

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор, проректор по научной работе
Московского государственного технического
университета им Н.Э. Баумана,
д.т.н., профессор



В.Н. Зимин

2014 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Московского государственного технического университета им Н.Э. Баумана на диссертационную работу Игнаткова Кирилла Александровича «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Тема диссертационной работы является актуальной. Это подтверждается повышенным интересом разработчиков радиоэлектронной аппаратуры КВЧ диапазона к созданию активных гибридно-интегральных схем для приёмо-передатчиков, которые предназначаются для систем ближней радиолокации, связи, радионавигации и изделий специального назначения. Разработка и применение генераторных модулей в гибридно-интегральном исполнении позволяет реализовать такие их преимущества перед волноводными аналогами, как малый вес, высокая технологичность и низкая стоимость. Актуальность темы диссертации определяется также и недостаточным теоретическим и экспериментальным исследованием автодинного режима работы генераторных гибридно-интегральных схем КВЧ диапазона. Такое положение объясняется отсутствием достаточно простых моделей, наиболее адекватно описывающих наблюдаемые экспериментально явления в гибридно-интегральных автодинах.

Диссертационная работа Игнаткова К.А. посвящена теоретическим исследованиям автодинов КВЧ диапазона, результаты которых были апробированы на примере серийно выпускаемых гибридно-интегральных модулей «Тигель-08» КВЧ диапазона, выполненных на основе планарных диодов Ганна. Исследован также модернизированный вариант этих модулей, в котором добавлен стабилизирующий высокочастотный резонатор. Выполнена разработка опытных образцов автодинного радиолокатора для сортировочной горки и автодинного датчика вибраций. Результаты диссертационной работы особенно важны для создания систем ближней локации и техники специального назначения.

2. СВЯЗЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ С ПЛАНАМИ ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Исследования, представленные в диссертационной работе, непосредственно связаны с решением задач изучения параметров и характеристик гибридно-интегральных модулей КВЧ диапазона типа «Тигель», выпускаемых в ОАО «НИИПП», а также созданием перспективных модулей с улучшенными параметрами и характеристиками. Данные исследования выполнены в соответствии с Программой развития Уральского федерального университета (УрФУ, г. Екатеринбург), а также Договором о научно-техническом сотрудничестве с ОАО «НИИПП» (г. Томск). Результаты данных исследований необходимы для правильного использования серийных модулей в различных системах, а также для расширения области их применения и рынка потребителей.

Результаты работы, связанные с исследованием возможности замены сверхрегенеративного приёмно-ответчика системы радиозондирования атмосферы на автодинный, получены в ходе выполнения договора «Создание и производство технических средств радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС с целью модернизации технологической базы аэрологической сети Росгидромета» и НИОКР «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета». Проведение этих работ осуществлялось 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.

Разработка опытного образца автодинного радиолокатора для решения задач сортировочной станции выполнена в ходе решения задач 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»).

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и 3-х Приложений. Общий объём диссертации 168 страниц текста в том числе: 61 рисунок и 3 таблицы. Библиографический список включает 141 наименование.

Во введении дана общая характеристика диссертации, представлено состояние исследуемого вопроса, сформулированы цели и задачи диссертации, выносимые на защиту положения и основные результаты, обоснована их достоверность, раскрыта научная новизна и прикладная ценность полученных результатов, дана информация о внедрении разработок, приведены сведения об апробации результатов и личном вкладе диссертанта.

В первой главе рассмотрено состояние разработок гибридно-интегральных схем генераторов СВЧ и КВЧ диапазонов, проведён обзор существующих методов анализа одноконтурных автодинов, а также автодинов со стабилизацией частоты дополнительным внешним резонатором. Сформулированы основные задачи на дальнейшие исследования автодинов.

Во второй главе представлены результаты исследований автодинных параметров и характеристик СВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний. Исследование проведено на основе упрощённой модели гибридно-интегральной схемы КВЧ, использующей в качестве активного элемента двухмезовые кристаллы с планарными диодами Ганна, в виде одноконтурной схемы генератора с активным нелинейным элементом, имеющим мгновенную вольт-амперную характеристику N -типа с гистерезисом. В разработанной модели процесс взаимодействия КВЧ генератора с собственным отражённым от объекта излучением учитывает также внутренние шумы активного элемента. На основе этих уравнений проведен анализ устойчивости автодинной системы «генератор – отражающий объект», исследовано влияния на основные параметры автодина внутренних свойств автогенератора. Выполнен расчёт и анализ автодинных характеристик для различных значений внутренних параметров генератора и внешних условий, показан спектр автодинного отклика, а также рассмотрен вопрос применения амплитудно-частотных характеристик для анализа особенностей автоколебаний автодина и решения обратной задачи – расчёта его внутренних параметров по автодинным характеристикам.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследований шумовых параметров и характеристик КВЧ автодинных генераторов. Установлены основные зависимости этих параметров и характеристик от внутренних свойств одноконтурных автодинных генераторов. Для этого на базе полученных в предыдущей главе общих уравнений, в данной главе получены соотношения для анализа шумовых параметров и характеристик автодинов. На основе этих выражений 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 среднеквадратического уровня шумов выходного сигнала. Полученные результаты расчёта шумовых параметров позволили определить динамический диапазон автодинов.

В четвёртой главе представлены результаты теоретических исследований автодинных параметров и характеристик КВЧ генераторов, стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором. Для этого в первом разделе получены основные уравнения, описывающие процесс взаимодействия стабилизированного автодина с собственным отражённым от объекта излучением с учётом внутренних шумов активного элемента. На основе этих уравнений далее проведен анализ автодинных характеристик при условии точной настройки резонатора, а также рассмотрено влияние расстройки резонаторов на автодинные параметры и характеристики. В четвёртом разделе рассмотрен вопрос о причинах появления ангармонических искажений сигнала при увеличении уровня отражённого излучения. На основе полученных общих уравнений в пятом разделе рассмотрены шумовые параметры стабилизированного автономного генератора, а в разделе шесть выполнен анализ одновременно автодинных и шумовых характеристик стабилизированных автодинов. Полученные результаты расчёта шумовых параметров позволили определить выигрыш в динамическом диапазоне благодаря применению стабилизации частоты внешним резонатором.

В пятой главе обобщены результаты экспериментальных исследований обычных и стабилизированных по частоте автодинных модулей «Тигель-08М». В первом разделе дано описание экспериментального стенда, предназначенного для изучения автодинов. В последующих разделах представлены результаты экспериментальных исследований автодинных параметров и характеристик обычных автодинных модулей и, далее, исследованы характеристики стабилизированных по частоте модулей. В заключительных разделах этой главы рассмотрены особенности сигналов при наличии «нелинейности по амплитуде», а также сопоставлены шумовые параметры и характеристики обычных и стабилизированных автодинных модулей.

В шестой главе приведено описание примеров, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований и при этом также получены новые научные результаты. В первом разделе рассмотрены методы расчёта основных параметров и характеристик автодинных СВЧ и КВЧ генераторов. В следующем разделе выполнен анализ эффективности применения стабилизированных по частоте генераторов в автодинных радиолокаторах, а в третьем разделе дано описание конструкции, принципа действия и результатов натурных испытаний опытного образца радиолокатора для сортировочной горки. В разделе четыре рассмотрены особенности формирования и обработки сигналов автодинного генератора при использовании его как датчика вибраций. В пятом разделе представлены результаты исследований автодинного режима работы СВЧ модуля серийного радиозонда МРЗ-ЗМК.

В Заключении подводятся итоги проведённых исследований, сформулированы основные рекомендации для разработчиков автодинных модулей и их пользователей.

4. НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научной новизной обладают следующие результаты работы.

4.1. Показано, что при анализе математической модели автодина КВЧ диапазона одновременный учёт неизохронности и неизодромности генератора эквивалентен наличию в автодинной системе внутренней обратной связи. Установлено, что данная обратная связь в модели автодина оказывает влияние на условия устойчивости автодинной системы, основные параметры (коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования) и особенности формирования сигнальных характеристик.

4.2. Разработана математическая модель автодинной системы КВЧ диапазона, которая учитывает одновременное воздействие на генератор отражённого от объекта излучения и соб-

ственных шумов. Установлены основные закономерности формирования автодинных и шумовых характеристик при различных внешних условиях. Дано объяснение экспериментально наблюдающейся периодической нестационарности уровня шумов при сильной внешней обратной связи. Получены соотношения для расчёта энергетического потенциала и динамического диапазона автодинных систем.

4.3. Получены основные соотношения для анализа автодинного эффекта в генераторе, стабилизированном по частоте внешним высокочастотным резонатором. Проведено рассмотрение круга вопросов, связанных с особенностями определения параметров и формирования автодинных и шумовых характеристик стабилизированных по частоте автодинов. Сформулированы основные рекомендации по созданию новых модулей КВЧ диапазона с улучшенными характеристиками и более широкими функциональными возможностями.

4.4. Найдены решения ряда прикладных задач, в которых нашли применение результаты диссертационных исследований:

— Предложена методика расчёта параметров и характеристик автодинных генераторов СВЧ и КВЧ диапазонов, выполненных на диодах Ганна.

— Выполнен анализ эффективности применения стабилизированных по частоте автодинов в системах ближней радиолокации.

— Разработан опытный образец автодинного радиолокатора для измерения параметров движения вагонов на парковых путях сортировочной станции.

— Исследованы нелинейные искажения сигналов и шумовые характеристики автодинных датчиков вибраций и сделаны рекомендации по их правильному использованию.

— Показана применимость автодинного генератора в качестве бортового приёмно-ответчика для аэрологических радиозондов.

5. СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ, ЗАКЛЮЧЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Достоверность и обоснованность защищаемых положений и результатов обеспечивается качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, корректностью допущений, 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, а полученные экспериментальные результаты и выводы из них имеют физическое толкование.

Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях, а также публикациями в рецензируемых журналах.

6. ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

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 (нестабильных) 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 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 защищаемых положений и результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем.

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 числа 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, чем известные ранее из литературы.

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.

7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать на предприятиях и в организациях, занимающихся применением, разработкой и выпуском радиотехнических систем и комплексов ближней локации. Среди них наибольший интерес могут проявлять те из них, которые используют устройства КВЧ диапазона: ОАО «УПКБ «Деталь» (г. Каменск Уральский), ОАО «НИИПП» (г. Томск), и ОАО «НИИЭП» (г. Новосибирск), ОАО «НПП «Исток» им. Шо-

кина», (г. Фрязино Московской обл.), ГНПП «Дельта» и ОАО «Импульс» (г. Москва), а также другие организации и предприятия.

8. КРИТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К критическим замечаниям следует отнести недостаточное обоснование исходной модели автодинного генератора с одноконтурной колебательной системой. Данное обоснование следовало начать с анализа электродинамических свойств щелевого резонатора, выполняющего одновременно роль излучателя в волноводном канале модуля. Кроме того, в эквивалентной схеме двухмезового диода Ганна не учтены его паразитные элементы, которые обычно представляют при анализе в виде индуктивности выводов и ёмкости корпуса.

Обзор литературы по гибридно-интегральным модулям СВЧ и КВЧ диапазонов недостаточно полный. В нём оказались неупомянутыми ряд новых (2013 г.) патентов авторов из Японии по генераторно-излучающим модулям в интегральном исполнении (см., например, патенты US 8380140, US 8411613). Данные модули рассчитаны на широкий спектр применений в системах связи и ближней радиолокации, обеспечивая их работу также в автодинном режиме.

Выводы по диссертации перегружены подробностями, затрудняющими выделение положений, выносимых на защиту.

Однако эти недостатки не снижают ценности диссертационной работы.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Диссертация Игнаткова Кирилла Александровича представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, содержащую новое научно обоснованное решение важной научно-технической задачи исследования автодинных модулей КВЧ диапазона.

Научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики автодинных систем КВЧ диапазона, широко апробированы и внедрены. Содержание диссертационной работы полностью отражено в 28 печатных работах, среди которых 7 статей в рецензируемых журналах из списка рекомендуемых ВАК, 4 статьи в иных журналах, 17 докладов на конференциях, в том числе 15 – на конференциях с международным участием, один отчёт о НИР. Содержание автореферата правильно отражает содержание материалов диссертации.

Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям (см. пункт 9), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании научно-технического семинара кафедры СМ-5 «Автономные информационные и управляющие системы» «14» ноября 2014 г., протокол № 3.

Заведующий кафедрой СМ-5 «Автономные информационные и управляющие системы», член корреспондент РАН (Российская академия ракетных и артиллерийских наук), заместитель директора научно-исследовательского института специального машиностроения, лауреат премии Мосина в 2011 г., доктор технических наук, профессор

Борзов А.Б.

Заместитель заведующего кафедрой СМ-5, руководитель отдела «Системы ближней локации» НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана, доктор технических наук, профессор

Лихоеденко К.П.

Доцент кафедры СМ-5, кандидат технических наук, доцент

Павлов Г.Л.

Сведения об авторах отзыва:

Заведующий кафедрой СМ-5 «Автономные информационные и управляющие системы», член корреспондент РАН (Российская академия ракетных и артиллерийских наук), заместитель директора научно-исследовательского института специального машиностроения, Лауреат премии Мосина в 2011г., доктор технических наук, профессор Борзов Андрей Борисович;

Заместитель заведующего кафедрой СМ-5, руководитель отдела «Системы ближней локации» НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана, доктор технических наук, профессор Лихоеденко Константин Павлович;

Доцент кафедры СМ-5, кандидат технических наук, доцент Павлов Григорий Львович.

Почтовый адрес ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»:105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; тел. (499)2636391; e-mail: bauman@bmstu.ru.