa_{чд}$. Учёт этих коэффициентов может быть выражен также через соответствующие углы фазового смещения компонентов автодинного отклика: θ , ψ_1 и ψ_0 (см. выражения (2.29) – (2.31), (2.32)).

Другой метод определения указанных параметров, основанный на использовании результатов обобщения теории работы СВЧ генераторов на твердотельных АЭ, изложенной в монографии [112], позволяет, минуя снятие экспериментальных характеристик, рассчитать искомые параметры АЭ по их аппроксимационным характеристикам, а также рассмотреть зависимость этих параметров от частоты генерации. Дело в том, что выпускаемые промышленностью диоды Ганна (ДГ) и лавинно-пролётные диоды, как правило, рассчитаны для работы в определённом диапазоне частот [136], причём пролётная частота их обычно находится в середине данного диапазона. В связи с этим представляет научный и практический интерес выяснить влияние смещения частоты генерации автодина относительно пролётной частоты ДГ на выходные сигналы автодинного генератора. Рассмотрим данный метод на примере генератора, выполненного на диоде Ганна.

Исходными данными для расчёта дифференциальных параметров АЭ, необходимых для последующего определения эквивалентных параметров и автодинных характеристик генераторов (см. разделы 2.3 и 2.4) являются характеристики зависимости резистивной G_3 и реактивной B_3 проводимостей АЭ от частоты. Результаты вычислений частотных зависимостей этих проводимостей для ДГ 3-см диапазона длин волн представлены на рис. 6.1 кривыми 1 и 2 соответственно. Для вычислений по формулам монографии [112] использовались следующие исходные данные и условия: средняя частота рабочего диапазона $F_{раб} = 10^{10}$ Гц; полупроводниковый материал GaAs, для которого скорость насыщения 10^7 см/с, пороговая напряженность эффекта Ганна 3,3 кВ/см, подвижность электронов в слабом поле $7500 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, степень легирования n_0 рассчитана из соотношения $n_0 l = 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, где l – расчетная длина кристалла; относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 12,5$; проводимость кристалла в слабом поле $G_0 = 1,0 \text{ Ом}^{-1}$; непрерывный режим работы АЭ; соотношение $U_m / U_0 = 0,6$, где U_0

– постоянное смещение на АЭ, U_m – амплитуда первой гармоники.

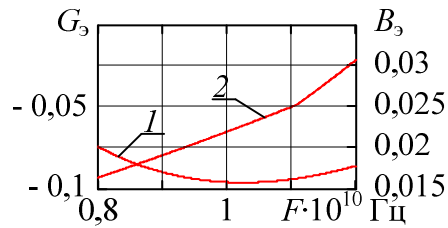


Рис. 6.1. Частотные зависимости активной (кривая 1) и реактивной (кривая 2) составляющих электронной проводимости ДГ

На основе полученных характеристик далее рассчитаны частотные характеристики дифференциальных параметров генератора: α_{11} – приведенной крутизны инкремента генератора; ε_{11} – параметра, определяющего неизодромность генератора; β_{11} – параметра, определяющего неизохронность генератора. Параметр стабилизации частоты генератора принимается равным величине нагруженной добротности Q_n колебательной системы. На рис. 6.2 представлены результаты вычислений данных параметров в виде графиков: $\alpha_{11}(F)$ (а), $\varepsilon_{11}(F)$ (б) и $\beta_{11}(F)$ (в).

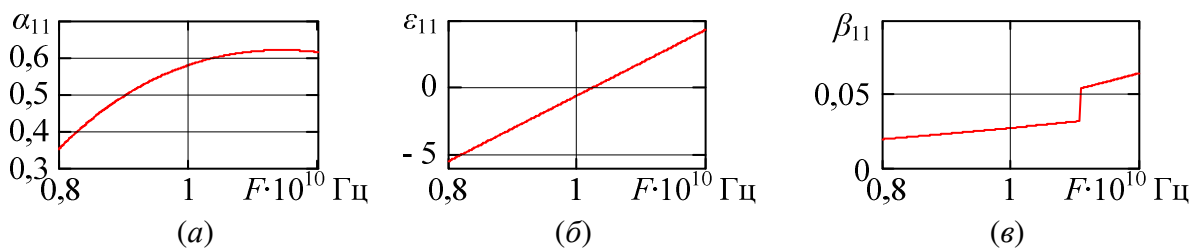


Рис. 6.2. Частотные характеристики дифференциальных параметров: α_{11} – (а); ε_{11} – (б); β_{11} – (в)

Необходимо отметить, что применимость аппроксимационных характеристик диодов Ганна, предложенных в работе [112], для миллиметрового диапазона требует дополнительной коррекции и экспериментальной проверки. Наличие ступени на графике параметра β_{11} на средней частоте зоны отрицательной проводимости обусловлено кусочным заданием аппроксимационной функции реактивной проводимости $B_3(A, \omega)$.

Графики частотных зависимостей коэффициентов неизодромности $\rho = \varepsilon_{11} / Q_n$ и неизохронности $\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$ представлены на рис. 6.3 (а) кривыми 1 и 2 соответственно, углов фазового смещения ψ (кривая 1) и θ (кривая 2) автодинных характеристик АХА и ЧХА – на рис. 6.3. (б) и величины параметра внешней обратной связи C_{oc} , рассчитанной при значениях $\Gamma = 0,001$ и $N = 8000$, – на рис. 6.3. (в). На основе полученных выше результатов выполнены расчёты частотных зависимостей коэффициентов автодинного усиления K_a и девиации частоты

L_a (см. рис. 6.4 (а)), а также АХА (б) и ЧХА (в) для случаев, соответствующих различным значениям параметра обратной связи C_{oc} : $C_{oc} = 0,1$ (кривая 1); $C_{oc} = 0,4$ (кривая 2); $C_{oc} = 0,8$ (кривая 3).

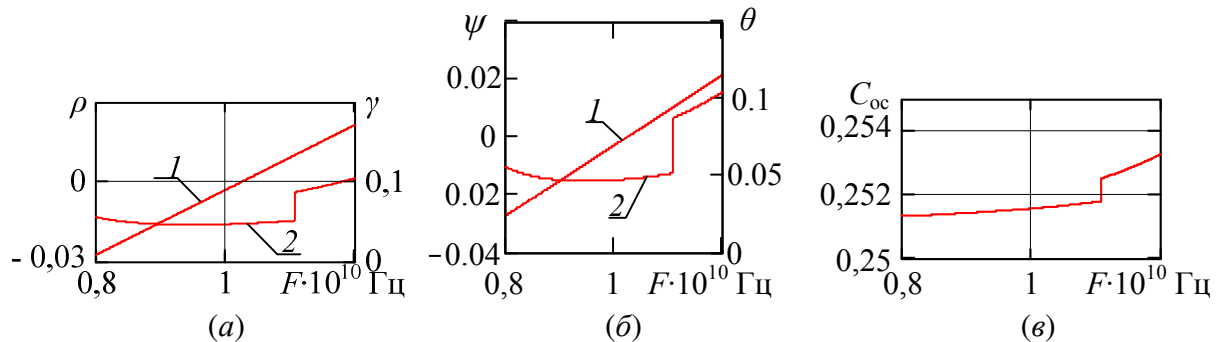


Рис. 6.3. Частотные зависимости коэффициентов: неиздромности ρ – кривая 1 и неизохронности γ – кривая 2 (а); углов фазовых смещений ψ – кривая 1 и θ – кривая 2 (б); величины параметра внешней обратной связи C_{oc}

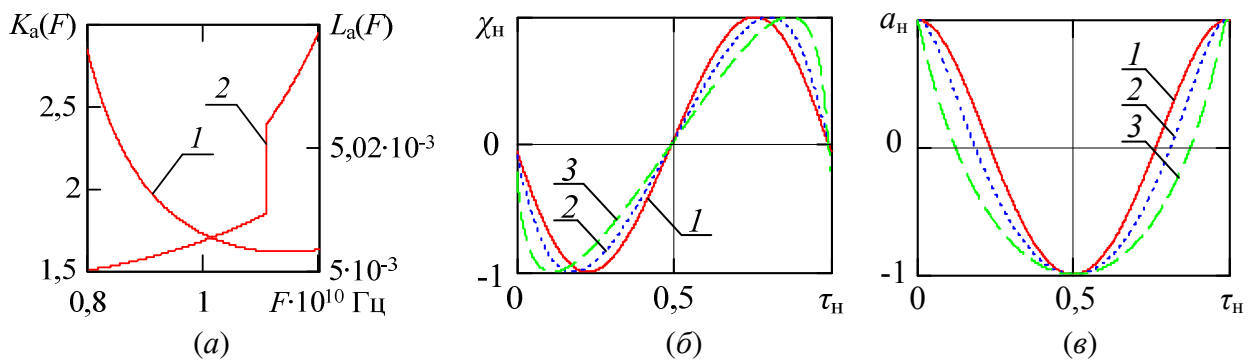


Рис. 6.4. Частотные зависимости коэффициентов: K_a – кривая 1 и L_a – кривая 2; АХА (б) и ЧХА (в)

Из графиков рис. 6.4 (а) видно, что в пределах рабочего диапазона ДГ коэффициент автодинного усиления с увеличением частоты генерации уменьшается почти в 2 раза, при этом величина автодинной девиации частоты изменяется незначительно.

Отстройка частоты генерации от центральной частоты рабочего диапазона, как видно из графиков рис. 6.4 (б), (в), влияет на форму нормированных автодинных характеристик через изменения величины параметра C_{oc} , а также вызывает некоторое относительное смещение данных характеристик по оси нормированного времени, что обусловлено частотной зависимостью углов фазовых смещений. Однако необходимо отметить, что данные смещения автодинных характеристик настолько незначительны, что ими в инженерных расчётах сигналов автодина можно пренебречь.

6.2. Эффективность применения стабилизированных по частоте автодинов

Ранее в основе алгоритмов многих методов обработки сигналов СБРЛ сантиметрового диапазона использовался принцип частотно-фазовых измерений их параметров, при котором производятся временные отсчёты в моменты перехода сигналами нулевого уровня, что обеспечивает наименьшую амплитудную зависимость результатов измерений. Искажения автодинных сигналов в этом диапазоне были незначительными, и их влияние на результаты обработки сигналов обычно не учитывалось (см, например, [137]).

Однако с появлением твердотельных генераторных приборов КВЧ диапазона были обнаружены искажения сигналов. Данные искажения сигналов, регистрируемых по изменению амплитуды или смещения на АЭ, вызывают смещение положения точек перехода через ноль, как показано на рис. 6.5 (а) и (б) (см. кривые 1). Эти смещения, в свою очередь, являются зависимыми от величины параметра C_{oc} внешней обратной связи, то есть и от уровня отражённого излучения. Кроме того, изменения уровня отражённого излучения вызывают изменения постоянной составляющей выходного сигнала. Хотя эта составляющая с выхода автодина непосредственно в устройство обработки (через разделительный конденсатор) не проходит, однако быстрые флуктуации уровня сигнала могут вызвать дополнительные смещения положения переходов сигнала через нулевой уровень и, соответственно, флуктуации фронтов выходного сигнала порогового устройства (см. кривую 1 на рис. 6.5 (в)).

Стабилизированные автодины благодаря меньшей девиации частоты, как показано в настоящей работе, обеспечивают значительно лучшее качество сигналов и отсутствие зависимости переходов через «ноль» от уровня отражённого излучения (см. кривые 2 на рис. 6.5). Однако при высокой стабильности частоты у автодинов утрачивается возможность определения направления движения известным [8] методом анализа «наклона волн», поскольку искажения сигналов отсутствуют.

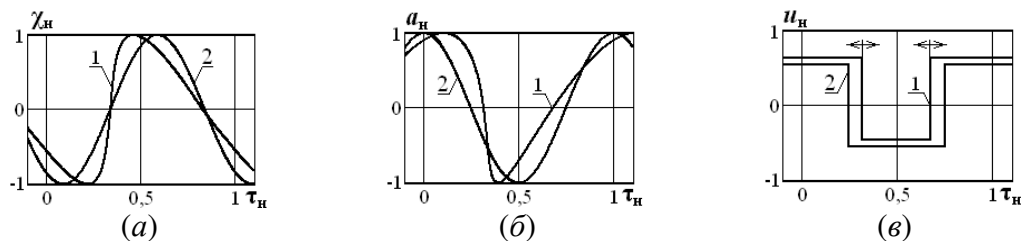


Рис. 6.5. Временные диаграммы ЧХА (а), АХА (б) и выходного сигнала порогового устройства (в), полученные для случаев $C_{oc} = 0,8$ (кривая 1) и $C_{oc} \ll 1$ (кривая 2)

Указанный «недостаток» стабилизированных генераторов легко устраним, если использовать автодин, у которого предусмотрена одновременная регистрация любой пары сигналов по изменению частоты, амплитуды или автодетектирования. При смене направления движения, как показали результаты экспериментов (см. раздел 5.2), у этих сигналов происходит

изменение разности фаз на угол $\pm\Delta\psi$. С помощью данных сигналов определение знака вектора скорости возможно довольно просто, например, с помощью фазового детектора. Следует отметить, что данный метод обеспечивает более надёжное определение знака радиальной скорости, особенно в условиях распределённого отражающего объекта, чем известный способ анализа формы волны автодинного сигнала [8].

Здесь необходимо отметить, что в зависимости от условий применения автодинных систем и их назначения требования к уровню искажений сигнала могут быть разными. В системах, в которых решается задача «грубого» обнаружения отражающего объекта в заданной зоне селекции, требования к «качеству» сигнала могут быть невысокие. В этом случае в качестве автодина может использоваться сравнительно дешёвый генераторный модуль без дополнительных мер стабилизации частоты [13].

В системах, предназначенных для выполнения прецизионных измерений каких-либо параметров технологических процессов или функционирующих в условиях больших дальностей до цели, сложной радиолокационной обстановки, где необходимо обеспечить высокое разрешение и точность, требования к сигналу могут быть значительными. В таких приложениях в устройствах обработки автодинных сигналов необходимо учитывать особенности их формирования или в используемых автодинных генераторах целесообразно использование стабилизации частоты.

Как показано выше, «качество» автодинного сигнала определяется величиной параметра обратной связи C_{oc} . Приближение его величины к единице приводит к появлению скачкообразных сигналов и потере устойчивости работы измерительных систем. При малых значениях этого параметра свойства автодинного сигнала приближаются к свойствам сигнала гомодинной системы.

Для определения условий работы автодинных систем, при которых необходимо учитывать искажения выходных сигналов, рассмотрим связь параметра C_{oc} с радиолокационными характеристиками. Для случая точечного отражающего объекта такая связь характеризуется следующей формулой [55]:

$$C_{oc} \equiv C_{oc}(l_{отн}) = q_a \cdot q_{рлс} \cdot (1/l_{отн}) = \frac{1}{Q_{н1} S_f \cos \theta} \cdot \sqrt[4]{\frac{4\pi \cdot G_A^2 \cdot \sigma}{\Pi_{пр} \cdot \lambda^2}} \cdot \frac{1}{l_{отн}}, \quad (6.1)$$

где G_A – коэффициент усиления приёмо-передающей антенны; σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) отражающего объекта; $\Pi_{пр}$ – предельный энергетический потенциал автодина в требуемой полосе частот; $l_{отн} = l / l_{max}$ – нормированное расстояние до отражающего объекта; l_{max} – предельное расстояние от антенны до объекта, при котором отношение сигнал/шум в полосе частот равно единице: $l_{max} = [(G_A \lambda)^2 \sigma \Pi_{пр} / (4\pi)^3]^{1/4}$. Первый множитель в (6.1) q_a зависит

только от параметров автодина, $Q_{н1}S_f$ и угла θ , а второй, $q_{рлс}$, – от радиолокационных характеристик системы и ЭПР объекта (через величины G_A и σ). Произведение этих величин $q = q_a \cdot q_{рлс}$, численно равное относительному расстоянию $l_{отн}$, на котором $C_{oc} = 1$, определяет величину C_{oc} на предельном расстоянии l_{max} .

Из выражения (6.1) видно также, что параметр C_{oc} для точечной цели обратно пропорционален первой степени относительного расстояния $l_{отн}$ до отражающего объекта. Кроме того, из этого выражения также следует, что параметр C_{oc} при переходе в область более высоких частот излучения возрастает, поэтому обсуждаемая здесь проблема искажений сигналов становится ещё более актуальной с переходом в коротковолновую область диапазона миллиметровых волн.

В случае работы автодинной СБРЛ в условиях с плоской шероховатой отражающей поверхностью, который также представляет немалый практический интерес [137], формула для параметра внешней обратной связи имеет вид [55]:

$$C_{oc} \equiv C_{oc}(l) = G_A N_s / (2Q_{н1} S_f \cos\theta), \quad (6.2)$$

где N_s – альbedo отражающей поверхности. Из выражения (6.2) следует важный для применения автодинов вывод, что параметр искажений автодинного сигнала от расстояния до распределённой отражающей поверхности и от выбора длины волны излучения не зависит.

Полученное выражение (6.2) позволяет при выборе параметров автодинного генератора выполнить контрольную оценку их приемлемых значений с точки зрения допустимого уровня искажений сигналов. Поскольку обычно альbedo N_s и $\cos\theta$ – величины одного порядка (0,3...1), то основное влияние на параметр C_{oc} оказывает соотношение величин коэффициента усиления антенны G_A и нагруженной добротности $Q_{н1}$. Так, при выбранных выше параметрах G_A и $Q_{н1}$ из (6.2) при отсутствии у генератора стабилизации частоты имеем: $C_{oc} \approx 1$. В таком случае автодинная система, предназначенная, например, для измерения скорости, будет практически неработоспособна, поскольку величина C_{oc} соизмерима с единицей. Тогда как в случае применения стабилизированного генератора влиянием автодинных искажений сигналов можно пренебречь, поскольку $C_{oc} \ll 1$. При этом максимальное расстояние до поверхности можно рассчитать при известном (измеренном на стенде) энергетическом потенциале $\Pi_{пр}$ по формуле: $l_{max} = G_A \lambda N_s (\Pi_{пр})^{1/2} / 8\pi$. При принятых выше параметрах и $N_s = 0,5$ получим: $l_{max} = 159$ м.

6.3. Автодинный измеритель параметров движения вагонов на сортировочной горке

Для решения проблемы комплексной автоматизации технологических процессов роспуска и формирования поездов на сортировочных горках более двадцати лет известны задачи, которые связаны с измерением скорости скатывания отцепов на спускной части горки,

определением текущего положения вагонов в парке формирования и фиксацией направления перемещения вагонов при выполнении маневровых работ по осаживанию составов. Перспективность применения радиолокационных устройств, выполненных с применением автодинов, для решения этих и иных задач железнодорожного транспорта, известна также достаточно давно [138, 139]. Однако решение указанных и многих других задач по известным причинам стало возможным лишь в последние годы [47, 48, 54, 140]. В плане реализации задела по данной тематике нами был разработан и собран опытный образец радиолокатора на базе стабилизированного по частоте двухдиодного автодина.

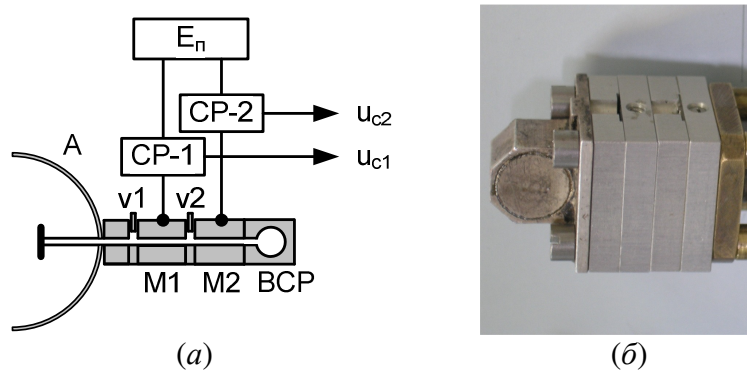


Рис. 6.6. Функциональная схема (а) и внешний вид (б) стабилизированного двухдиодного автодинного модуля [48]

Функционально конструкция двухдиодного автодина представляет собой два последовательно связанных генераторных модуля М1 и М2, которые подключены к антенне А общим входом-выходом (см. рис. 6.6 (а)). Между собой эти модули, выполненные «на проход», разнесены на определённое фазовое расстояние, которое, а также связь с нагрузкой (антенной) могут регулироваться показанными на схеме рис. 6.6 (а) винтами V1 и V2 соответственно. Рабочее смещение от источника питания E_n на генераторные модули подаётся через блоки регистрации БР автодинных сигналов, предназначенные для преобразования изменений среднего значения тока (напряжения) активного элемента в напряжения выходных сигналов u_{c1} и u_{c2} .

Внешний вид присоединённого к фланцу антенны двухдиодного генератора 8-мм диапазона, выполненного на основе генераторных модулей «Тигель-08», показан на рис. 6.6 (б). Собственная добротность колебательной системы модуля «Тигель-08», выполненной на основе щелевого резонатора, имеет сравнительно не высокое значение. Поэтому радиолокационное устройство на его основе имеет недостаточный для его нормальной работы динамический диапазон и низкую стабильность частоты. Для решения этих проблем к задней стенке второго модуля, считая от антенного фланца, присоединён дополнительный высокодобротный резонатор ВСР с резистивной связью, предназначенный для стабилизации частоты и

уменьшения автодинных искажений сигналов.

Решение системы уравнений, составленных для данной колебательной системы, после ряда преобразований и упрощений для автодинного отклика по изменению относительных амплитуд a_1 и a_2 колебаний парциальных генераторов, частоты $\Delta\omega$ и полного набега фазы $\delta(\tau)$ отражённого излучения можно записать в виде:

$$a_1(t) = \Gamma \cdot K_1 \cos[\delta(\tau) + \psi_{11}], \quad (6.3)$$

$$a_2(t) = \Gamma \cdot K_2 \cos[\delta(\tau) + \psi_{12}], \quad (6.4)$$

$$\Delta\omega(t) = -\Gamma \cdot (\omega_{01}/Q_{\text{вн1}} S_c S_f) \cdot L_{01} \sin[\delta(\tau) + \theta], \quad (6.5)$$

$$\delta(\tau) \equiv \delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \omega_0 \tau - C_{\text{oc}} \sin[\delta(\tau) + \theta], \quad (6.6)$$

где K_i – коэффициент автодинного усиления i -го парциального генератора [48]: $K_1 = K_{a1} \cdot K_{\Phi 1}$, $K_2 = K_{a2} \cdot K_{\text{п21}} \cdot K_{\Phi 2}$; K_{ai} – собственный коэффициент автодинного усиления i -го парциального генератора; $K_{\text{п21}}$ – коэффициент переноса автодинного отклика с первого парциального генератора на второй; $K_{\Phi i}$ – коэффициент, обусловленный взаимной синхронизацией парциальных генераторов; ψ_{1i} , θ – фазовые углы смещения автодинных откликов, которые определяются внутренними свойствами генераторов и их синхронизацией; L_{01} – фактор автодинной девиации частоты, обусловленный неизохронностью первого парциального генератора; $S_c = (1/k_{\text{св}}) \cdot (Q_{\text{н2}}/Q_{\text{н1}}) \cdot (\omega_{c1}/\omega_{c2})$ – фактор стабилизации частоты, вызванный действием взаимной синхронизации парциальных генераторов; $S_f = 1 + (\beta_1 \beta_2 Q_c)/Q_{\text{н2}}(1 + \beta_2)^2$ – коэффициент стабилизации частоты, обусловленный действием дополнительного стабилизирующего резонатора; β_1 , β_2 – коэффициенты связи стабилизирующего резонатора и второго парциального генератора с линией связи между ними (см. гл. 4); $k_{\text{св}}$ – коэффициент связи между генераторами; $Q_{\text{вн1}}$, $Q_{\text{нi}}$, Q_c – внешняя, нагруженные и собственная добротности резонансных систем парциальных генераторов и стабилизирующего резонатора.

Из выражений (6.3), (6.4) видно, что степень искажений сигналов в данном случае может быть получена значительно меньшей, чем у обычного автодина, ввиду действия взаимной синхронизации ($S_c \gg 1$) и стабилизации частоты дополнительным резонатором ($S_f \gg 1$). Это означает, что динамический диапазон двухдиодного автодина может быть получен значительно более широким, чем у обычного автодина, выполненного на базе однодиодного генератора.

Фазовое смещение ψ_{11} и ψ_{12} сигналов (6.3) и (6.4) обеспечивает возможность определения направления движения отражающих объектов. Фотографии осциллограмм автодинных сигналов для случая, когда разность фаз $\Delta\psi \approx 90^\circ$, приведены на рис. 6.7. На верхних осциллограммах показан сигнал, снимаемый с первой генераторной секции, а на нижних, – со второй. Это изменение фазы происходит независимо от амплитуды и характера флуктуации отражённого от цели излучения, что обеспечивает достаточно надежную работу устройства даже в случае распределенных отражающих объектов.

На базе описанного выше двухдиодного автодина разработан опытный образец радиолокационного измерителя параметров движения, который предназначен для определения скорости в интервале 0,15 – 40 км/ч, пройденного пути и ускорения, а также направления движения вагонов в составе системы автоматического управления технологическими процессами сортировочной горки.

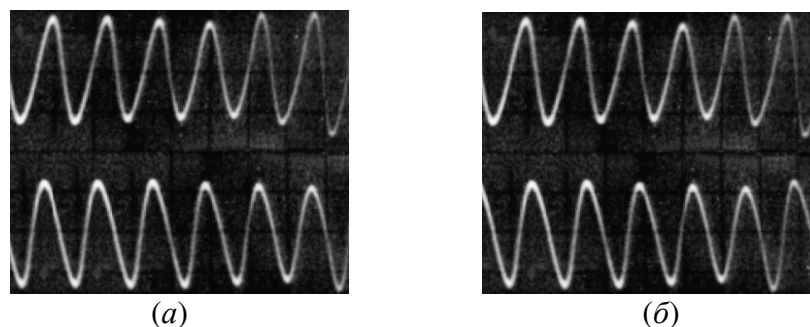


Рис. 6.7. Осциллограммы автодинных сигналов для случая движения отражателя к генератору (а) и от генератора (б)

На рис. 6.8 представлены фотографии внешнего вида (а) образца автодинного радиолокатора со стороны раскрыва антенны на рабочем месте проведения испытаний и вид парка формирования поездов сортировочной станции. В испытываемом образце использовалась антенна типа АДЭ с диаметром зеркала 360 мм. Ширина диаграммы направленности – 1,5 градуса. Апертура антенны сверху ограничена требованиями допустимого габарита приближения на железнодорожном транспорте.

Испытания выполнялись в условиях реального роспуска составов на нечётной горке станции Екатеринбург – Сортировочный. В качестве объекта испытаний использовались вагоны, поступающие на 56 путь. Радиолокатор устанавливался на подготовленный заранее стол со штатным узлом крепления и ориентации на продолжении оси контролируемого пути в сторону спускной части горки. Диаграмма направленности была ориентирована вдоль оси пути. В процессе испытаний производилась регистрация сигналов на персональный компьютер с визуальным контролем прохождения отцепов и последующим измерением расстояния до них. Перед проведением испытаний 56 путь был полностью свободен на расстоянии около 900 м.

Испытания проводились следующим образом. Отцеп из пяти вагонов проследовал на контролируемый путь парка формирования и торец последнего вагона остановился на расстоянии около 750 м от положения третьего замедлителя. В процессе движения отцепа производилась регистрация выходного сигнала по одному из каналов датчика в виде осциллограммы и спектрограммы. На рис. 6.9 представлены указанные диаграммы для различных положений отцепа, считая от выхода паркового замедлителя: (а) примерно на

выходе замедлителя (скорость $V=1,2$ км/час); (б) на расстоянии 350...400 м ($V=0,55$ км/час); (в) на расстоянии 650...700 м ($V=0,38$ км/час).



Рис. 6.8. Внешний вид (а) автодинного радиолокатора и панорама (б) парка формирования (вертикальной стрелкой указан контролируемый путь)

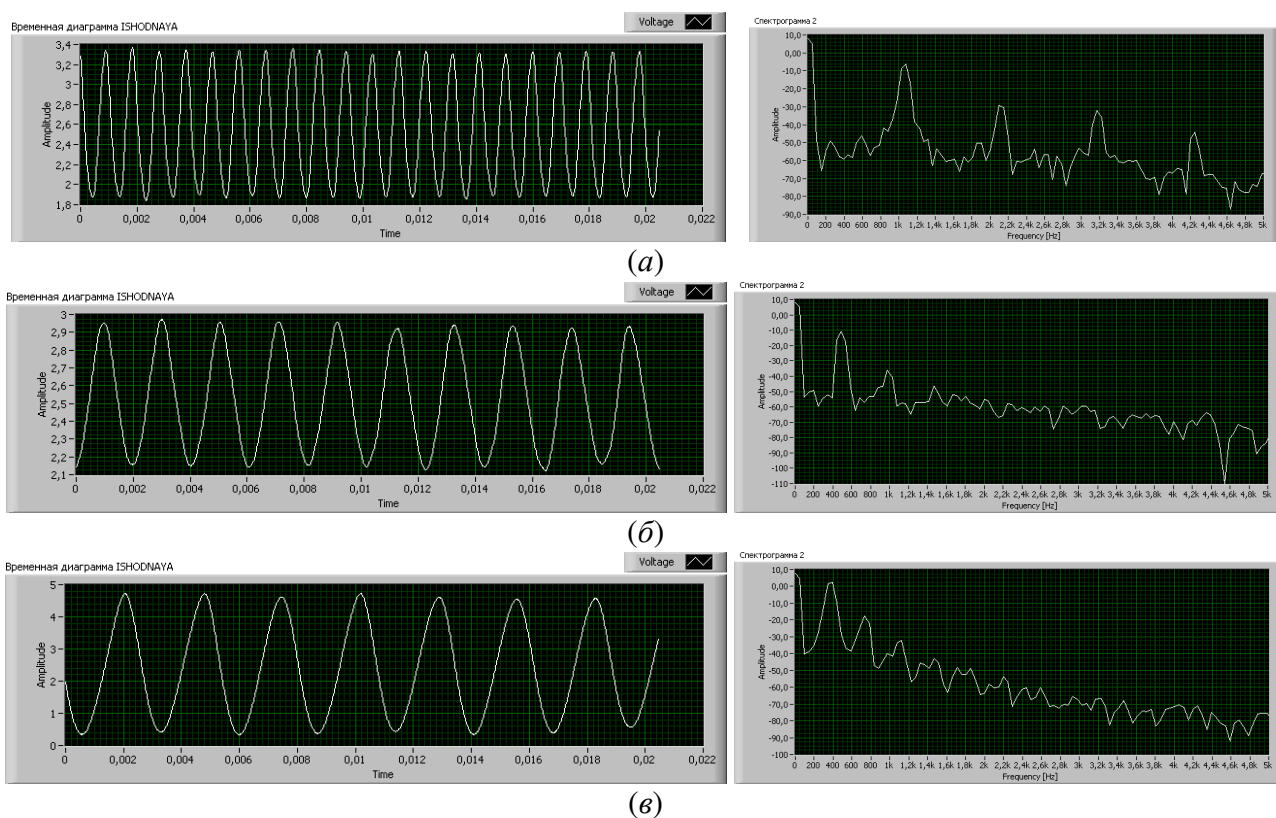


Рис. 6.9. Осциллограммы и спектрограммы сигналов, полученных от движущегося вагона на различных расстояниях

Результаты натурных испытаний показали принципиальную возможность использования радиолокаторов на базе двухдиодных автодинов для решения задач контроля параметров движения вагонов на сортировочной горке.

6.4. Применение автодинов в радиоволновых датчиках вибраций

В главе 2 при рассмотрении особенностей формирования информационных сигналов автодинных генераторов использовалась зависимость данных сигналов от величины нормированного (безразмерного) времени $\tau_n = \omega_0 \tau$ (см. раздел. 2.4). В случае датчиков малых перемещений и вибраций удобнее пользоваться в качестве независимой переменной величину нормированного расстояния $l_n = \tau_n = l/(\lambda/2)$. Обобщённый вид характеристики $a(l_n)$, показывающей зависимость выходного сигнала от расстояния между автодином и OO , представлен на рис. 6.10. На этом же рисунке приведены пояснения принципа преобразования виброперемещений в выходной сигнал датчика. Размах этой характеристики определяется уровнем отражённого излучения, который обычно регулируется аттенуатором, и зависит также от величин коэффициентов автодинного усиления, девиации или автодетектирования. Буквой O на характеристике $a(l_n)$ обозначено положение «рабочей точки», которая выбирается в процессе предварительной настройки датчика путём его перемещения относительно контролируемого объекта или изменением величины фазового сдвига при помощи СВЧ фазовращателя, если он предусмотрен в конструкции датчика.

График $z(t)$ на рис. 6.10 характеризует радиальные (относительно антенны) колебания отражателя во времени t , а $a(t)$ – отклик датчика на вибрационное воздействие. Регистрация полученного сигнала $a(t)$ и его анализ позволяют определить параметры исследуемых вибраций: амплитуду, частоту и спектральный состав. Из построений рис. 6.10 очевидно также, что наиболее подходящими рабочими точками для выполнения измерений являются точки пересечения графиком оси абсцисс, в которых обеспечиваются наибольшие линейность и крутизна преобразования, а также наибольший динамический диапазон измеряемых величин. Такой выбор рабочих точек полностью согласуется с выводами теоретических исследований, представленных в предыдущих разделах работы.

Как видно из выражения (2.33), при замене аргумента τ_n на l_n , в случае малого значения параметра C_{oc} ФХА является практически линейной функцией l_n , а АХА и ЧХА – имеют практически гармонический вид, как у гомодинных датчиков интерференционного типа (см. рис. 6.10). В случае нарушения указанного выше сильного неравенства, когда величина $C_{oc} \sim 1$, эти характеристики у автодинного датчика имеют специфические ангармонические искажения формы (см. раздел 2.4, рис. 2.5).

На рис 6.11 представлены нормированные АХА $a_n(l_n)$ и ЧХА $\chi_n(l_n)$, рассчитанные согласно (2.30), (2.31) с учётом (2.33) при величинах коэффициентов $\gamma = 1$, $\rho = -0,2$ и значении параметра внешней обратной связи $C_{oc} = 0,8$. Возможные рабочие точки на этих характеристиках

обозначены буквами O_1 и O_2 . Из кривых рис. 6.11 видно, что в рабочих точках O_1 и O_2 крутизна характеристик по модулю имеет разные величины. Вид АХА по отношению к воздействующей функции отличается заметной асимметрией. У ЧХА зависимость отклонения частоты от амплитуды вибрации в обеих точках является симметричной (см. рис. 6.11 (б)).

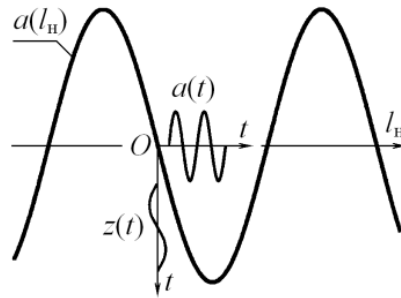


Рис. 6.10. Пояснения принципа действия автоиндукционного датчика вибраций

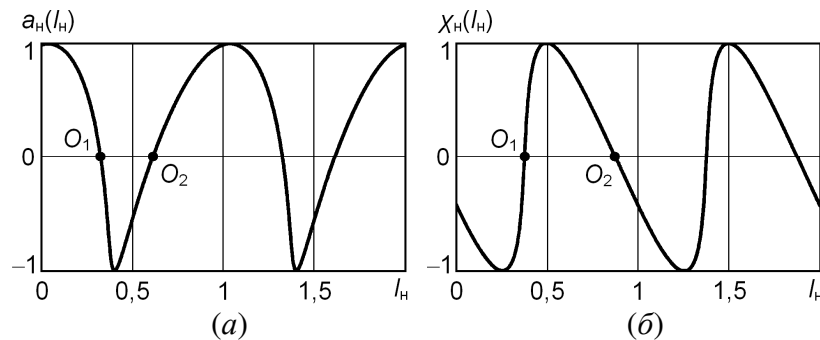


Рис. 6.11. АХА $a_n(l_n)$ (а) и ЧХА $\chi_n(l_n)$ (б) автоиндукционного датчика при сильной обратной связи

Для анализа влияния на степень искажения формируемых сигналов величины параметра C_{oc} и амплитуды вибраций Z_m в выбранных рабочих точках в выражениях (2.30) – (2.33) примем закон изменения относительных вибраций $z_n(t) = 2z(t)/\lambda$ гармоническим:

$$z_n(t) = Z_n \sin \Omega_B t, \quad (6.7)$$

где $Z_n = 2Z_m/\lambda$ – относительная амплитуда и Ω_B – частота вибраций.

Отмеченная выше зависимость положения рабочих точек от величины параметра обратной связи C_{oc} требует при изменении уровня отражённого сигнала производить подстройку расстояния между автоиндукционным датчиком и контролируемым объектом. В случае расчёта выходных сигналов датчика для таких условий необходимо в исходных данных, кроме внутренних параметров генератора, вводить также соответствующую коррекцию значений относительных расстояний l_n для каждой рабочей точки. Данные условия находим из выражений (2.30) – (2.33):

$$\delta(l_n)_{(n)} - \Psi - (\pi/2) = 0; \quad \delta(l_n)_{(n)} + \theta = 0. \quad (6.8)$$

Используя в пакете программ MathCAD метод секущих итерационного алгоритма, реализованного в функции root, находим корни l_{n1} и l_{n2} трансцендентных уравнений (6.8), после

подстановки которых в формулы (2.30), (2.31) получаем соответствующие выражения для дискриминационных характеристик датчика в требуемых рабочих точках O_1 и O_2 (см. рис. 6.11). Далее, подставляя в эти выражения в функцию (2.33), с помощью пакета программ MathCAD выполнен спектральный анализ полученных выходных сигналов датчика.

Результаты такого анализа при учёте первых десяти гармоник представлены на рис. 6.12 в виде семейства графиков коэффициентов нелинейных искажений $K_{\Gamma a}(Z_n)$ и $K_{\Gamma \chi}(Z_n)$ автодинных сигналов и амплитуд первых гармоник $A(Z_n)$ и $X(Z_n)$ в зависимости от относительной амплитуды Z_n вибрации для различных значений параметра C_{oc} . Данные расчёты выполнены при прежних величинах коэффициентов $\gamma = 1$, $\rho = -0,2$ и различных значениях параметра обратной связи: $C_{oc} = 0$ – кривые 1; $C_{oc} = 0,4$ – кривые 2; $C_{oc} = 0,8$ – кривые 3. Под литерами (а) и (б) графики рис. 6.12 соответствуют рабочим точкам O_1 , а под литерами (в) и (г) – точкам O_2 . Графики рис. 6.12 (а) и (б) получены для АХА $a_n(l_n)$, представленной на рис. 6.11 (а); рис. 6.12 (в) и (г) – для ЧХА $\chi_n(l_n)$ рис. 6.11 (б).

Кривые 1 на всех графиках рис. 6.12 соответствуют датчикам с гомодинным построением приёмо-передатчика. Ход зависимостей коэффициентов гармоник от относительной амплитуды вибраций их близок параболической кривой, а зависимость амплитуд первой гармоники – практически линейные до значений $Z_n = 0,25$.

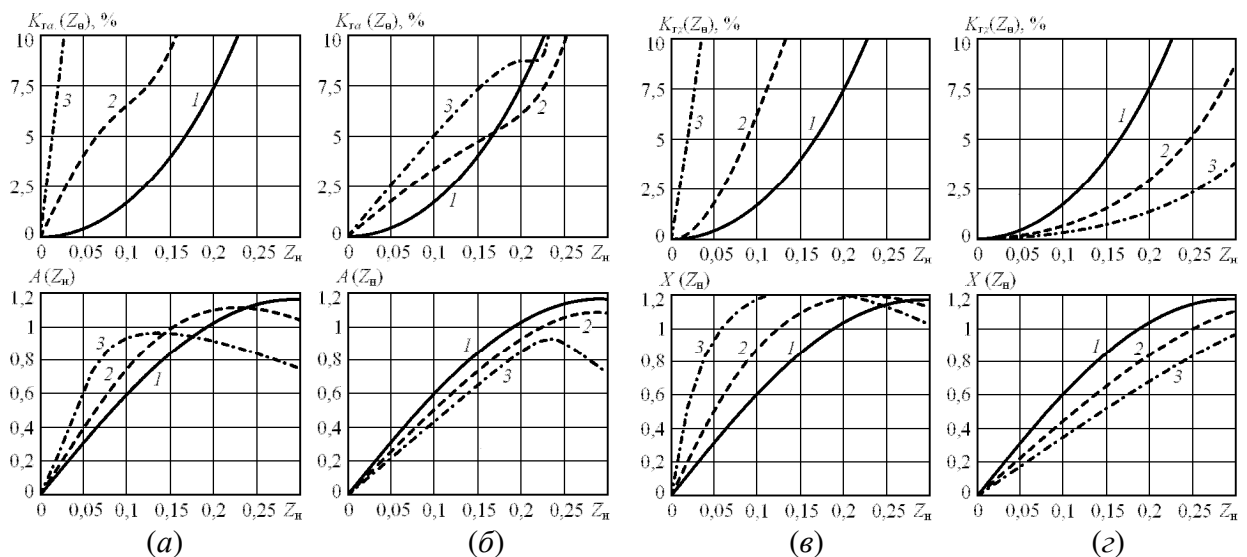


Рис. 6.12. Семейства графиков коэффициентов $K_{\Gamma a}(Z_n)$, $K_{\Gamma \chi}(Z_n)$ и амплитуд первых гармоник $A(Z_n)$, $X(Z_n)$ [52]

Для автодинных датчиков эти кривые действительны при условии, если величина $C_{oc} \ll 1$. Данный параметр, как видно из выражения (2.24), зависит не только от внутренних свойств используемого автодинного генератора, но и от внешних условий работы датчика: величины коэффициента Γ , расстояния до исследуемого объекта, выражаемого в этой формуле числом

полуволн N .

Поэтому гомодинным характеристикам автодинные датчики реализуются при условиях или малого расстояния до отражающей поверхности объекта или малого уровня отражённого излучения. В этом случае диапазон амплитуд вибраций при допустимом уровне коэффициента гармоник 5% ограничен сверху величиной $Z_n = 0,17$, как и у измерителей вибраций с гомодинным построением приёмно-передающего модуля. Регистрация автодинного сигнала наиболее предпочтительна в этом случае по изменению смещения на АЭ или с внешнего детектора, т.к. частотные изменения слабо влияют на набег фазы отражённого СВЧ излучения.

Для оценки возможностей автодинных датчиков в условиях, когда величина $C_{oc} \sim 1$, сравним поведение кривых 2 и 3 с классическими кривыми 1. Из сравнения этих кривых следует, что в рабочих точках O_1 , отличающихся более высокой крутизной преобразования, во всех случаях с увеличением амплитуды Z_n вибраций и параметра обратной связи C_{oc} наблюдается резкий рост коэффициентов гармоник и обеспечивается меньший диапазон линейного участка для входного воздействия, чем в точках O_2 . Поэтому рабочие точки O_1 могут использоваться при регистрации предельно малых вибраций.

Рабочим точкам O_2 (см. рис. 6.11), где автодинные характеристики имеют пологий участок, характерна обратная тенденция. С увеличением параметра C_{oc} динамический диапазон измерителя вибраций существенно расширяется. При этом особый интерес представляет применение точки O_2 при регистрации автодинных изменений частоты $\chi_n(l_n)$ (см. рис. 6.11 (б)). В этом случае коэффициент гармоник $K_{ГХ}(Z_n)$ с увеличением амплитуды Z_n вибраций и параметра C_{oc} обеспечивает значительно меньший рост, а линейность зависимости $X(Z_n)$ наблюдается в более широком диапазоне изменений этих амплитуд, чем в классическом случае (см. рис. 6.12). Так, например, при $C_{oc} = 0,8$ и допустимом коэффициенте гармоник 5% относительная амплитуда Z_n вибраций может достигать в 2 раза большей величины, чем у гомодинных измерителей. Несколько худшие результаты получаются при регистрации изменений амплитуды колебаний. Наибольший выигрыш здесь составляет около 30%.

Экспериментальные исследования для определения характеристик нелинейных искажений в зависимости от амплитуды вибраций для различных рабочих точек и способов регистрации автодинного сигнала выполнялись на примере автодинных модулей семейства «Тигель», подробно описанных в разделе 1.1 данной работы. Функциональная схема экспериментального стенда для исследования вибраций представлена на рис. 6.13. В отличие от стенда, описанного в разделе 5.1, в данном стенде имитатор доплеровского сигнала заменен на вибрирующий отражатель, в качестве которого использовалась подключённая к генератору низкой частоты ГНЧ басовая динамическая головка ДГ с наклеенной на диффузор алюминиевой фольгой.

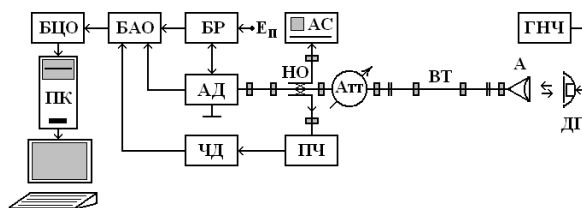


Рис. 6.13. Функциональная схема стенда для исследования вибраций [53]

Калибровка амплитуды вибраций из-за отсутствия в лаборатории эталона выполнялась косвенно по анализу картины выходного сигнала автодина. Так, при равенстве амплитуды вибраций $1/8$ длины волны (в данном случае 1мм) на осциллограмме выходного сигнала наблюдается появление ограничения его амплитуды. При этой же величине вибрации по половинной ширине спектра Δf_m излучения автодина с помощью анализатора спектра АС находилась величина автодинной девиации частоты $\Delta\omega_{ma}=2\pi\Delta f_m$, которая далее использовалась для вычисления величины параметра обратной связи с учётом дисперсии в волноводе: $C_{oc} = 2\Delta\omega_{ma}l/c[1 - (\lambda/\lambda_{кр})]^{1/2}$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны волновода.

Результаты экспериментов представлены на рис. 6.14 в виде графиков зависимостей коэффициентов нелинейных искажений $K_{Гa}(Z_n)$ и $K_{Г\chi}(Z_n)$ сигналов, полученных по изменению амплитуды $a_1(l_n)$ и частоты $\chi(l_n)$, а также амплитуд первых гармоник $A_1(Z_n)$ и $X_1(Z_n)$ этих же сигналов в зависимости от относительной амплитуды Z_n вибрации [53]. Результаты обработки сигнала автодетектирования $a_0(l_n)$ здесь не приведены, поскольку полученные характеристики практически полностью совпадали с характеристиками, построенными для сигнала $a_1(l_n)$ с выхода детектора.

Кривые 1 на рис. 6.14 получены при величине параметра $C_{oc} \approx 0,06$, кривые 2 и 3 – при $C_{oc} \approx 0,6$, причём кривая 2 снята для рабочей точки с «крутым» ходом характеристики, а кривая 3 – для точки с «пологим» ходом. Сравнение полученных экспериментально графиков рис. 6.14 с расчётными кривыми рис. 6.13 показывает их качественное соответствие.

Важным вопросом при анализе работы автодинного датчика вибраций является вопрос погрешность измерений. Как показано в работе [108], она зависит от относительных изменений величины уровня отражённого излучения и нестабильностей частоты генерации, коэффициентов автодинного усиления и (или) автодетектирования, а также от уровней частотного и амплитудного шума генератора. Первые три составляющие погрешности имеют методический характер и могут быть уменьшены или даже полностью исключены соответствующими техническими решениями или периодической калибровкой датчика. Последняя составляющая, обусловленная шумами генератора, является принципиально неустранимой, определяет потенциальные возможности метода.

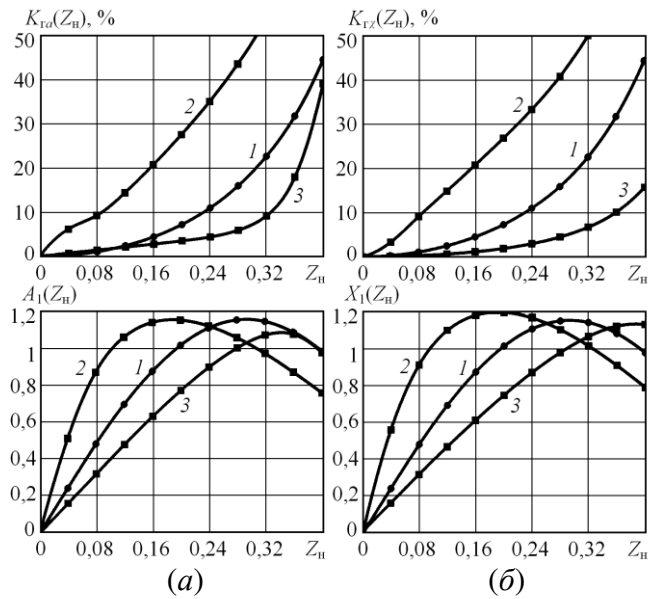


Рис. 6.14. Графики нормированных зависимостей $K_{\Gamma\alpha}(Z_n)$, $K_{\Gamma\chi}(Z_n)$, $A_1(Z_n)$ и $X_1(Z_n)$, полученных при различных значениях параметра обратной связи

Теоретические аспекты анализа шумовых характеристик одноконтурных автодинов подробно рассмотрены в главе 3, а результаты экспериментальных исследований – в разделе 5.7. Из анализа этих результатов следует, что в случае малых значений параметра C_{oc} зависимость уровней как амплитудных, так и частотных шумов от относительного расстояния l_n практически отсутствует. Однако в случае сильной обратной связи, когда величина параметра $C_{oc} \sim 1$, в автодинном датчике наблюдается периодическая нестационарность уровней шумов. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю слабой обратной связи могут снижаться, а в других – значительно расти.

Выполненные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинов позволили сформулировать ряд общих положений и рекомендаций при их использовании в приборах и устройствах для контроля и измерения параметров вибраций, которые состоят в следующем. При проведении контроля виброперемещений удалённых объектов и в условиях высокого уровня отражённого излучения необходимо учитывать возможность появления не только специфических искажений дискриминационной характеристики, но и зависимость уровня шума автодина от выбранной рабочей точки. При правильном выборе рабочей точки автодинных датчиков в таких условиях можно получить существенный выигрыш в динамическом диапазоне по сравнению с гомодинными датчиками. Особый интерес при этом представляют рабочие точки с «пониженной» крутизной дискриминационной характеристики, обеспечивающий более высокую её линейность и меньший уровень шумов.

Для исключения или значительного уменьшения искажений дискриминационной характеристики и улучшения ряда параметров автодинных датчиков целесообразно применение стабилизации частоты СВЧ генераторов, например, с помощью внешнего высокочастотного резонатора [52, 53]. Такое решение особенно оправдано в случае реализации автодинного датчика с регистрацией сигнала по изменению амплитуды колебаний или сигнала автодетектирования, как наиболее простого в конструктивном отношении. В таком случае характеристики автодинного датчика максимально приближаются к характеристикам датчиков с гомодинным построением приёмо-передатчика.

6.5. Автодинный приёмо-ответчик для аэрологических радиозондов

К основным особенностям бортовых активных приёмо-ответчиков радиозондов систем дистанционного радиозондирования атмосферы относятся такие специфические требования к ним, как экономичность, малые габаритные размеры и низкая стоимость СВЧ приёмо-передающих модулей [141]. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют применяющиеся с конца пятидесятих годов прошлого столетия и до наших дней сверхрегенеративные приёмо-передатчики (СПП). Их недостаток заключается в большой ширине спектра излучения, что в последнее время стало создавать известные проблемы электромагнитной совместимости радиосредств.

Альтернативой СПП являются автодинные приёмопередатчики (АПП), которые конструктивно и функционально ничем не отличаются от первых, но до настоящего времени ещё не нашли своё использование в системах радиозондирования, хотя ряд их положительных свойств, особенно в части необходимой полосы частот, представляются привлекательными [49, 51].

В настоящем разделе представлены результаты экспериментальных исследований серийного СВЧ модуля СПП радиозонда МРЗ-ЗМК в автодинном режиме приёма запросных сигналов радиолокатора на частоте 1680 МГц [50]. Цель этих исследований состоит в определении возможности замены СПП на АПП в перспективных системах радиозондирования атмосферы СВЧ и КВЧ диапазонов.

На рис. 6.15 (а) изображена функциональная схема АПП радиозонда. Основным элементом её является СВЧ модуль М1, выполненный на транзисторе VT1 (колебательная система условно не показана). Внешние по отношению к этому модулю элементы схемы обеспечивают номинальный режим транзистора VT1 для генерации СВЧ колебаний. При этом важным узлом АПП является стабилизатор среднего значения тока модуля М1, выполненный на транзисторе VT2; резисторах R1, R2, R3; конденсаторах C1, C2, C3 и диодах VD1, VD2

образуют цепочку смещения базы транзистора VT2.

Воздействие сигнала запроса на СВЧ генератор вызывает в нём автодинный эффект, который состоит в изменениях режима его колебаний. Эти изменения наблюдаются как в случае захвата частоты генератора сигналом запроса, так и в случае режима биений [49]. При постоянстве среднего значения тока транзистора VT1 эти изменения проявляются как полезный выходной сигнал в соответствующих вариациях падения напряжения в цепи коллектора VT1. Данный сигнал в этой цепи (см. «Выход ПЧ»), выделяется с помощью широкополосного фильтра, образованного выходной ёмкостью СВЧ модуля M1 (коллектор VT1) и индуктивностью L1. Далее этот сигнал после его обработки и идентификации (эти узлы на рис. 6.15 не показаны) вызывает формирование импульса $U_{\text{п}}$ прерывания генерации, который подаётся на базу транзистора VT1. Таким образом, кратковременным выключением СВЧ модуля на время 1 мкс обеспечивается передача к запросному радиолокатору ответного сигнала АПП.

На рис. 6.15 (б) изображена топология платы СВЧ модуля АПП в сборе со стороны поверхностного монтажа. Высокочастотные элементы электрической схемы, выполненные в виде микрополосковых линий с различным волновым сопротивлением, на рис. 6.15 (б) обозначены как: W1, W2, W3. Обозначение остальных элементов соответствует схеме рис. 6.15 (а). Общий проводник электрической схемы по постоянному и переменному токам конструктивно расположен на противоположной металлизированной стороне платы. Выводы питания и управления модулем имеют одноименные названия «К», «Б», «Э».

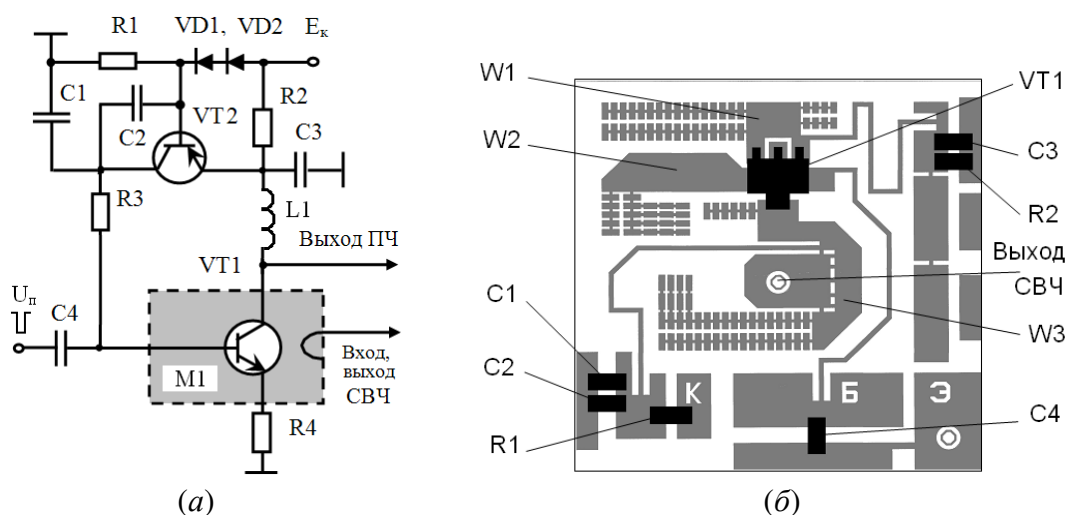


Рис. 6.15. Функциональная схема (а) и топология (б) транзисторного СВЧ модуля АПП радиозонда

В эксперименте на вход усилителя вертикального отклонения осциллографа подавался выходной сигнал ПЧ, а на его вход синхронизации подавались импульсы запуска генератора

запросного сигнала. Это обеспечивало наблюдение формы и уровня ответного сигнала АПП. Результаты наблюдения основных процессов, происходящих в СВЧ генераторе АПП, представлены на рис. 6.16. Верхний луч на осциллограмме рис. 6.16 (а) (выделено цифрой «1») показывает автодинный сигнал АПП, который формируется в ответ на запросные радиоимпульсы РЛС. Нижним лучом показана огибающая запросного радиоимпульса (выделено цифрой «2»), длительность которого составляет около 1 мкс. Собственная частота излучения АПП 1680 МГц; частота запросного сигнала РЛС смещена относительно частоты излучения на 5 МГц. Длительность ответного сигнала АПП пропорциональна длительности запросного сигнала. Количество волн сигнала биений внутри ответного радиоимпульса определяется величиной взаимного смещения частот запроса и излучения, а также длительностью запросного сигнала.

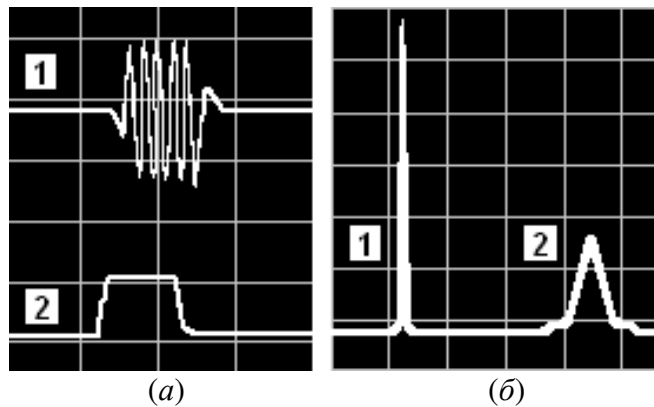


Рис. 6.16. Осциллограммы (а) и спектрограммы (б) сигналов при исследовании СВЧ модуля АПП

На рис. 6.16 (б) показан спектр гармонического излучения АПП (выделено цифрой «1»), имеющий вид дельта-функции. Справа показан спектр запросного сигнала (выделено цифрой «2»), имеющего классический вид функции $\sin x/x$ радиоимпульса, который смещен относительно спектра излучения АПП на 5 МГц. Девияция несущей частоты телеметрическим сигналом составляет 4 – 5 кГц. Поэтому на спектре излучения АПП в данном масштабе развертки эффекта модуляции не видно.

Выходная мощность СВЧ модуля АПП варьировалась в пределах от 100 мВт до 560 мВт при изменении питающего напряжения от 5 до 15 В. При этом изменения частоты составили не более 100 – 150 кГц и сохранялся к.п.д. в пределах 25 – 40 %. Чувствительность АПП к запросному сигналу, как установлено экспериментально, определяется флуктуациями амплитуды СВЧ модуля и полосой пропускания УПЧ. Оценки сделанные по результатам измерений десяти СВЧ модулей показывают, что чувствительность АПП находится в пределах минус 110 – 120 дВ/Вт. Поэтому для измерения наклонной дальности до радиозонда 250 – 300

км импульсная мощность запросного сигнала передатчика РЛС должна быть не более 50 – 100 Вт. При этом средняя мощность передатчика составит всего 0,05 – 0,1 Вт.

6.6. Выводы

1. Показана возможность применения аппроксимационных характеристик активных элементов, на примере диодов Ганна, для выполнения инженерных расчетов частотных характеристик основных параметров автодинных генераторов. Установлено, что влияние изменений частоты генерации в пределах рабочего диапазона ДГ на величину автодинной девиации частоты и степень искажения автодинных характеристик, а также на относительные смещения этих характеристик по оси нормированного времени, в связи с изменениями величин соответствующих углов фазовых смещений, несущественно. Изменение частоты генерации преимущественно влияет на величину коэффициента автодинного усиления: с увеличением частоты генерации он уменьшается в несколько раз.

2. При использовании автодинов миллиметрового диапазона на полупроводниковых диодах в СБРЛ с высокими требованиями к качеству сигнала и стабильности параметров, а также для расширения рабочего диапазона по дальности действия системы весьма эффективно применение стабилизации частоты генерации с помощью внешнего высокочастотного резонатора. В качестве примера такого использования можно указать датчики для измерения параметров технологических процессов: скорости вращения валов, скорости падения изделий при их аэробаллистических испытаниях, параметров движения локомотива относительно полотна дороги, вагонов на сортировочной горке и многих других.

3. Для решения задач определения параметров движения вагонов на сортировочной горке разработан опытный образец автодинного радиолокатора, выполненный на основе стабилизированного по частоте двухдиодного генератора. Показано, что благодаря возможности получения сдвинутых по фазе двух автодинных сигналов, а также значительно меньшей величины автодинной девиации частоты автоколебаний, данные автодины обеспечивают более широкие функциональные возможности при их применении в системах ближней радиолокации, а также улучшение ряда их технических характеристик.

4. На основе результатов выполненных исследований особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных КВЧ генераторов сформулирован ряд общих положений и рекомендаций при их использовании в приборах и устройствах для контроля и измерения параметров вибраций:

– при проведении контроля виброперемещений удалённых объектов и в условиях высокого уровня отражённого излучения необходимо учитывать возможность появления

специфических искажений дискриминационной характеристики;

– при правильном выборе рабочей точки автодинных датчиков в таких условиях можно получить существенный выигрыш в динамическом диапазоне по сравнению с гомодинными датчиками. Особый интерес представляет вариант регистрации автодинного сигнала по изменениям частоты, обеспечивающий более высокую линейность дискриминационной характеристики и почти двукратный выигрыш по максимальной величине амплитуды вибраций, хотя техническая реализация этого варианта представляется наиболее сложной;

– для исключения или значительного уменьшения искажений дискриминационной характеристики и улучшения ряда параметров автодинных датчиков целесообразно применение стабилизации частоты КВЧ генераторов, например, с помощью внешнего высокочастотного резонатора. Такое решение особенно оправдано в случае реализации автодинного датчика с регистрацией сигнала по изменению амплитуды колебаний или сигнала автодетектирования, как наиболее простого в конструктивном отношении. В таком случае характеристики автодинного датчика максимально приближаются к характеристикам датчиков с гомодинным построением приёмо-передатчика;

– при проведении контроля малых перемещений и вибраций удалённых объектов и в условиях высокого уровня отражённого излучения с помощью автодинных датчиков необходимо учитывать возможность появления также явления зависимости уровня шума автодина от выбранной рабочей точки. При правильном выборе рабочей точки автодинных датчиков в таких условиях можно получить существенный выигрыш в динамическом диапазоне. Особый интерес при этом представляют рабочие точки с пониженной крутизной дискриминационной характеристики, обеспечивающий более высокую её линейность и меньший уровень шумов.

5. Полученные результаты выполненных исследований автодинов дали положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности замены сверхрегенеративного приёмо-передатчика на автодинный в перспективных системах радиозондирования атмосферы.

Заключение

Основные выводы по работе состоят в следующих положениях:

1. На основе выполненного обзора литературы по автодинной тематике и вопросам конструирования СВЧ и КВЧ генераторных модулей намечены перспективы развития данного направления, выбран объект и сформулированы основные задачи исследований.

2. Разработана математическая модель для анализа автодинного эффекта в одноконтурной автоколебательной системе, находящейся под воздействием малого уровня собственных шумов и отражённого от объекта излучения, которая отличается учётом не только неизохронности генератора и явления автодетектирования изменений амплитуды колебаний, но и влияния изменений частоты генерации автодина на изменения амплитуды колебаний и величины смещения (тока или напряжения) активного элемента. На основе данной модели проведено рассмотрение широкого круга вопросов, которые позволили определить возможности и перспективы дальнейшего развития теории и практики автодинов КВЧ диапазона. Основные новые результаты этих исследований состоят в следующем.

2.1. В рамках разработанной модели для удобства описания процессов в генераторах КВЧ диапазона предложено использовать ряд новых в теории автодинов терминов.

Для генераторов, у которых выражено явление зависимости амплитуды от изменений частоты колебаний, предложено использование термина *неизодромный* генератор. Данное явление характеризуется *коэффициентом неизодромности*, который определяется как отношение величины параметра частотной чувствительности амплитуды колебаний генератора к значению параметра стабилизации частоты (нагруженной добротности колебательной системы).

При анализе процессов автодетектирования в автодинном генераторе, в котором одновременно происходят преобразования, как изменений амплитуды, так и частоты колебаний в постоянную составляющую смещения активного элемента, предложено использование коэффициента *амплитудно-частотного смещения*. При анализе отдельных составляющих процесса автодетектирования в автодине обосновано использование понятий коэффициентов *амплитудного* и *частотного детектирования*.

Предложенные термины *неизодромность* и *частотное детектирование* являются дуальными относительно понятий *неизохронность* и *амплитудное автодетектирование*, которые, как известно из литературы, определяются как зависимость частоты колебаний генератора и сигнала в цепи смещения активного элемента от амплитуды генерируемых

колебаний.

Нормированную зависимость величины выходного сигнала, полученного в цепи питания генератора, от расстояния до отражающего объекта предложено называть *характеристикой автодетектирования (ХАД)*.

2.2. Автодинный генератор, находящийся под воздействием отражённого от объекта локации собственного излучения, по отношению к изменениям режима стационарных колебаний может быть представлен в виде системы с внутренней и внешней обратной связью. В этой системе внешняя обратная связь, обусловленная запаздывающим воздействием отражённого излучения, характеризуется параметром *внешней* обратной связи, который определяется как произведение времени запаздывания на величину зависящей от уровня отражённого излучения автодинной девиации частоты. Внутренняя обратная связь автодина, обусловленная взаимосвязанными процессами преобразования изменений частоты генерации в изменения амплитуды колебаний и обратно, характеризуется *параметром внутренней обратной связи*, который определяется как произведение коэффициентов неизохронности и неизодромности. Если данные коэффициенты одного знака, то такая система имеет *положительную внутреннюю обратную связь*, а если они разных знаков, то – *отрицательную*.

2.3. Из анализа условий внутренней и внешней устойчивости функционирования автодинной системы «генератор – отражающий объект» следует, что кроме известного требования к знаку прочности предельного цикла генератора, необходимо также, чтобы коэффициент внутренней положительной обратной связи за счёт неизохронности и неизодромности генератора, а также параметр внешней обратной связи автодина были меньше единицы.

2.4. В результате теоретических и экспериментальных исследований автодинных КВЧ генераторов показана зависимость их основных параметров, таких, как коэффициентов автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования, а также автодинных характеристик и параметра внешней обратной связи от их внутренних свойств. При этом данные свойства автодинов определяются не только известными параметрами, такими как прочность предельного цикла, внешняя и нагруженная добротности колебательной системы, коэффициент амплитудного автодетектирования и неизохронность, но и такими параметрами автодинов, как неизодромность, коэффициент частотного автодетектирования и коэффициент внутренней обратной связи.

2.5. Разработанная модель автодинного генератора позволяет по результатам анализа особенностей формирования экспериментально полученных автодинных характеристик при различных уровнях отражённого излучения определить внутренние свойства и параметры КВЧ

генераторов. К этим параметрам относятся прочность предельного цикла, внешняя и нагруженная добротности колебательной системы, коэффициент амплитудного автодетектирования и неизохронность генератора, а также коэффициенты неизодромности и частотного автодетектирования.

2.6. Внутренние параметры генератора, такие как его неизохронность и неизодромность, оказывают влияние на относительное фазовое смещение частотных (ЧХА) и амплитудных (АХА) характеристик автодинной системы. Явление частотного детектирования вызывает дополнительное смещение фазы ХАД. Степень ангармонических искажений автодинных характеристик зависит не только от величины параметра внешней обратной связи (с увеличением этого параметра они растут), но и от внутренних параметров генератора.

2.7. Амплитудно-частотные (АЧХ) и автодетекторно-частотные (ХАЧ) характеристики автодинных систем, полученные перемещением изображающей точки при изменении относительного расстояния до отражающего объекта, являются замкнутыми кривыми в форме эллипсов. Параметры этих эллипсов определяются значениями внутренних параметров автодинных генераторов, а неравномерность перемещения изображающей точки зависит от величины параметра внешней обратной связи. Проекции этих характеристик на ортогональные оси декартовой системы координат дают соответствующие АХА, ХАД и ЧХА.

2.8. Результаты теоретических исследований подтверждены данными экспериментальных исследований, полученными для гибридно-интегральных модулей «Тигель-08» 8-мм диапазона длин волн, выполненных на основе планарных двухмезовых диодах Ганна.

3. На основе разработанной модели автодина с одноконтурной колебательной системой выполнен анализ шумовых параметров и характеристик, при этом получен ряд новых результатов, которые сводятся к следующим.

3.1. В случае пренебрежимо малых по сравнению с единицей значений параметра внешней обратной связи автодина зависимость среднеквадратического уровня как частотных, так и амплитудных шумов от относительного расстояния до отражающего объекта практически отсутствует. Однако в случае сильной обратной связи, когда величина этого параметра соизмерима с единицей, в автодинном генераторе наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения нестационарность уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающей поверхности. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю слабой обратной связи могут заметно снижаться, а в других – значительно расти, причём увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики автодина, а его уменьшению – более пологие.

Причиной такого поведения шумовых характеристик автодинной системы, как

установлено, является нелинейность взаимодействия формируемого отклика автодина на воздействие отражённого излучения и внутренних частотных шумов генератора. Последние, проходя по цепи внешней обратной связи «генератор – отражающий объект – генератор», преобразуются в фазовые шумы и вызывают соответствующие изменения уровней флуктуаций автодинных изменений частоты и амплитуды колебаний, а также сигнала в цепи смещения активного элемента.

3.2. На основе численных расчётов шумовых характеристик автодинов установлено, что, несмотря на периодическую нестационарность уровня шумов при воздействии отражённого излучения, среднее значение уровня шума за период автодинного сигнала во всех случаях, как малого, так и большого отношения сигнал/шум, сохраняется практически неизменным и равным уровню шумов автономного генератора.

3.3. Показано, что одноконтурный автодинный генератор, у которого внутренняя обратная связь за счёт неизохронности и неизодромности является отрицательной, по сравнению с изохронным генератором может обеспечивать снижение уровня шума и выигрыш в величине динамического диапазона на несколько дБ.

3.4. Выявленные особенности формирования автодинных и шумовых характеристик генераторов необходимо учитывать при расчёте энергетического потенциала систем и при обработке выходных сигналов автодинных датчиков и измерителей. Например, при работе автодинных радиолокаторов в условиях высокого уровня отраженного излучения и (или) большого расстояния до объекта ангармонические искажения сигналов и зависимость уровня шума автодина от положения отражателя могут быть причинами, которые снижают точность измерений параметров движения объектов и ограничивают дальность их действия.

4. Для анализа процессов в автодинных генераторах КВЧ диапазона, колебательная система которых представлена совокупностью основного (рабочего) резонатора и связанного с ним стабилизирующего высокочастотного резонатора, разработана математическая модель, описывающая поведение стабилизированного по частоте автодина в условиях одновременного воздействия слабого отражённого от объекта излучения и собственных шумов. Основные новые результаты исследований стабилизированных автодинов сводятся к следующим.

4.1. Установлено, что основные параметры стабилизированных автодинов, такие как коэффициенты автодинного усиления и автодетектирования у них практически такие же, как и у обычных (нестабилизированных) автодинов. Кроме того, при величине параметра внешней обратной связи соизмеримой с единицей им также свойственны ангармонические искажения сигналов, как и обычным автодинов.

4.2. При резистивной связи стабилизирующего резонатора с основным рабочим

резонатором, стабилизирующее действие, уменьшающее величину автодинной девиации частоты, проявляется в наибольшей степени при точной настройке стабилизирующего резонатора на частоту генерации автодина. По сравнению с обычным автодином стабилизированный автодинный генератор обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра автодинной СБРЛ, как динамический диапазон. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ. При этом уровни амплитудного шума и шума в цепи смещения снижаются незначительно. Кроме того, часть колебательной мощности активного элемента генератора затрачивается на компенсацию потерь в цепи стабилизации. Поэтому выигрыш в величине энергетического потенциала стабилизированного автодина по сравнению с обычным автодином сравнительно небольшой и составляет на практике 3...5 дБ.

Степень уменьшения девиации частоты стабилизированных автодинов предложено характеризовать *коэффициентом стабилизации*, который показывает во сколько раз величина автодинной девиации частоты исследуемого автодина меньше, чем у обычного автодинного генератора при одном и том же уровне отражённого излучения.

4.3. Установлено, что ангармонические искажения сигналов стабилизированного автодина, которые наблюдаются при увеличении уровня отражённого излучения, в отличие от обычных (одноконтурных) автодинов, прежде всего, обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы. Природа данных искажений состоит в том, что при автодинных изменениях частоты автоколебаний происходит дополнительная модуляция амплитуды генерации на каждом скате частотной характеристики проводимости с удвоенной частотой. Эта модуляция накладывается на естественные автодинные изменения амплитуды, которые обусловлены изменениями фазы отражённой волны.

5. В плане практического применения результатов диссертационной работы выполнен ряд исследований прикладного характера и разработан автодинный радиолокатор, при этом получены новые научные результаты, состоящие в следующем.

5.1. Предложена методика инженерного расчёта дифференциальных параметров используемых в автодинных генераторах активных элементов (диодов Ганна, ЛПД), основанная на применении известных из литературы для этих элементов нормированных аппроксимационных характеристик, учитывающих физическую структуру кристаллов, а также условия генерации (амплитуду и частоту колебаний, параметры смещения).

5.2. Рассмотрены вопросы эффективности применения стабилизированных по частоте

генераторов в автодинных радиолокаторах в условиях их взаимодействия с излучением, отражённым от точечной и поверхностно-распределённой цели.

5.3. Разработан опытный образец автодинного радиолокатора, выполненный на основе стабилизированного по частоте двухдиодного генератора для решения задач определения параметров движения вагонов на сортировочной горке. Показано, что благодаря возможности получения сдвинутых по фазе двух автодинных сигналов, а также значительно меньшей величины автодинной девиации частоты автоколебаний, данные автодины обеспечивают более широкие функциональные возможности при их применении в системах ближней радиолокации, а также улучшение ряда их технических характеристик.

5.4. Точность измерения с помощью автодинных датчиков параметров виброперемещений и динамический диапазон этих измерений возрастают с увеличением уровня отражённого от объекта контроля излучения. При проведении вибрационных измерений в этих условиях необходимо учитывать не только значительные отличия величины чувствительности к виброперемещениям и динамического диапазона из-за ангармонических искажений сигнальных характеристик, но и отличия уровня шума в выбранных для измерений рабочих точках. Особый интерес при этом представляет вариант регистрации автодинного сигнала по изменениям частоты, обеспечивающий стабильность положения рабочей точки и наиболее высокую линейность сигнальной характеристики, хотя техническая реализация этого варианта исполнения датчика представляется наиболее сложной.

5.5. Полученные результаты исследований автодинов в режиме приёма запросного сигнала радиолокатора дали положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности замены свёрхрегенеративного приёмо-передатчика на автодинный в перспективных системах радиозондирования атмосферы.

Рекомендации по итогам диссертационного исследования

Полученные результаты исследований показали преимущества автодинов со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизованными) автодинами и целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, стабилизированных по частоте дополнительным высокочастотным резонатором. При этом в качестве активного элемента перспективных автодинных модулей целесообразно использование не только мезозондовых ганновских структур [17], но и полевых транзисторов, частота генерации опытных образцов которых на сегодня превосходит терагерцовый рубеж, а также предложенных авторами доклада [76] новых активных элементов с управляемой характеристикой, обладающих пониженным

уровнем собственных шумов.

В качестве колебательной системы таких автодинов представляется интересным применение интегрированных с активным элементом автодина высокочастотных резонансных структур, выполненных в виде распределённых брэгговских отражателей [78, 79]. Данная структура, широко используемая в настоящее время в мазерах и лазерах, обеспечивает, с одной стороны, стабилизацию частоты генерации благодаря ее высокой частотной селективности и, с другой стороны, – возможность параметрического “электронного” управления частотой генерации. Благодаря отмеченным здесь свойствам брэгговские резонаторы могут найти применение также в автодинных модулях миллиметрового диапазона для СБРЛ с частотной модуляцией [21], однако вопрос конструкторско-технологического воплощения этой идеи требует своего дополнительного изучения.

Таким образом, результаты диссертационных исследований показали перспективность дальнейших исследований автодинов, стабилизированных по частоте внешним резонатором. Данные перспективы связаны с оптимизацией величины связи с резонатором и нагрузкой для реализации наибольшего энергетического потенциала системы при заданном динамическом диапазоне уровней воздействия отраженного излучения, а также анализом шумовых характеристик с учетом флуктуаций источника смещения. Данные исследования необходимы для разработки инженерных методов расчёта автодинных режимов работы генераторов, дальнейшего улучшения качественных показателей СБРЛ, выполненных на основе автодинов, и расширения области их применения.

Сформулированные выше основные научные и практические результаты настоящей диссертационной работы можно квалифицировать как **решение актуальной задачи** по исследованию гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, в том числе стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором, разработке рекомендаций по созданию перспективных вариантов модулей и их использованию в различных автодинных системах, датчиках и измерителях.

В завершение настоящей работы автор выражает **признательность** научному руководителю, профессору кафедры технологии и средств связи Носкову В.Я. за постоянное внимание к работе, профессору Смольскому С.М. за обсуждение результатов ряда работ, заведующему кафедрой профессору Иванову В.Э. за постановку задачи исследования автодинного модуля приёма-ответчика для аэрологического шара-зонда и всяческую поддержку «автодинного» направления исследований, доценту Кудинову С.И. за помощь в

проведении экспериментов с модулями МРЗ-3 и обсуждение их результатов, а также всем сотрудникам и преподавателям ИРИТ-РТФ УрФУ, принимавшим участие в обсуждении результатов диссертации.

Перечень основных сокращений

АД	Автодин, автодинный генератор
АГ	Автогенератор
АХА	Амплитудная характеристика автодина – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
АЧХ	Амплитудно-частотная характеристика
АЭ	Активный элемент
БР	Блок регистрации (автодинного отклика в цепи питания АЭ)
ГИС	Гибридно-интегральная схема
ДГ	Диод Ганна
КВЧ	Крайне высокие частоты, крайне высокочастотный
КС	Колебательная система
ЛПД	Лавинно-пролётный диод
НИР	Научно-исследовательская работа
СБРЛ	Система ближней радиолокации
СВЧ	Сверхвысокие частоты, сверхвысокочастотный
ФХА	Фазовая характеристика автодина – зависимость набега фазы отражённого ЭМ излучения автодинного генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
ХАД	Характеристика автодетектирования автодина – зависимость изменений автосмещения на АЭ генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
ЧХА	Частотная характеристика автодина – зависимость изменений частота колебаний генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта

Список Основных условных обозначений

α_{01} – безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций амплитуды колебаний;

α_{11} – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла;

β_1 – коэффициент, характеризующий степень связи рабочего резонатора с линией передачи;

β_2 – коэффициент, характеризующий степень связи стабилизирующего резонатора с линией передачи;

β_{11} – параметр, который определяет неизохронность АГ;

γ – коэффициент неизохронности, учитывающий зависимость частоты колебаний генератора от амплитуды колебаний;

Γ – приведённый к «зажимам» генератора коэффициент отражения, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до отражающего объекта и обратно;

$\delta(t, \tau)$ – общее обозначение набега фазы отражённой волны за время τ ;

$\delta(\tau_n)$ – фазовая характеристика АД (ФХА);

$\Delta\omega$ – изменения частоты генерации относительно частоты стационарных колебаний автономного генератора;

$\Delta\omega_m$ – величина автодинной девиации частоты колебаний автодинного генератора;

ω – текущее значение частоты генерации автодинного генератора;

ω_0 – частота генерации автономного генератора;

ΔA – изменения амплитуды A колебаний генератора относительно их стационарных значений A_0 в режиме автономного генератора;

$\Delta f_{\text{эфф}}$ – эффективное значение частотного шума в полосе частот ΔF ;

ΔI_s – изменения выходного сигнала автодина в цепи смещения активного элемента по изменению тока;

ε_{01} – параметр «частотного детектирования», определяющий вклад вариаций частоты генерации в вариации тока питания АЭ;

ε_{11} – параметр, определяющий неизотропность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через проводимость АЭ и (или) параметры КС;

ε_{2n} – параметр нелинейности амплитудной характеристики САД, обусловленной зависимостью резистивной составляющей проводимости колебательной системы от частоты генерации;

ε_{kc} – производная нормированной резистивной проводимости КС по частоте относительной отстройки ν ;

ε_{90} – эксцентриситет эллипса ХАЧ;

ε_{91} – эксцентриситет эллипса АЧХ;

η – КПД колебательной системы;

θ – угол фазового смещения автодинных изменений частоты автоколебаний;

κ_{cm} – коэффициент амплитудно-частотного смещения автодинного отклика по изменению смещения на АЭ;

$\kappa_{чд}$ – коэффициент частотного детектирования автодинных изменений частоты в изменения среднего значения тока активного элемента;

λ – длина волны излучения в свободном пространстве;

ν_{c1} – относительная расстройка текущей частоты относительно собственной частоты первого (рабочего) резонатора в стабилизированном автодине;

ν_{c2} – относительная расстройка текущей частоты относительно частоты второго (стабилизирующего) резонатора в стабилизированном автодине;

ξ_{11} – параметр стабилизации частоты, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости активного элемента, а также колебательной системы генератора;

ξ_{kc} – частотная крутизна реактивной проводимости КС;

ξ_3 – частотная крутизна реактивной проводимости АЭ;

$\Pi_{пр}$ – предельный энергетический потенциал автодина в требуемой полосе частот;

$\Pi_{пр}^{(a)}$ – предельный энергетический потенциал автодина по изменению амплитуды;

$\Pi_{пр}^{(i)}$ – предельный энергетический потенциал автодина при регистрации сигналов в цепи смещения АЭ;

ρ – коэффициент неизотропности, учитывает влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через электронную проводимость АЭ;

- τ – время запаздывания отражённого от объекта излучения;
- τ_a – постоянная времени (время релаксации) автодинного отклика;
- τ_n – нормированное время запаздывания отражённого от объекта излучения;
- ν – относительной отстройки текущей частоты генерации от собственной частоты стабилизирующего резонатора;
- φ – медленно меняющаяся за период колебаний фаза в текущий момент времени;
- χ – относительное изменение автодинного отклика по частоте;
- χ_m – максимальное (амплитудное) относительное автодинное изменение частоты генерации;
- $\chi_n(\tau_n)$ – нормированная относительно максимальных значений частотная характеристика АД (ЧХА);
- $\chi_{\text{шн}}(t)$ – составляющая нормированного (относительного) уровня частотного шума;
- $\Psi(t)$ – полная фаза колебаний в текущий момент времени t ;
- ψ_0 – угол относительного фазового смещения сигнала, регистрируемого в цепи смещения активного элемента;
- $\psi_0^{\text{ст}}$ – угол относительного фазового смещения сигнала, регистрируемого в цепи смещения активного элемента САД;
- ψ_1 – угол относительного фазового смещения автодинных изменений амплитуды колебаний;
- $\psi_1^{\text{ст}}$ – угол относительного фазового смещения автодинных изменений амплитуды колебаний САД;
- Ω_d – частота доплеровского сигнала, полученная от движущегося объекта в свободном пространстве;
- ω – текущая частота колебаний генератора;
- ω_0 – частота стационарных колебаний генератора;
- ω_c – собственная частота колебательной системы;
- ω_{c1} – собственная частота основного рабочего резонатора стабилизированного автодина;
- ω_{c2} – собственная частота стабилизирующего резонатора стабилизированного автодина;
- A – медленно меняющаяся за период колебаний амплитуда в текущий момент времени t ;
- A_0 – амплитуда стационарных колебаний автономного генератора;

- a_{1m} – амплитудное значение автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний;
- $a_c(t)$ – синфазная составляющая уровня амплитудного шума;
- $a_s(t)$ – ортогональная составляющая уровня амплитудного шума;
- $a_n(\tau_n)$ – нормированная относительно максимальных значений амплитудная характеристика автодина (АХА);
- $a_{\text{шн}}(t)$ – составляющая нормированного относительно максимальных значений автодинного отклика уровня амплитудного шума генератора;
- $a_{\text{шэф}}$ – относительный уровень шума амплитуды колебаний;
- $b_{\text{кс}}$ – нормированная реактивная проводимость колебательной системы стабилизированного генератора;
- $B_{\text{кс}}$ – реактивная проводимости КС;
- $B_э$ – реактивная проводимость активного элемента;
- c – скорость распространения электромагнитного СВЧ излучения;
- $C_{\text{ос}}$ – параметр внешней обратной связи автодинной системы;
- d_a – динамического диапазона АД при регистрации сигнала по изменению амплитуды колебаний или в цепи смещения АЭ;
- E – напряжение смещения на АЭ автодинного генератора;
- $G_{\text{кс}}$ – резистивная и реактивная проводимости КС;
- $G_{\text{п}}$ – проводимость собственных потерь резонатора;
- $G_{\text{н}}$ – проводимость нагрузки;
- $G_{\text{п1}}$ – проводимость потерь основного рабочего резонатора;
- $G_{\text{п2}}$ – проводимость потерь дополнительного стабилизирующего резонатора;
- $G_э$ – резистивная проводимости активного элемента;
- $g_{\text{кс}}$ – нормированная резистивная составляющая проводимости колебательной системы стабилизированного автодина;
- $I_э$ – среднее значение тока активного элемента в цепи питания активного элемента;
- I_{30} – потребляемый ток АЭ автономного генератора для стационарного режима;
- i – относительные изменения тока в цепи питания активного элемента;
- $i_c(t)$ – синфазная составляющая нормированного внутреннего шума генератора;

$i_s(t)$ – ортогональная составляющая нормированного внутреннего шума генератора;

i_{0m} – амплитудное значение автодинного отклика при автодетектировании;

$i_{шн}(t)$ – составляющая нормированного относительно максимальных значений автодинного отклика уровня шума в цепи смещения АЭ;

$i_{ш\text{эф}}(\nu)$ – относительный уровень шума среднего значения флуктуаций тока смещения АЭ;

$J_c(t, \tau)$ – амплитуда эквивалентного источника мгновенного тока воздействия собственного отражённого от объекта излучения, которое запаздывает относительно текущего времени;

$j_c(t, \tau)$ – эквивалентный источники мгновенного тока воздействия собственного отражённого от объекта излучения, которое запаздывает относительно текущего времени;

$j_{ш}(t)$ – эквивалентный источники мгновенного тока внутренних шумов генератора;

K_0 – коэффициент автодетектирования автодинного отклика, характеризующий процесс передачи автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний в цепь смещения активного элемента;

$K_{\Gamma a}(Z_n)$ – коэффициент нелинейных искажений автодинного отклика по изменению амплитуды;

$K_{\Gamma \chi}(Z_n)$ – коэффициент нелинейных искажений автодинного отклика автодинного отклика по изменению частоты;

K_a – коэффициент автодинного усиления (амплитудной чувствительности автодина), показывающий во сколько раз амплитуда автодинного отклика превышает амплитуду приходящей к генератору отражённой волны;

$K_a^{ст}$ – коэффициент автодинного усиления САД;

K_n – нормированный коэффициент автодинного усиления;

$K_{сш}$ – коэффициент, характеризующий отношение сигнал/шум автодинных изменений амплитуды;

k_0 – коэффициент автодетектирования изохронного и изодромного автодинного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$;

k_a – коэффициент автодинного усиления изохронного и изодромного автодинного генератора, у которого $\gamma = \rho = 0$;

$k_{ад}$ – коэффициентами автодетектирования амплитудных флуктуаций;

$k_{н0}$ – нормированный относительно k_0 коэффициент автодетектирования реального автодина, у которого $\gamma \neq 0$, $\rho \neq 0$, а также имеет место явление частотного детектирования, когда $\varepsilon_{01} \neq 0$;

$k_{на}$ – нормированный относительно k_a коэффициенты автодинного усиления реального автодина, у которого $\gamma \neq 0$, $\rho \neq 0$, а также имеет место явление частотного детектирования, когда $\varepsilon_{01} \neq 0$;

$k_{чд}$ – коэффициентами автодетектирования частотных флуктуаций;

L_a – коэффициент автодинной девиации частоты генерации;

$L_a^{ст}$ – коэффициент автодинной девиации частоты генерации САД;

L_n – нормированный коэффициент автодинной девиации частоты генерации;

$L_{с/ш}$ – коэффициент, характеризующие отношение сигнал/шум автодинных изменений частоты;

l – расстояние до отражающей поверхности;

l_n – безразмерная величина нормированного по половине длины волны расстояния до отражающего объекта;

$M_{с/ш}$ – коэффициент, характеризующий отношение сигнал/шум автодинных изменений тока в цепи питания активного элемента;

$M_{ш}$ – мера шума активного элемента;

N – целое число полуволн, укладываемых между отражающим объектом и автодином;

$P(t, \tau)$ – выходная мощность на нагрузке генератора в момент времени $t - \tau$;

P_0 – колебательная мощность активного элемента в режиме стационарных колебаний автономного генератора;

$P_c(t, \tau)$ – мощность отраженного от объекта излучения, приходящая в резонатор генератора в момент времени $t - \tau$;

$p_{ш}(t)$ – индекс модуляции фазы, обусловленный частотными шумами автодинного генератора;

Q_n – нагруженная добротность;

$Q_{вн}$ – внешняя добротность колебательной системы;

$Q_{вн1}$ – внешняя добротность рабочего резонатора стабилизированного автодина;

$Q_{н1}$ – нагруженная добротность первого (рабочего) резонатора стабилизированного

автодина;

$Q_{c1,2}$ – собственные добротности первого или второго резонаторов в стабилизированном

автодине;

$q_{\delta}(\tau_n)$ – относительные изменения среднеквадратического уровня фазового шума;

$q_{\chi}(\tau_n)$ – относительные изменения среднеквадратического уровня частотного шума;

$q_a(\tau_n)$ – относительные изменения среднеквадратического уровня амплитудного шума;

$q_{i\pm}(\tau_n)$ – относительные изменения среднеквадратического уровня шумов в цепи смещения АЭ;

q_{kc} – производная нормированной реактивной проводимости КС по частоте относительной отстройки ν ;

S_f – коэффициент стабилизации частоты, обусловленный действием дополнительного стабилизирующего резонатора;

t – текущее время;

Y_{kc} – полная проводимость колебательной системы;

Y_3 – полная проводимость активного элемента;

Основные термины и определения

Автодины, автодинные генераторы – это открытые информационно-измерительные автоколебательные системы, использующие для своего функционирования автодинный эффект. В отличие от обычных генераторов автодины содержат дополнительные средства для выделения (регистрации) автодинного отклика.

Открытая система – это система, доступная к каким-либо физическим (ток или напряжение), параметрическим и (или) информационным внешним воздействиям.

Автодинный эффект – явление изменения параметров автоколебательной системы, таких как амплитуда и частота колебаний, а также ток или напряжение смещения активного элемента генератора, под воздействием излучения, полученного от внешнего стороннего источника или собственного отражённого от объекта исследований.

Автодинный отклик – реакция автогенератора в виде автодинного эффекта на воздействие излучения, полученного от внешнего стороннего источника или собственного отражённого от объекта исследований.

Изохронный (isochronic – от греческого isos – одинаковый, равный и chronos – время) **генератор** – автогенератор, у которого частота колебаний не зависит от изменений амплитуды генерации. **Неизохронный генератор** предполагает наличие данной зависимости. Характеризуется **коэффициентом неизохронности**.

Изодромный (isodromic – от греческого isos – одинаковый, равный и dromos – бег) **генератор** – автогенератор, у которого амплитуда колебаний не зависит от изменений частоты генерации. **Неизодромный генератор** предполагает наличие данной зависимости. Характеризуется **коэффициентом неизодромности**.

Коэффициент внутренней обратной связи автодина – коэффициент, определяемый как произведение коэффициентов неизохронности и неизодромности, который показывает степень внутренней устойчивости автодинного генератора при условии одинаковых знаков при данных коэффициентах.

Коэффициент внешней обратной связи автодина – коэффициент, определяемый как произведение величины автодинной девиации частоты колебаний на время запаздывания отражённого от объекта излучения.

Коэффициент автодинного усиления – коэффициент, который показывает, во сколько раз амплитуда автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний превышает амплитуду приходящего в резонатор генератора излучения; синоним этого термина – **коэффициент амплитудной чувствительности автодина**.

Коэффициент автодинной девиации частоты – коэффициент, который показывает степень влияния на амплитуду автодинных изменений частоты колебаний генератора воздействия приходящего в его резонатор излучения; синоним этого термина – **коэффициент частотной чувствительности автодина**.

Коэффициент автодетектирования – коэффициент, который показывает степень преобразования амплитудных значений автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний в амплитудные значения изменений тока или напряжения смещения активного элемента генератора. Соответственно характеризуется дополнительными **коэффициентами амплитудного и частотного автодетектирования**.

Амплитудная характеристика автодина (АХА) – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Частотная характеристика автодина (ЧХА) – зависимость изменений частоты колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Характеристика автодетектирования автодина (ХАД) – зависимость изменений сигнала автодетектирования в цепи смещения активного элемента генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Амплитудно-частотная характеристика автодина (АЧХ) – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от изменений частоты автоколебаний при изменении времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Автодетекторно-частотная характеристика автодина (АДХ) – зависимость изменений сигнала автодетектирования в цепи смещения активного элемента генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от изменений частоты автоколебаний при изменении времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Список литературы

1. Коган И.М. Ближняя радиолокация (теоретические основы). М.: Сов. радио. 1973. 272 с.
2. Хотунцев Ю.Л., Тамарчак Д.Я. Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь. 1982.
3. Богачёв В.М., Лысенко В.Г., Смольский С.М. Транзисторные генераторы и автодины / Под ред. В.М. Богачёва. М.: Изд. МЭИ. 1993.
4. Komarov I.V., Smolskiy S.M. Fundamentals of short-range FM radar. Norwood: Artech House, 2003. 289 p.
5. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2003.
6. Комаров И.В., Смольский С.М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. М.: Горячая линия. Телеком. 2010.
7. Носков В.Я., Смольский С.М. Сто лет автодину: исторический очерк основных этапов и направлений развития автодинных систем // Радиотехника. 2013. № 8. С. 91–101.
8. New direction-of-motion Doppler detector / M.J. Lazarus, F P. Pantoja, M. Somekh at all // Electron. Lett. 1980. V. 16, №25. P. 953–954.
9. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах / Е.М. Гершензон, Б.Н. Туманов, В.Т. Бузыкин и др. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 1. С.104–112.
10. Воторопин С.Д., Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. О принципиальной невозможности самосинхронизации автодина излучением, отражённым от движущегося объекта // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50, № 9. С. 53 – 59.
11. Перегонов С.А. Перспективы массового применения СВЧ-устройств // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 1987. № 9. С. 55–59.
12. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Харьков: ИРЭ АН Украины, 1991. С. 38–47.
13. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Приёмопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 1993. № 4. С. 70–72.
14. Патент 2064718 (РФ). Диод Ганна (Заявлено 04.06.1992) / С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, А.М. Кожемякин.

15. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. 1998. № 1–2. С. 110–115.
16. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Ча В.А. Гибридно-интегральные автодинные датчики на мезапланарных диодах Ганна для систем ближней радиолокации // 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2007. С. 741–743.
17. Воторопин С.Д. Расчёт и создание гибридно-интегральных схем миллиметрового диапазона длин волн на многomezовых диодах Ганна. Диссертация канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский госуниверситет. 2002. 243 с.
18. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7. С. 3–33.
19. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 3. Функциональные особенности автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 11. С. 25–49.
20. Носков В.Я., Смольский С.М. Автодинный эффект в генераторах с амплитудной модуляцией // Радиотехника. 2011. № 2. С. 21–36.
21. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 3. С. 3–50.
22. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 3–51.
23. Носков В.Я., Воторопин С.Д., Зайцев О.И. Автодинный тахометр 5-и миллиметрового диапазона волн // 5-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 1995. С. 561–562.
24. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Применение автодинов на ММПГС в транспортной электронике при контроле тормозной системы. Электронная промышленность. 2002. № 1. С. 140–143.
25. Юрченко А.В., Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Установка для визуализации и

- определения мест расположений дефектов в солнечных элементах на основе автодинных датчиков 5-мм диапазона длин волн // 8-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 1998. С. 134.
26. Данилин А.И., Воторопин С.Д., Чернявский А.Ж. Использование автодинных приёмопередающих модулей на диодах Ганна для определения предаварийных деформаций лопаток турбомашин // 11-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2001. С. 654–656.
 27. Лушев В.П., Воторопин С.Д., Дерябин Ю.Н. и др. Автодинные СВЧ датчики перемещения для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2005. С. 831–833.
 28. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. О влиянии неизотропности СВЧ генераторов на их автодинные характеристики // Сборник докладов XVII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2008). Т. 2. Воронеж, 2011. С. 1595–1607.
 29. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–42.
 30. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Амплитудно-частотные характеристики автодинных СВЧ генераторов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2011. № 4 (511). С. 17–31.
 31. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 12. С. 112–124.
 32. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 7. – Динамика формирования автодинных и модуляционных характеристик // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 3–52.
 33. Отчёт о НИР. Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона. Часть 1. Исследование одноконтурных и стабилизированных по частоте автодинных модулей / Науч. рук. В.Э. Иванов, отв. исп. В.Я. Носков. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 103 с. Номер гос. рег. 01201450593.
 34. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. V. 72, № 16. P. 1521–1536.
 35. Игнатков К.А. Расчет дифференциальных и эквивалентных параметров автодинных генераторов на основе аппроксимационных характеристик диодов Ганна // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные

- технологии». Севастополь: Вебер, 2014. С. 992–993.
36. Носков В.Я., Игнатков К.А. О природе периодической нестационарности шумов в автодинных СВЧ генераторах // Физика и технические приложения волновых процессов: XI Международная науч.-техн. конф. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. С. 133–135.
 37. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ шумовых характеристик автодинных СВЧ-датчиков малых перемещений // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1046–1048.
 38. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Влияние расстройки резонатора на автодинные характеристики стабилизированных СВЧ генераторов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54, № 11. С. 45–60.
 39. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Экспериментальные исследования автодинных модулей на меза-планарных диодах Ганна КВЧ диапазона // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2012. № 2 (513). С. 17–36.
 40. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 3–42.
 41. Игнатков К.А., Носков В.Я., Смольский С.М. Исследования особенностей автодинных сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // Радиовысотометрия-2010: Сб. трудов III ВНТК. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2010. С. 144–149.
 42. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Результаты экспериментальных исследований автодинных СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 979–982.
 43. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Analysis of signals of stabilized autodynes // Telecommunication Sciences. 2011. V. 2, № 1. P. 5–16.
 44. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Нелинейные искажения сигналов в стабилизированных автодинных СВЧ генераторах // Приборы и техника СВЧ. 2011. № 1. С. 31–39.
 45. Носков В.Я., Игнатков К.А. Влияние внутренних параметров СВЧ генераторов, стабилизированных внешним высокочастотным резонатором, на их шумовые характеристики // Радиовысотометрия-2013: Сб. трудов IV ВНТК. Екатеринбург: Форт

- Диалог-Исеть, 2013. С. 146–150.
46. Игнатков К.А., Носков В.Я., Черных О.А. Исследования сигналов автодинного радиолокатора с применением платформы сбора данных сDAQ-9172 в среде программирования LabView // 10-я Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2010». Москва: Российский Университет Дружбы Народов, 2010. С. 480–482.
 47. Ermak G.P., Popov I.V., Vasilev A.S., Varavin A.V., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications // Telecommunication and Radio Engineering. 2012. V. 71, № 6. P. 567–580.
 48. Носков В.Я., Игнатков К.А. Применение стабилизированного двухдиодного автодина в радиолокационном датчике для сортировочных горок // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 893–896.
 49. Носков В.Я., Иванов В.Э., Игнатков К.А., Кудинов С.И. Теоретические обоснования автодинного метода формирования ответного сигнала радиозонда по дальности // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 897–899.
 50. Кудинов С.И., Иванов В.Э., Носков В.Я., Игнатков К.А. Экспериментальные исследования автодинного режима приёма-передающего устройства радиозонда МРЗ-ЗМК // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 900–902.
 51. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы / В.Э. Иванов, А.В. Гусев, К.А. Игнатков, С.И. Кудинов, В.Я. Носков, О.В. Плохих // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 3–12.
 52. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ искажений сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1042–1045.
 53. Носков В.Я., Игнатков К.А. Экспериментальные исследования сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1049–1050.
 54. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Особенности применений двухконтурных генераторов в автодинных радиолокаторах // 21-я Международная Крымская конференция

- «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 955–958.
55. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Эффективность использования стабилизированных СВЧ генераторов в автодинных радиолокаторах // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 983–985.
 56. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Особенности автодинных сигналов стабилизированных СВЧ генераторов // Физика и технические приложения волновых процессов: 10-я Междун. научно-техническая конф. Самара: ООО «Книга», 2011. С. 116–118.
 57. Микроэлектронные устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин и др. Киев: Техника, 1984. 184 с.
 58. Устройства КВЧ диапазона на основе диэлектрических волноводов / С.В. Кошечая, М.В. Кононов, А.Ю. Котомчак и др. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33, № 10. С. 3–11.
 59. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 1. Конструкторско-технологические достижения // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 12. С.3–30.
 60. Патент 4255730 (США). Microwave integrated circuit device (приор. 24.10.1978) / Kenji Sekine, Yoichi Kaneko.
 61. Патент 4251817 (США). Microwave integrated circuit device for transmission/reception of a signal (приор. 20.10.1978) / Katsuhiko Kimura, Akira Endo, Kenji Sekine, Takahiko Tanigami, Yoichi Kaneko.
 62. Патент 4319244 (США). Short-range doppler radar (приор. 22.01.1979) / Yukitsugu Hirota, Yoichi Kaneko, Kenji Sekine, Akira Endo, Katsuhiko Kimura
 63. Патент 7154432 (США). Radar sensor (приор. 26.04.2002) / Toshiyuki Nagasaku, Hiroshi Kondoh, Hiroshi Shinoda.
 64. Active Integrated Antennas /Kai Chang, Robert A. York, Peter S. Hall, Tatsuo Itoh // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. V. MTT-50. No. 3. P. 937–944.
 65. Гибридно-интегральный генератор Ганна миллиметрового диапазона длин волн / А.М. Алесин, А.И. Забышный, Л.С. Назаренко и др. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21, № 10. С. 121–122.
 66. Авт. свид. 1107258 (СССР). Генератор СВЧ (Приор. 10.01.1983.) / В.Я. Баржин, А.З.

- Венгер, Н.И. Гаврилова, Ю.В. Жилин.
67. Проектирование колебательной системы генератора миллиметрового диапазона длин волн / А.В. Бунин, С.В. Вишняков, В.М. Геворкян, Ю.А. Казанцев // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2005. С. 465–466.
 68. Nanbu S. A new MIC Doppler module // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1978. V. MTT-26, No. 3. P. 192–196.
 69. Патент 4219779 (США). Self-oscillating mixer circuit (приор. 17.04.1978) / К. Shinkawa, Н. Shoyama, С. Sodeyama, М. Shinagawa.
 70. Khenna A., Garault Y. Determination of loaded, unloaded, and external quality factors of a dielectric resonator coupled to a microstrip line // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1983. V. MTT-31, No. 3. P. 261–264.
 71. Половков И.П. Стабилизация частоты генераторов СВЧ внешним объёмным резонатором. М.: Советское радио, 1967. 185 с
 72. Кохияма К., Момма К. Новый тип ганновского генератора со стабилизацией частоты // ТИИЭР. 1971. Т. 24, № 10. С. 185–186.
 73. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов. Дисс. доктора технических наук. М.: МЭИ (ТУ). 2004. 416 с.
 74. Стабилизированные и высокостабильные полупроводниковые СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах / И.И. Бродуленко, А.И. Абраменков, Д.А. Ковтунов и др. // Обзоры по электр. технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. № 10. С. 1–20.
 75. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Автодинные ГИС КВЧ на основе многомезовых планарных диодов Ганна // 14-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2004. С. 124 – 127.
 76. Воторопин С.Д., Хан А.В. Прибор на основе эффекта междолинного переноса электронов // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2008. С. 92–97.
 77. Патент 2361324 (РФ). Полупроводниковый прибор с междолинным переносом электронов (Заявлено 15.02.2008) / А.В. Хан, С.Д. Воторопин, В.А. Хан, Л.П. Прохоровниченко.
 78. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 1979. V. MTT-27, № 12. P. 1019–1022.
 79. Барташевский Е.Л., Борулько В.Ф., Иванилов В.Е., Тимофеев С.В. Исследование генераторно-излучающих модулей на зеркальном диэлектрическом волноводе с брэгговским резонатором // Радиотехника. 1992. № 5-6. С. 81–85.

80. Shiroma G.S., Miyamoto R.Y., Shiroma W.A. A 16-Element Two-Dimensional Active Self-Steering Array Using Self-Oscillating Mixers // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 2003. V. MTT-51, № 12. P. 2476–2482.
81. Chang K., York R.A., Hall P.S., Itoh T. Active Integrated Antennas // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 2002. V. MTT-50, № 3. P. 937–944.
82. Физические основы создания интегральных схем миллиметрового диапазона длин волн (Обзор) / Б.Н. Емельяненко, С.В. Кошечая, Л.Г. Гассанов, М.Ю. Омеляненко // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1982. Т. 25, № 10. С. 5–14.
83. Интегральные схемы миллиметрового диапазона длин волн (Обзор) / Б.Н. Емельяненко, С.В. Кошечая, Л.Г. Гассанов, М.Ю. Омеляненко // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1982. Т. 25, № 10. С. 14–31.
84. Берштейн И.Л. Об одной схеме с автомодуляцией // Радиотехника. 1946. Т. 1, № 9. С. 63–66.
85. Терещенко А.Ф. Чувствительность автодинного генератора на лавинно-пролётном диоде // Радиотехника. 1978. Т. 33, № 2. С. 108–109.
86. Носков В.Я. Анализ автодинного эффекта в СВЧ генераторах с цепью автосмещения первого порядка // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 1992. № 6. С. 24–30.
87. Носков В.Я. Динамические особенности автодинного отклика СВЧ генератора // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1992. Т. 35, № 9. С. 9–16
88. Туманов Б.Н., Закарлюк Н.М. Фазовые портреты и особенности автоколебаний автодина на диоде Ганна // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ. 1985. №10. С. 6–13.
89. Терещенко А.Ф. О воздействии отражённого сигнала на магнетронный генератор // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. 1965. № 1. С. 139–148.
90. Direct frequency demodulation with CW Gunn and IMPATT oscillators / P.R. Bestwick, P.S. Drinan, G.S. Hobson, et. al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1973. V. SC-8, № 1. P. 37–43.
91. Малышев В.А., Роздобудько В.В. Использование затягивания частоты и мощности автогенератора СВЧ внешней нагрузкой для измерения параметров нелинейности его электронной проводимости // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1977. Т. 20, № 1. С. 45–51.
92. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Автодинные характеристики СВЧ генераторов на полупроводниковых диодах // Электронная техника. Серия. СВЧ-техника. 1992. № 7. С. 9–14.
93. Kurokawa K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators // Proceedings of the

- IEEE. 1973. V. 61, № 10. P. 1386–1410.
94. Голант М.Б., Бобровский Ю.Л. Генераторы СВЧ малой мощности. Вопросы оптимизации параметров. М.: Советское радио, 1977. 336 с.
 95. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. 2. Электровакуумные приборы СВЧ / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1972. 376 с.
 96. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Советское радио, 1967. 216 с.
 97. Nygren T., Sjolund A. Sensitivity of Doppler Radar with Self-Detecting Diode Oscillators // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 1974. V. MTT-22, № 5. P. 494–498.
 98. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-Variation Detector Characteristics of a Detector-Diode Loaded Gunn Oscillator // Electronics and Communications in Japan. 1975. V. 58-B, № 5. P. 60–66.
 99. Кузнецов О.В. Исследование автодина на лавинно-пролётном диоде. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1979. № 7. С. 52–57.
 100. Дубинин В.С., Терещенко А.Ф. Потенциальные энергетические возможности автодинных генераторов // Электроника СВЧ. Твердотельная электроника СВЧ.: Тезисы докладов. Минск. 1983. Т.2. С. 111–112.
 101. Терещенко А.Ф. Инженерный метод расчёта энергетических характеристик автодинов // Радиотехника. 1986. № 9. С. 93–94.
 102. Huntoon R.D., Miller B.J. Generator-powered proximity fuze // Electronics. 1945. № 12. P. 98–103.
 103. Page C.H. and Astin A.V. Survey of Proximity Fuze Development // American Journal of Physics. 1947. Vol. 15, № 2. P. 95–110.
 104. Alidoost S.A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne System with a Single Antenna // 11-th International Radar Symposium (IRS 2010). Conference Proceedings (Vilnius, Lithuania 16-18 June 2010). Vilnius: Geozondas LTD, 2010. V. 2. P. 406–409.
 105. Туманов Б.Н., Бузыкин В.Т. Особенности автоколебаний в автодинных генераторах СВЧ // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ. 1983. № 2. С. 3–9.
 106. Гершензон Е.М., Путилов П.А. Исследование трёхрезонаторной автодинной системы СВЧ // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 1. С. 137–145.
 107. Овчаренко Л.А. Анализ СВЧ автодинного измерительного преобразователя для контроля плёночных материалов электроники // Радиотехника (Харьков). 1985. № 73. С. 126–131.
 108. Носков В.Я. Анализ автодинного СВЧ датчика для бесконтактного измерения и контроля размеров изделий // Измерительная техника. 1992. № 3. С. 24–26.

109. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Determination of Autodyne Oscillator Parameters by the Beating Method // Telecommunication Sciences. 2012. V. 3, № 1. P. 35–45.
110. Носков В.Я., Игнатков К.А. Основные уравнения для исследования переходных процессов в автодинном генераторе и анализ его устойчивости // Физика и технические приложения волновых процессов: XI Международная науч.-техн. конф. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. С. 119–121.
111. Носков В.Я., Смольский С.М. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов на полупроводниковых диодах СВЧ (Обзор) // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 1. С. 14–26.
112. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер. 2006. 319 с.
113. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn Diode Oscillator with a Moving Reflector as a Self-Excited Mixer and a Load Variation Detector // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 1971. V. MTT-19, № 12. P. 906–910.
114. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators // IEEE Transactions on Microwave Theory Technique. 1973. V. MTT-21, № 2. P. 89–94.
115. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. 1. Техника сверхвысоких частот / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
116. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1974. 832 с.
117. Суит. Обобщённый анализ шумов генераторов Ганна // ТИИЭР. 1972. Т. 60, № 8. С. 89–91.
118. Шаповалов А.С. Исследование особенностей трансформации флуктуаций в радиоэлектронных системах СВЧ с повышенным уровнем собственных шумов. Дисс. на соиск. степени доктора физ.-мат. наук. Саратов: СГУ, 2002. 686 с.
119. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. М.: Советское радио. 1961. 559 с.
120. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968. 660 с.
121. Строганова Е.П., Иванов Е.Н., Царапкин Д.П. СВЧ генератор комбинационных частот // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1981. Т. 24, № 10. С. 69–72.
122. Веницкий А.С. Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн. М.: Советское радио. 1961. 495 с.
123. Пат. 2977590 (США). Method of testing a proximity fuze (12.02.1953) / R.C. Lovick.
124. Пат. 3329953 (США). Doppler target simulator (15.06.1966) / E.C. Adans, L. Michnik, R.D. Witulski.

125. New moving target simulators for Doppler radar / M.J. Lazarus, F.P. Pantoja, M. Somekh // *Electronics Letters*. 1981. V. 17, № 1. P. 48–49.
126. Терещенко А.Ф. Воздействие на автогенератор малых сигналов, модулированных по амплитуде, частоте и фазе // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая*. 1967. № 7. С. 62–67.
127. Кузнецов О.В., Струков И.А. Нагрузочно-шумовые характеристики автодина на ЛПД // *Радиотехника*. 1980. Т. 35, № 8. С. 56–58.
128. Бугаёв А.В., Касаткин Л.В., Маев К.А. Нагрузочные характеристики ГЛПД. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1975. № 6. С. 14–26.
129. Андреев В.С., Фёдоров Ф.Я. Об эквивалентной схеме и характеристиках генераторов СВЧ с дополнительной обратной связью // *Радиотехника*. 1982. Т. 37, № 11. С. 48–51.
130. Минаев М.И. Генераторы СВЧ с внешней дополнительной обратной связью. Минск: Выща школа. 1984. 286 с.
131. Suarez A., Ramirez F. Analysis of Stabilization Circuits for Phase-Noise Reduction in Microwave Oscillators // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005. V. MTT-53, No. 9. P. 2743–2751.
132. Geng T., Li G., Zhang Y., Wang J., Zhang T. Phase noise of diode laser in self-mixing interference // *Optical Society of America. Optics Express*. 2005. V. 12, No. 16. P. 5904–5912.
133. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Применение внешней синхронизации для исследования внутренних свойств СВЧ генераторов по их автодинным характеристикам // *Известия вузов. Физика*. 2008. Т. 51, № 9/2. С. 159–163.
134. Бузыкин В.Т., Воторопин С.Д., Клюев А.Ю. Носков В.Я. Исследование электронной проводимости диодов Ганна по автодинному эффекту // *Современная технология производства СВЧ схем. Материалы семинара*. Минск: МРТИ, 1989. С. 73–74.
135. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Применение автодинного эффекта в СВЧ-генераторах для изучения их радиофизических свойств // *16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. Севастополь: Вебер, 2006. С. 150–152.
136. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Б.А. Наливайко, А.С. Берлин, В.Г. Божков и др. Томск: МГП «Раско», 1992. 223 с.
137. Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. Бортовые автодинные датчики скорости для аэробаллистических испытаний // *20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. Севастополь: Вебер. 2010. С. 1065–1068.
138. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Перспективы развития горочной автоматики с применением

- автодинных скоростемеров и дальномеров // Решение оптимизационных задач в АСУ технологическими процессами сортировочной станции / Под ред. Л.Г. Аверьянова, Б.А. Игнатова. М.: Транспорт. 1990. С. 87–108.
139. Носков В.Я. Автодинный измеритель параметров движения отцепов на сортировочной горке // Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сборник научных трудов. Харьков: ИРЭ АН Украины. 1992. С. 66–74.
140. Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. Автодинные датчики для железнодорожных переездов // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2010. С. 1072–1076.
141. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / Под ред. В.Э.Иванова. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 606 с.