

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук


И. В. Ивонин

« 30 » ноября 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Горезова Андрея Викторовича «Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Диссертационная работа А. В. Горезова посвящена решению задач построения маломощных опорных генераторов гигагерцового диапазона и развитию техники синтеза частоты с фазовой автоподстройкой частоты с целью улучшения их электрических, массогабаритных характеристик и энергоэффективности.

Актуальность темы исследований. Разработка энергоэффективных генераторов СВЧ с перестройкой по частоте при высоком качестве спектра выходного сигнала представляет большой интерес в свете бурного развития микроэлектроники, измерительной техники и связи. Поиск новых решений в области синтеза частот и генерирования гармонических СВЧ сигналов, которые могут значительно упростить конструкции радиоэлектронных систем или улучшить их технические характеристики и снизить их стоимость, является актуальной задачей.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения, списка литературы из 124 наименований, 3 приложений и содержит 97 страниц основного текста, 58 рисунков и одну таблицу.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору основных методов синтеза частот, архитектур синтезаторов частот, автогенераторов ВЧ и СВЧ, типов и некоторых свойств резонаторов. Указаны достоинства и недостатки различных методов синтеза частоты, описаны разновидности метода синтеза частоты с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), как аналоговой, так и цифровой. Рассмотрены основные пути улучшения электрических характеристик синтезаторов частот – качества спектра выходного сигнала, параметров перестройки частоты. Обозначен современный уровень источников ВЧ и СВЧ на примере изделий ведущих производителей. На основании обзора сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приведены соотношения, позволяющие рассчитывать спектральные характеристики фазовых шумов выходного сигнала в синтезаторах с ФАПЧ. Для расчета спектральных характеристик фазовых шумов стабилизированного генератора адаптирована математическая модель автоподстройки частоты со стабилизирующим резонатором. Показано, что применение специальной схемотехники в виде комбинированной стабилизации сигнала или автоподстройки частоты со стабилизирующим высокочастотным резонатором снижает уровень фазовых шумов генераторов на десятки децибел.

Для уменьшения шага перестройки частоты до долей Гц предложена оригинальная схема построения синтезатора с ФАПЧ с использованием делителя частоты с дробным коэффициентом деления. Предложена модификация цифровой ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи, когда опорный сигнал формируется делением частоты стабилизируемого генератора. Показано, что при больших коэффициентах деления снижаются требования к чистоте спектра дополнительного сигнала для преобразования частоты.

В **третьей главе** приводятся и анализируются результаты испытаний образцов устройств, построенных с использованием предложенных подходов. Описаны конструкции 4 ГГц-генераторов, основанных на недорогих керамических резонаторах и стабилизированных дисковыми резонаторами через систему автоподстройки частоты. Результаты измерений свидетельствуют об успешности создания источников СВЧ с качеством спектра не хуже, чем у термостатированных кварцевых генераторов.

Результаты испытаний синтезатора частот с дробным коэффициентом деления и преобразованием частоты в обратной связи показали, что по отношению к

традиционной ФАПЧ шаг перестройки по частоте уменьшен в 20 раз, а уровень фазовых шумов снижен на 10 дБ. Приведены результаты испытаний сверхширокополосного синтезатора частот до 20 ГГц с шагом перестройки по частоте не более 1 Гц, энергопотребление которого ниже, чем при использовании устройств прямого цифрового синтеза.

В заключении изложены итоги проведенных исследований.

Научная новизна диссертационной работы заключается во-первых, в использовании делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором в качестве альтернативы микросхеме прямого цифрового синтезатора частот для формирования сигнала, перестраиваемого по частоте с малым шагом; во-вторых, в использовании делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором для формирования сигнала опорной частоты для синтезатора с ФАПЧ, работающего в гигагерцовом диапазоне частот с целью существенного уменьшения шага перестройки по частоте при сохранении качества спектра выходного сигнала; в-третьих, разработана математическая модель сигнала синтезатора частот с ФАПЧ, позволяющая при расчете спектра фазовых шумов ограничиться учетом фазовых шумов частотно-фазового детектора, управляемого генератора и источника сигнала делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором; в-четвертых, предложено нестандартное решение по формированию опорного сигнала синтезатора частот с ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи путем деления частоты выходного сигнала для снижения проникновения дополнительного сигнала для преобразования частоты на выход системы.

Практическая значимость полученных результатов. Использование описанных подходов позволяет создавать энергоэффективные сверхширокополосные синтезаторы частот и генераторы сигналов на их основе с высокой чистотой спектра. Результаты, полученные в процессе выполнения работы, легли в основу генераторов различных типов, производимых АО НПФ «Микран». Большинство генераторов серийно производятся, внедрены в измерительное, радиолокационное и связное оборудование, находятся в свободной продаже.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применения математического аппарата при получении аналитических выражений, а также натурными испытаниями, результаты которых согласуются с результатами расчетов, а также с результатами исследований, проведенными другими авторами.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях, в семи статьях в ведущих научных журналах и монографии автора, а также в пяти патентах.

Замечания по работе.

1. Защищаемые положения 1 и 3 сформулированы в сослагательном наклонении, отражающим субъективное отношение (возможное) действие с оборотами «можно построить» и «может обеспечить». Вряд ли это уместно в защищаемых положениях, если учесть реальный внедренческий потенциал защищаемых результатов.
2. Оставлены без внимания переходные процессы при перестройке частоты, а также не проанализирована устойчивость системы автоматического регулирования частоты.
3. Получены соотношения, показывающие возможность снижения шага перестройки по частоте, но не проведен анализ предельных возможностей.
4. При отображении экспериментальных результатов не приведены оценки погрешности измерений.
5. Не ясны критерии выбора именно ЖИГ-генератора для применения в синтезаторе частот 5-10 ГГц, ведь такой генератор имеет низкую скорость перестройки при высокой потребляемой мощности.

Отмеченные недостатки не изменяют общей положительной характеристики рассматриваемой работы.

Общая оценка диссертационной работы. Диссертационная работа Горезова Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены важные научно-технические задачи по развитию техники генерирования сигналов СВЧ и синтеза частот с высоким качеством спектра и энергоэффективностью. Объем проведенных исследований, количество и тематика публикаций говорят о значительном опыте, в том числе в смежных областях, накопленном автором за время выполнения работы. Номенклатура изделий в серийном производстве свидетельствуют о вкладе автора в поддержку отечественного производства высококачественных СВЧ устройств и систем.

Заключение

Диссертационная работа "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники" соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а её автор Горевой Андрей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Диссертационная работа и отзыв на неё обсуждены на расширенном научном семинаре кафедры радиоп физики радиоп физического факультета ТГУ. Протокол № 22 от 30 ноября 2017 г. Присутствовали: докторов наук – 4, кандидатов наук – 10.

Заведующий кафедрой радиоп физики ТГУ,
д.ф.-м.н., профессор
yvlp@mail.tsu.ru, телефон: (3822) 41-34-63

Якубов Владимир Петрович

Подпись В.П.Якубова заверяю

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Телефон: (3822) 52-98-52

Эл. почта: rector@tsu.ru

Веб-сайт: <http://www.tsu.ru>

