



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Хабитуева Екатерина Исаковна

**Сверхширокополосный электрически перестраиваемый
генератор сантиметрового диапазона
в гибридном исполнении**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Цикин Игорь Анатольевич**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты: **Томашевич Сергей Викторович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
радиосистем и обработки сигналов Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Семисошенко Михаил Александрович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
радиосвязи Федерального государственного казенного военного
образовательного учреждения высшего образования «Военная
орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи
имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 7 декабря 2021 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета У.05.12.04 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 2-ой учебный корпус, аудитория 347).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.т.н., профессор



Коротков Александр Станиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При создании источников стабильных колебаний сантиметрового диапазона, входящих в состав различных устройств связи, радиолокации, радионавигации и др., широкое применение находят синтезаторы частот (СЧ) с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), реализующие косвенный метод частотного синтеза и базирующиеся на использовании генераторов, перестраиваемых по частоте (чаще всего – управляемых напряжением (ГУН)), сантиметрового диапазона волн [Ченакин А.В., Манасевич В., Горевой А.В. и др.].

В настоящее время выпуском подобных устройств занимаются, в частности, такие известные компании-производители, как: Analog Devices, MACOM, Z-Communications, Synergy Microwave и др. Однако количество видов ГУН, обеспечивающих сверхширокополосную (с рабочей полосой частот не менее октавы) перестройку частоты в полосе от 6 до 12 ГГц, ограничивается сравнительно небольшим числом образцов, выполненных преимущественно в виде монолитных интегральных схем (МИС), к которым, например, относятся генераторы MAOC-409000 и HMC732LC4B от компаний MACOM и Analog Devices. При этом для создания подобных МИС требуется проведение трудоёмкого этапа исследовательской и проектной деятельности, необходимого для разработки итоговой топологии устройства. Это значительно усложняет как процесс создания МИС, так и внесение оперативных корректив в схему устройства без существенного изменения всего цикла разработки. К этому следует добавить известные трудности с поставкой в Россию МИС производства зарубежных фирм, с чем сталкиваются многие отечественные предприятия [Кочемасов В.Н., Строганова Е.П., Горевой А.В.]. Именно поэтому для многих отечественных предприятий, занимающихся разработкой и выпуском различной радиотехнической аппаратуры, востребованной оказывается более доступная гибридная технология, сочетающая микрополосковые (МПЛ) элементы с навесными электронными компонентами (транзисторами, резисторами, конденсаторами и т.д.) [Андронов Е.В., Горевой А.В.].

В то же время серийно выпускаемые отечественные сверхширокополосные перестраиваемые генераторы, выполненные по гибридной технологии, характеризуются перестройкой частоты выходного колебания в диапазоне частот, не превышающих 4-6 ГГц [Глазов Г.Н., Горевой А.В.]. Это, в частности, обусловлено имеющимися трудностями при реализации на частотах выше 4-6 ГГц устройств в гибридном исполнении, связанными с технологическими ограничениями, налагаемыми на минимальные размеры используемых компонентов.

В связи с изложенным исследование путей разработки сверхширокополосных генераторов сантиметрового диапазона волн, выполненных на основе доступной и гибкой гибридной технологии с использованием стандартных серийно выпускаемых электронных компонентов, является актуальной и практически значимой задачей.

Следует отметить, что в процессе создания таких ГУН необходимо учитывать особенности сантиметрового диапазона, ограничивающие использование в схеме широкополосных устройств элементов с распределёнными параметрами вследствие значительного изменения их характеристик в пределах полосы перестройки. Применение же в указанном диапазоне дискретных элементов требует для разработки генератора наличия достоверных данных о характеристиках рассматриваемых компонентов в широкой полосе частот, учитывающих в том числе существенное в сантиметровом диапазоне волн влияние «паразитных» параметров. Однако, как показывает практика, несмотря на предоставляемую большинством производителей информацию о своей продукции, для целого ряда типов и номиналов полностью или частично отсутствует их подробное описание. Так, например, на сайте одной из ведущих фирм по производству пассивных электронных компонентов Yageo не приводятся S-параметры, в том числе резисторов относительно небольших типоразмеров (например, типоразмера 0201), специально предназначенных для создания различных

высокочастотных устройств. Вследствие этого разработка ГУН требует проведения большого объёма дополнительных исследований, связанных с измерением параметров используемых SMD-компонентов в сантиметровом диапазоне волн [Stauffer G.H., Sun W., Bahl I.J. и др.].

Объектом исследования в настоящей диссертационной работе является сверхширокополосный (с рабочей полосой частот не менее октавы) генератор сантиметрового диапазона, выполненный в рамках гибридной технологии с использованием стандартных серийно выпускаемых электронных компонентов.

Предметом исследования являются способы построения гибридных генераторов с полосой перестройки не менее октавы в сантиметровом диапазоне.

Целью настоящей работы является исследование путей построения и разработка на их основе сверхширокополосных перестраиваемых генераторов сантиметрового диапазона, выполненных в рамках гибридной технологии на основе стандартных промышленно выпускаемых электронных компонентов и не уступающих по основным характеристикам зарубежным аналогам.

Достижение указанной цели требует решения следующих задач:

1. Определение базовой структуры гибридного ГУН сантиметрового диапазона, а также требований, предъявляемых к его управляющим элементам (варикапам), необходимых для обеспечения перестройки частоты выходного колебания генератора в полосе не менее октавы.

2. Проведение экспериментальных исследований характеристик SMD-компонентов и разработка библиотеки их моделей, адекватно описывающих реальные характеристики данных электронных компонентов в сантиметровом диапазоне и необходимых для теоретического анализа стационарного режима работы перестраиваемого генератора.

3. Разработка модели сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона, учитывающей топологические особенности микрополосковой реализации генератора, на основе уточнённых моделей SMD-компонентов.

4. Анализ основных характеристик сверхширокополосного ГУН на основе разработанной модели генератора.

5. Разработка опытных образцов сверхширокополосного перестраиваемого генератора на основе стандартных промышленно выпускаемых электронных компонентов и их экспериментальное исследование, в том числе в составе стандартной петли ФАПЧ.

Научная новизна работы

1. Усовершенствована методика обработки результатов измерения S-параметров дискретных компонентов перестраиваемого генератора путём уточнения эквивалентной схемы измерительной установки.

2. Исследовано влияние на характеристики гибридного ГУН сантиметрового диапазона параметров управляющих элементов (варикапов), их количества и способа включения в микрополосковую схему генератора.

3. Разработана методика построения сверхширокополосных генераторов сантиметрового диапазона, выполненных по гибридной технологии, основанная на использовании специальных выходных согласующе-трансформирующих цепей, обладающих существенно немонотонным характером изменения мнимой составляющей импеданса.

4. Разработана модель сверхширокополосного гибридного ГУН сантиметрового диапазона, базирующаяся на электромагнитном (ЭМ) анализе его микрополосковой структуры.

5. Разработаны и исследованы схемы ГУН, выполненные по гибридной технологии и реализующие в сантиметровом диапазоне октавную перестройку частоты.

Теоретическая ценность новых научных результатов

1. Предложенная модель неоднородностей измерительной установки, необходимая для обработки результатов измерений S-параметров дискретных компонентов ГУН, учитывает (в отличие от традиционной модели) дополнительные потери, а также возможную несимметричность её структуры. Данная модель позволяет существенным образом (до нескольких раз) уменьшить значение взвешенной разницы между измеренными и

рассчитанными S-параметрами исследуемого устройства при проведении процедуры обработки экспериментальных данных.

2. Проведённые исследования стационарного режима работы показывают, что в качестве базовой структуры сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн следует использовать схему с двумя управляющими элементами (варикапами) в эмиттерной и базовой цепях активного элемента, характеризующуюся меньшим значением коэффициента перекрытия по ёмкости, требуемого для обеспечения октавной полосы перестройки, чем однодиодная структура, а также меньшей сложностью реализации схемы, чем трехдиодный вариант.

3. Разработанная методика создания гибридных генераторов сантиметрового диапазона волн, основанная на использовании специальных выходных согласующе-трансформирующих цепей, обладающих существенно немонотонным характером изменения мнимой составляющей полного сопротивления, позволяет добиться сверхширокой (в полосе не менее октавы) перестройки ГУН в рассматриваемом диапазоне частот.

4. Разработанная на основе ЭМ анализа микрополосковой структуры ГУН модель перестраиваемого генератора демонстрирует хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными и может быть использована для построения устройств аналогичного назначения.

Практическая ценность новых научных результатов

1. Применение усовершенствованной, в части использования уточнённой модели исключаемых неоднородностей измерительной установки, методики обработки экспериментальных данных позволяет уточнить параметры SMD-компонентов генератора и разработать библиотеку моделей таких элементов, адекватно описывающих их реальные частотные характеристики в сантиметровом диапазоне и необходимых для разработки сверхширокополосных ГУН.

2. Моделирование стационарного режима работы перестраиваемого генератора и его экспериментальные исследования позволили определить конфигурацию схемы ГУН и значения её параметров, обеспечивающие сверхширокополосную (в полосе не менее октавы) перестройку частоты в рассматриваемом диапазоне частот.

3. Практическое использование разработанной топологии микрополосковой схемы ГУН демонстрирует повторяемость результатов в процессе мелкосерийного производства сверхширокополосных генераторов, выполненных по гибридной технологии на основе стандартных промышленно выпускаемых электронных компонентов.

4. Экспериментальное исследование опытных образцов разработанного ГУН, в том числе в составе стандартной петли ФАПЧ, показывает возможность создания на его основе сверхширокополосного источника стабильных колебаний, перестраиваемого в диапазоне частот от 6 до 12 ГГц.

Методология диссертационного исследования

В ходе проведённых исследований использовались следующие методы и подходы:

1. При схемотехническом моделировании сверхширокополосного генератора сантиметрового диапазона волн применялись методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей (методы комплексных амплитуд и гармонической линеаризации).

2. Электромагнитное моделирование микрополосковой структуры перестраиваемого генератора базировалось на использовании методов моментов и конечных элементов.

3. При проведении процедуры оптимизации применялись т.н. симплекс-метод (реализованный на основе метода Нелдера-Мида), метод прямого поиска (метод Хука-Дживса) и др.

Положения, выносимые на защиту

1. Определённая в работе базовая структура перестраиваемого генератора, подразумевающая использование двух управляющих элементов (варикапов) в эмиттерной и базовой цепях активного элемента, является наиболее предпочтительной для создания гибридного ГУН сантиметрового диапазона с полосой перестройки частоты выходного колебания не менее октавы.

2. Развита в работе методика создания выходных согласующе-трансформирующих цепей с существенно немонотонным характером изменения мнимой составляющей импеданса позволяет построить нагрузочную цепь генератора сантиметрового диапазона, обеспечивающую непрерывную перестройку ГУН в сверхширокой (октава и более) полосе частот.

3. Использование при проведении процедуры исключения неоднородностей (англ. *de-embedding*) модели измерительной установки, учитывающей дополнительные потери, а также возможную несимметричность её структуры, приводит к уменьшению (до нескольких раз) значения взвешенной разницы между измеренными и рассчитанными S-параметрами исследуемого устройства.

4. Созданный библиотечный набор уточнённых моделей SMD-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, варикапов) адекватным образом описывает их реальные характеристики в сантиметровом диапазоне.

Степень достоверности полученных результатов

При решении поставленных задач применялись классические методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей (методы комплексных амплитуд и гармонической линеаризации). Для построения моделей перестраиваемого генератора и их исследования использовались специализированные среды моделирования высокочастотных устройств (Microwave Office (MWO), AXIEM, Analyst), входящие в состав автоматизированной системы AWR Design Environment (AWR DE), широко применяемой в инженерной и научной практике.

Результаты проведённых исследований не противоречат известным данным о моделировании широкополосных устройств сантиметрового диапазона волн, расширяя и дополняя их в части выбора базовой структуры генератора и параметров его схемы. Полученные результаты подтверждены данными экспериментальных исследований, которые проведены на специальных установках с применением стандартных методов измерений регулярных и флуктуационных характеристик исследуемых устройств.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использовались в ООО «Специальный технологический центр» (ООО «СТЦ») при создании приёмно-передающего оборудования в рамках проекта «навОри (ИНИ)», а также при выполнении ряда НИР, проводимых ФГАОУ ВО «СПбПУ» совместно с ООО «СТЦ» (имеется соответствующий Акт внедрения результатов диссертационной работы).

Апробация работы

Материалы, представленные в данной работе, прошли апробацию на следующих конференциях:

1. Научный форум с международным участием «XLIII Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1 - 6 декабря 2014 г.

2. Научный форум с международным участием «XLIV Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 30 ноября - 5 декабря 2015 г.

3. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation, September 22 - 23, 2016.

4. XIII-я международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП – 2016», Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация, 3 - 6 октября 2016 г.

5. Научная конференция с международным участием «XLV Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 14 - 19 ноября 2016 г.

6. III Всероссийская научно-техническая конференция им. В.А. Солнцева "Проблемы СВЧ электроники - 2017", Национальный исследовательский университет «Высшая школа

экономики», Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова, Москва, Российская Федерация, 8-9 ноября 2017 г.

7. 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation, September 27 - 28, 2018.

8. 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Congress Center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation, October 22 - 23, 2018.

9. Научная конференция с международным участием «XLVII Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 19 - 24 ноября 2018 г.

10. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies, Congress Center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation, July 11 - 12, 2019.

11. Научная конференция с международным участием «XLVIII Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 18 - 23 ноября 2019 г.

12. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation, July 10 - 11, 2020.

13. 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2020), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation, September 24 - 25, 2020.

14. 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation, October 15 - 16, 2020.

Публикации

По теме представленных в данной работе исследований опубликовано 20 работ, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 8 – в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень Scopus, 7 – в сборниках материалов конференций всероссийского и международного уровней.

Основные результаты в диссертационной работе получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 119 страниц, включая 63 рисунка, 7 таблиц, список используемой литературы из 125 наименований и 1 приложение с Актом внедрения результатов диссертационного исследования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность работы и степень её разработанности, приведены сведения о значимости практического решения поставленных задач, перечислены новые научные результаты, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложена структура диссертационного исследования.

В **первой главе** проведён аналитический обзор литературы по теме работы, связанной с исследованием и разработкой источников колебаний сантиметровой диапозона, а именно генераторов, управляемых напряжением (ГУН). Особое внимание уделяется генераторам, обеспечивающим сверхширокополосную (с рабочей полосой частот не менее октавы) перестройку частоты в рассматриваемой полосе частот. Сформулированы цель и задачи работы.

Во **второй главе** на основе результатов анализа в линейном и стационарном режимах работы нескольких вариантов схемы перестраиваемого генератора, отличающихся количеством управляющих элементов и способами их включения в ГУН (рис. 1), определена базовая структура сверхширокополосного генератора сантиметровой диапозона, основанная на использовании двух варикапов в эмиттерной и базовой цепях активного элемента (рис. 1б). Данная схема характеризуется меньшим значением требуемого для обеспечения октавной полосы перестройки коэффициента перекрытия по ёмкости $k = C_{max}/C_{min}$, чем однодиодная структура (в стационарном режиме работы ГУН для схемы с одним диодом $k \approx 6.3$, а с двумя – $k \approx 4.8$, рис. 2), а также меньшей сложностью реализации схемы, чем трёхдиодный вариант.

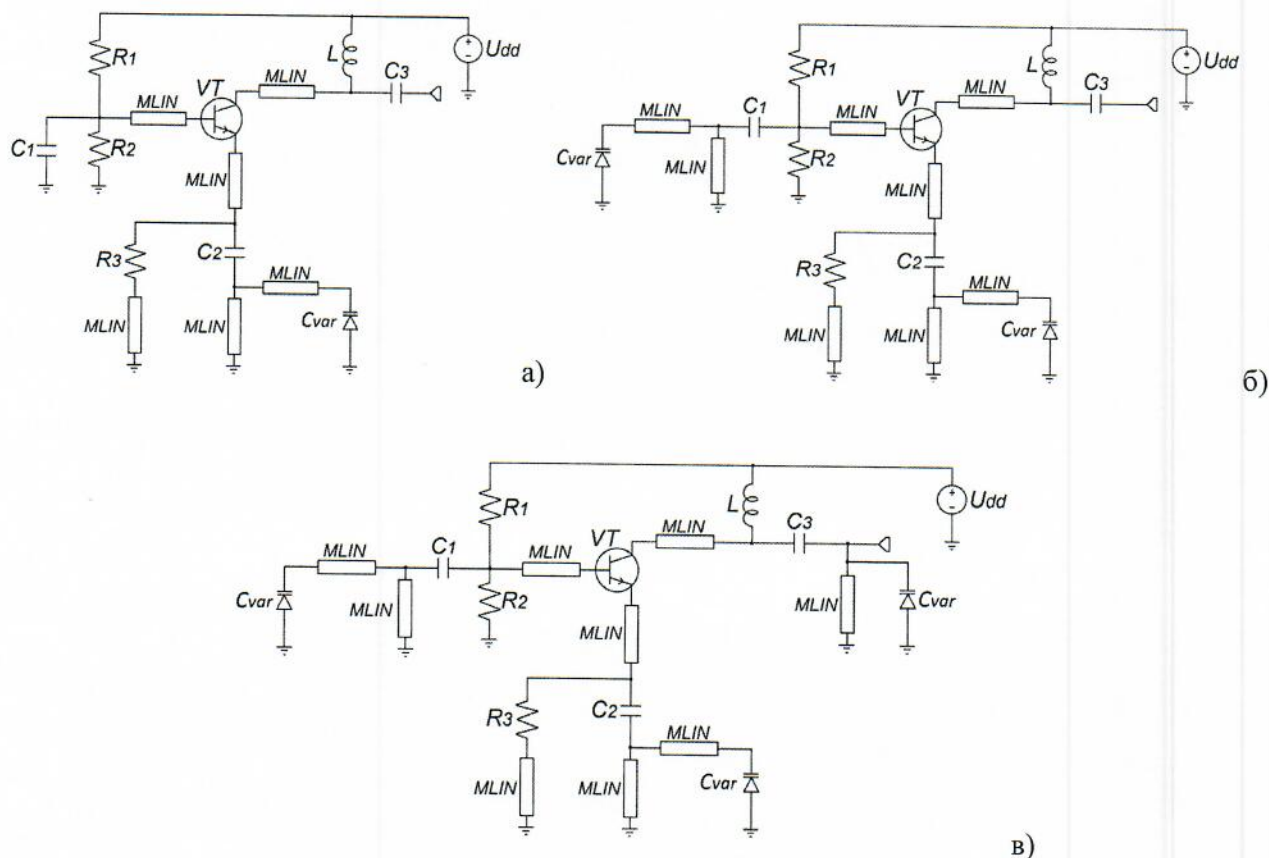


Рис. 1. Модели ГУН в МВО: (а) – с 1-ой управляющей цепью; (б) – с 2-мя управляющими цепями; (в) – с 3-мя управляющими цепями

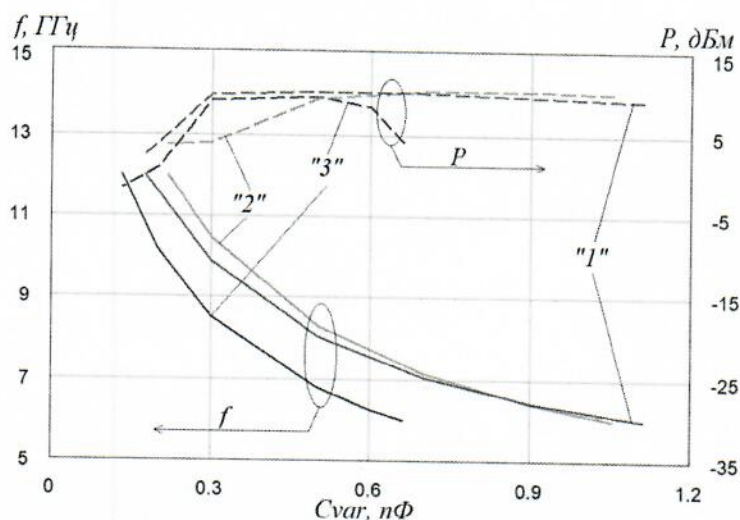
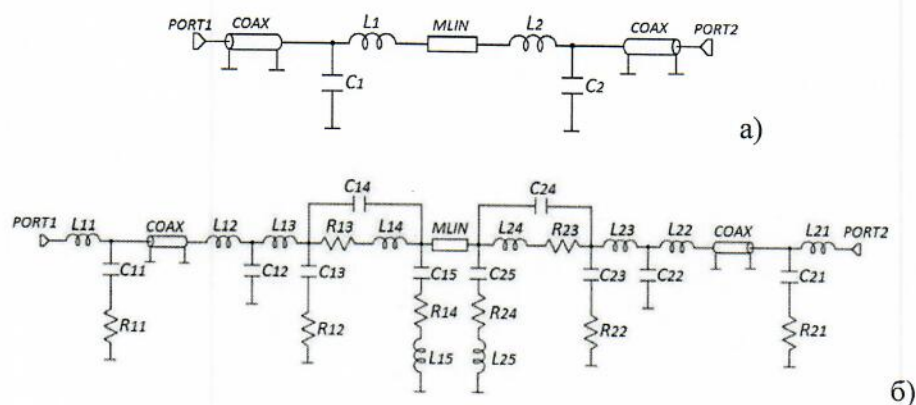


Рис. 2. Зависимости мощности и частоты выходного колебания генератора от эквивалентной ёмкости варикапов: «1» – 1-диодная модель; «2» – 2-диодная модель; «3» – 3-диодная модель

Для обеспечения перестройки частоты ГУН сантиметрового диапазона в требуемой (октавной) полосе частот оказывается необходимо, чтобы изменение ёмкости варикапа лежало в области значений, не превосходящих 1 пФ, а в высокочастотной части рассматриваемого (сантиметрового) диапазона доходило до минимальных величин не более 0.15 пФ (рис. 2). Среди диодов, соответствующих указанным требованиям, наиболее подходящими являются варикапы серий MGV125, обладающие рекордно малыми значениями ёмкостей (до значений порядка 0.06 пФ), и МА46Н120, характеризующиеся меньшими величинами параметра k (для МА46Н120 $k \approx 6$ при изменении $U_{упр}$ от 1 до 15В, а для MGV125 $k \approx 10$ при варьировании $U_{упр}$ в диапазоне от 2 до 20В), но в то же время изготавливаемые в виде более удобных для поверхностного монтажа flip chip элементов.

При этом для моделирования генератора требуется наличие достоверных данных об используемых электронных компонентах (в том числе варикапах), учитывающих существенное в рассматриваемом диапазоне частот влияние «паразитных» параметров. Однако, как было отмечено ранее, несмотря на предоставляемую большинством производителей информацию о своей продукции, для целого ряда типов и номиналов полностью или частично отсутствует их подробное описание. В связи с этим потребовалось проведение серии экспериментальных исследований основных SMD-компонентов ГУН, необходимых для создания библиотеки их моделей, адекватно описывающих характеристики данных электронных компонентов в сантиметровом диапазоне волн.

С этой целью, в частности, применялась усовершенствованная в плане использования уточнённой модели измерительной установки (рис. 3), учитывающей потенциальные потери, а также возможные отличия электрических и геометрических параметров коаксиально-полосковых переходов, процедура исключения неоднородностей (англ. *de-embedding*).



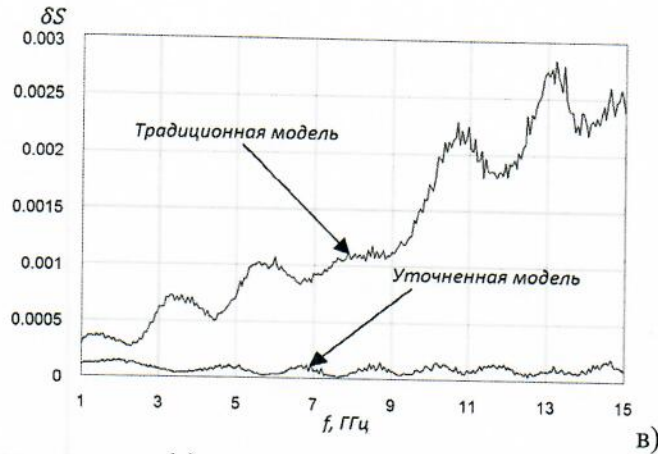


Рис. 3. Измерительная установка: (а) – традиционная модель исключаемых неоднородностей; (б) – уточнённая модель исключаемых неоднородностей; (в) – взвешенная разница между измеренными S-параметрами и параметрами модели измерительной установки с отрезком МПЛ

График, приведённый на рис. 3в, демонстрирует различие реализуемых значений взвешенной разницы $\delta S = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|S_{ij\text{измер}} - S_{ij\text{расчет}}|)^2}{N^2}$ между измеренными S-параметрами ($S_{ij\text{измер}}$) и параметрами модели ($S_{ij\text{расчет}}$) измерительной установки с отрезком однородной МПЛ, полученных в случае использования традиционной (рис. 3а) и уточнённой (рис. 3б) моделей исключаемых неоднородностей. Как видно, применение схемы, изображённой на рис. 3б, (по сравнению со случаем использования традиционной модели) позволяет в несколько раз уменьшить значение параметра δS . Подобное снижение величины δS может оказывать существенное влияние на результаты моделирования. Так, например, использование при обработке экспериментальных данных уточнённой модели исключаемых неоднородностей может приводить к сдвигу на несколько сотен МГц значения резонансной частоты управляющей цепи ГУН, что необходимо учитывать при проектировании различных устройств (в том числе перестраиваемого генератора сантиметрового диапазона).

Использование указанной уточнённой модели исключаемых неоднородностей (рис. 3б) при обработке (с помощью инструментов среды MWO) результатов измерений характеристик различных SMD-компонентов (резисторов и конденсаторов типоразмера 0201 от компаний Yageo и Murata, катушек индуктивности типоразмера 0402 фирмы AVX, а также варикапов от MACOM) позволило скорректировать параметры их эквивалентных схем и создать библиотеку моделей электронных компонентов, адекватно описывающих их реальные частотные характеристики в сантиметровом диапазоне волн.

В качестве примера на рис. 4а приведена уточнённая модель SMD-конденсатора типоразмера 0201, а на рис. 4б – частотные характеристики конденсатора ёмкостью 1.1 пФ.

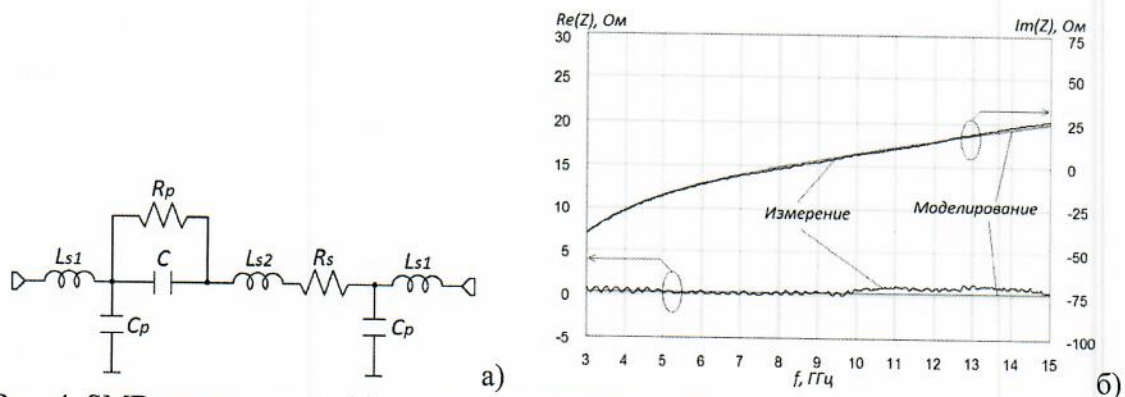


Рис. 4. SMD-конденсатор: (а) – уточнённая модель; (б) – импедансные характеристики конденсатора ёмкостью 1.1 пФ

На рис. 4а «C» – номинал SMD-конденсатора, « L_s »-, « C_p »-, « R_p »- и « R_s »-элементы – «паразитные» параметры корпуса и самого материала ($L_{s1} = 0.002$ нГн, $C_p = 0.036$ пФ, $L_{s2} = 0.341$ нГн, $R_p = 9.455 \cdot 10^8$ Ом, $R_s = 0.282$ Ом).

Полученные в результате серии экспериментальных исследований уточнённые модели SMD-компонентов характеризуются небольшими отклонениями от реальных частотных параметров соответствующих элементов. Так, например, для большинства номиналов рассмотренных SMD-компонентов максимальная разница между данными эксперимента и моделирования (на частоте 9 ГГц) не превосходит 12%, тогда как для варикапов данная разница составляет не более 10% во всем диапазоне частот от 3 до 15 ГГц, что соответствует погрешности определения резонансной частоты управляющих цепей ГУН менее (2-3) %.

Третья глава посвящена моделированию основных структурных элементов схемы ГУН (цепей подачи смещения на варикап, управляющих цепей, выходной согласующе-трансформирующей цепи), а также всей схемы сверхширокополосного генератора с использованием соответствующей системы автоматизированного проектирования и моделирования, а именно AWR Design Environment (AWR DE), не только учитывающей особенности сантиметрового диапазона, но и включающей в себя целый ряд различных сред (как схемотехнического (MWO), так и электромагнитного (например, AXIEM)) моделирования.

Сравнительный анализ указанных структур, в основном базирующийся на исследовании импедансных характеристик данных элементов схемы генератора, позволил установить, что для создания октавного ГУН сантиметрового диапазона целесообразно использовать параллельную схему управляющих цепей, в которой подача напряжения смещения на варикап осуществляется в точку между катодом диода и несколькими (не менее 2) конденсаторами, замыкающими высокочастотную составляющую на «землю».

Однако применение рассмотренных во второй главе моделей электронных компонентов (SMD-компонентов), а также учёт особенностей микрополосковой топологии ГУН могут приводить к некоторому уменьшению модуля отрицательной вещественной составляющей полного сопротивления АЭ генератора, а также к увеличению нелинейности частотной зависимости его импеданса в исследуемом диапазоне частот (6-12 ГГц), вследствие чего в некоторых областях полосы перестройки наблюдаются нарушения условий генерации. Предлагаемая методика устранения указанного негативного эффекта основана на определении структуры выходной согласующе-трансформирующей цепи генератора, учитывающей существенно нелинейный характер частотной зависимости отрицательного сопротивления АЭ ГУН и, тем самым, обеспечивающей непрерывную перестройку частоты выходного колебания ГУН во всей рассматриваемой полосе частот.

Для выработки требований к такой выходной цепи ГУН в среде MWO был проведён анализ стационарного режима работы генератора на основе его упрощённых эквивалентных схем, приведённых на рис. 5.

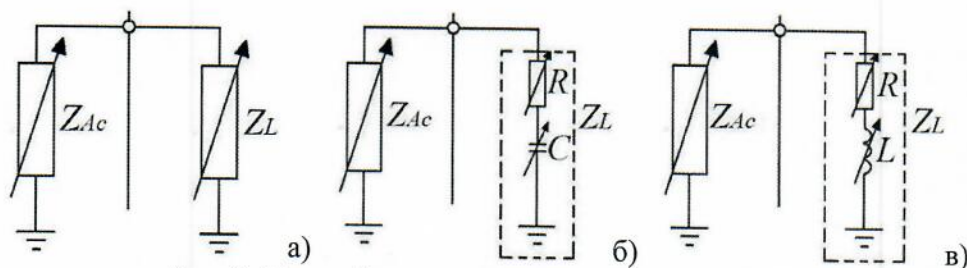


Рис. 5. Упрощённые эквивалентные схемы ГУН

На этом рисунке « Z_{Ac} » – полное сопротивление АЭ генератора со стороны его коллекторных выводов, полученное на основе нелинейной модели транзистора, предоставляемой компанией-производителем, а « Z_L » – варьируемая нагрузка ГУН в виде R - (рис. 5а), RC - (рис. 5б) или RL -цепей (рис. 5в).

В каждой точке диапазона изменения управляющего напряжения, подаваемого на варикапы (а значит, в каждой точке полосы перестройки выходной частоты ГУН), с помощью варьирования значений R -, L - и C -элементов двухполюсника « Z_L » (рис. 5) осуществлялся анализ стационарного режима работы ГУН с целью определения параметров выходной цепи генератора, обеспечивающей выполнение условий генерации на рассматриваемой частоте. В результате установлено, что частотные зависимости импеданса выходной согласующей цепи ГУН должны обладать сложным и существенно немонотонным характером. Так, например, использование в генераторе нагрузочной цепи, приведённой на рис. 5а, не позволяет добиться непрерывной перестройки частоты в пределах от 6 до 12 ГГц, поскольку для обеспечения генерации в рассматриваемом диапазоне частот необходимо наличие резистивной нагрузки с существенно нелинейной частотной характеристикой, что не представляется осуществимым при практической реализации в октавной полосе частот сантиметрового диапазона волн.

Однако введение в сопротивление выходной цепи ГУН реактивной компоненты (рис. 5б и рис. 5в) обеспечивает режим автоколебаний при менее жёстких требованиях к вещественной составляющей $Re(Z_L)$ импеданса нагрузки. На рис. 6 показаны границы допустимых областей изменения вещественной $Re(Z_L)$ и мнимой $Im(Z_L)$ составляющих полного сопротивления нагрузочной цепи генератора, полученные в результате исследования стационарного режима работы ГУН диапазона 6-12 ГГц, построенного с использованием нагрузки комплексного типа.

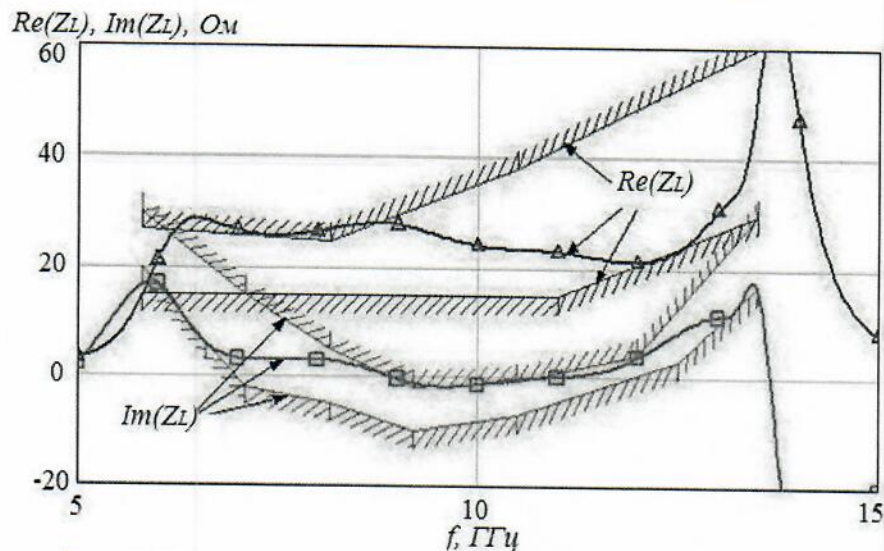


Рис. 6. Импедансные характеристики выходной цепи ГУН

Из рис. 6 видно, что в нижней части диапазона перестройки вещественная составляющая $Re(Z_L)$ полного сопротивления нагрузки не должна превышать нескольких десятков Ом (лучше всего – находиться в пределах (12-20) Ом), тогда как в области более высоких частот требуемые характеристики генератора обеспечиваются при существенно больших (в несколько раз) значениях $Re(Z_L)$ – (40-50) Ом и выше. Мнимая часть $Im(Z_L)$ полного сопротивления и вовсе должна менять в полосе перестройки свой знак: в середине диапазона требуется реактивность емкостного характера, а на краях – индуктивного (рис. 6).

На рис. 7 приведена одна из возможных конфигураций выходной согласующе-трансформирующей цепи ГУН, импедансные характеристики которой соответствуют требованиям, указанным на рис. 6. При этом под символами «CAP» и «RES» на этом рисунке (рис. 7) подразумеваются уточнённые модели SMD-конденсаторов и резисторов (гл. 2), под «MLIN» и «MTEE\$» – встроенные в MWO элементы микрополосковой топологии ГУН, а под «PORT1» и «PORT2» – соответственно порт подключения нагрузочной цепи к коллекторному выводу АЭ ГУН и выходной порт.

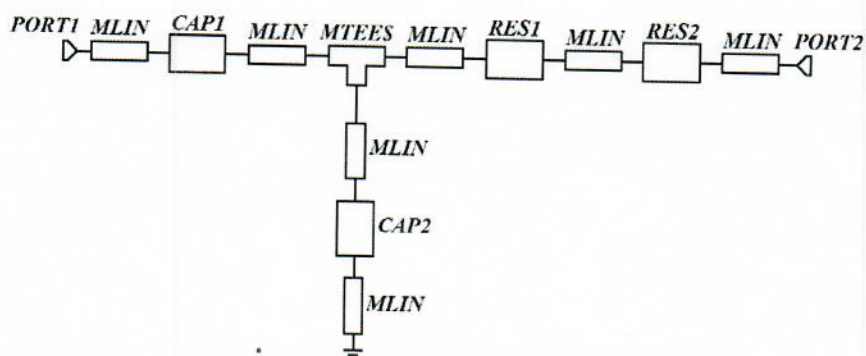


Рис. 7. Модель выходной цепи в MWO

На основе рассмотренных структурных элементов микрополосковой реализации схемы ГУН (цепей подачи смещения на варикап, управляющих цепей, а также выходной согласующе-трансформирующей цепи) в среде MWO была построена обобщённая эквивалентная схема генератора, базирующаяся на использовании стандартных компонентов топологических примитивов библиотеки MWO (рис. 8).

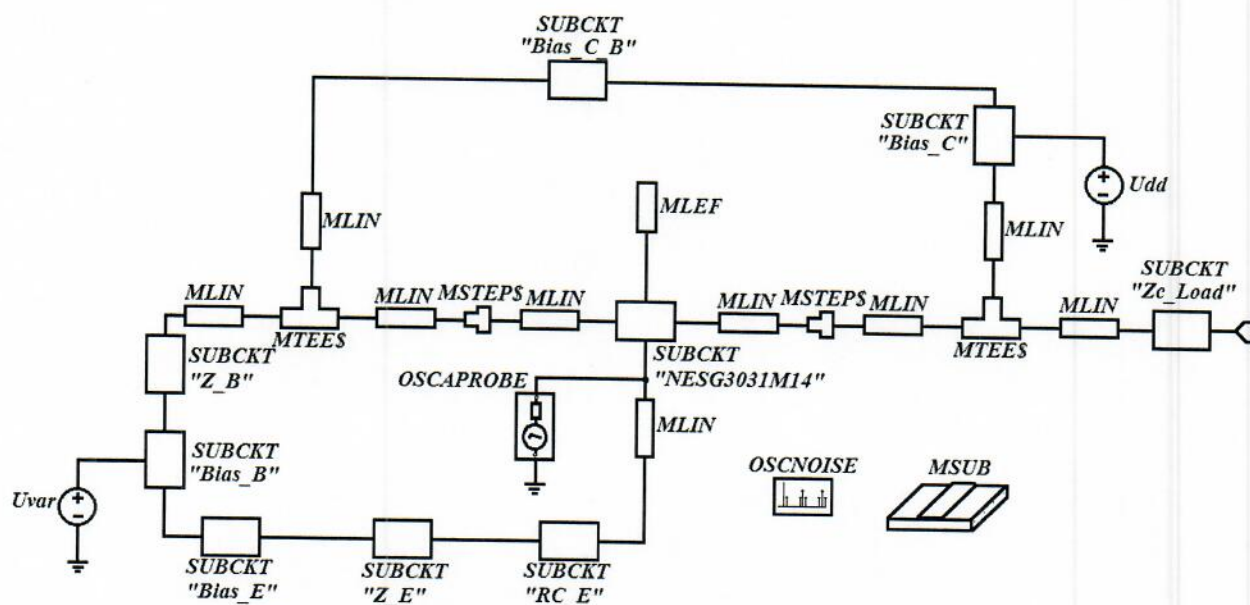


Рис. 8. Обобщённая эквивалентная схема ГУН в MWO

На этом рисунке под символами «SUBCKT "Z_B"», «SUBCKT "Bias_B"», «SUBCKT "Bias_E"» и т.д. подразумеваются различные подсхемы ГУН: цепи подачи питания на транзистор, цепи подачи смещения на варикапы, RC-цепь в эмиттере транзистора, выходная согласующе-трансформирующая цепь и др.

В качестве примера на рис. 9 приведена схема подачи смещения на транзистор ГУН.

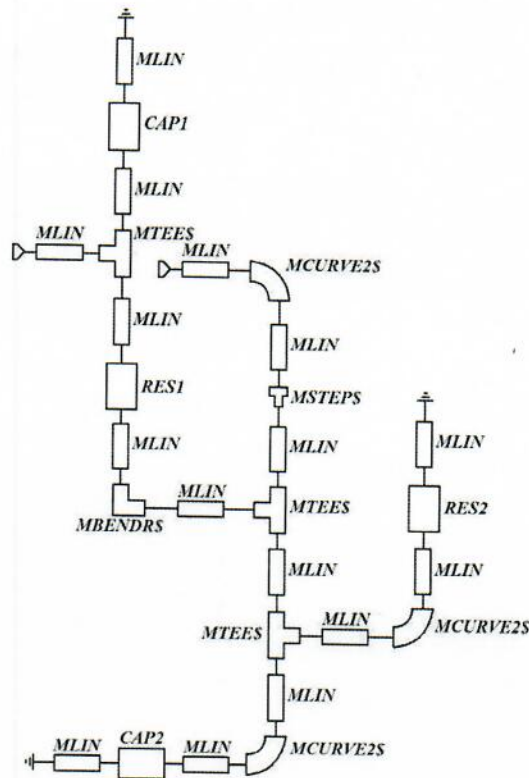


Рис. 9. Схема подачи смещения на транзистор генератора

Исследование стационарного режима работы схемы генератора (рис. 8), а также предварительные эксперименты показали, что применение при разработке сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона средств схмотехнического моделирования приводит к созданию реальных образцов ГУН, характеристики которых существенным образом отличаются от расчётных данных, что, в свою очередь, требует уточнения последних.

Поскольку при разработке микрополосковой схемы ГУН решалась задача размещения всех элементов автогенератора на относительно небольшой плате стандартного типоразмера (0.5"x0.5", или 12.7 мм x 12.7 мм), то топология микрополосковой схемы генератора была реализована в условиях достаточно плотного монтажа. Близкое расположение компонентов и нестандартная структура микрополосковой топологии может являться одним из источников погрешностей при проведении схмотехнического моделирования. Как следствие, для адекватного описания в рассматриваемом частотном диапазоне микрополосковой схемы ГУН требуется использование более точных моделей, чем те, что входят стандартную библиотеку MWO.

В связи с этим для уточнения полученных в среде MWO результатов необходимо проведение дополнительных исследований с использованием более эффективного средства – электромагнитного моделирования, предназначенного для анализа планарных (и не только) устройств, в том числе сантиметрового диапазона волн.

Данный тип исследований ГУН подразумевает создание его топологии с помощью встроенных в соответствующую среду моделирования структурных элементов различной конфигурации и её дальнейший анализ с использованием целого ряда решающих устройств (основанных, например, на методе моментов (AXIEM) или на методе конечных элементов (Analyst)).

В качестве примера на рис. 10 приведена топология перестраиваемого генератора, построенная в среде ЭМ моделирования AXIEM, входящей в состав автоматизированной системы AWR DE.

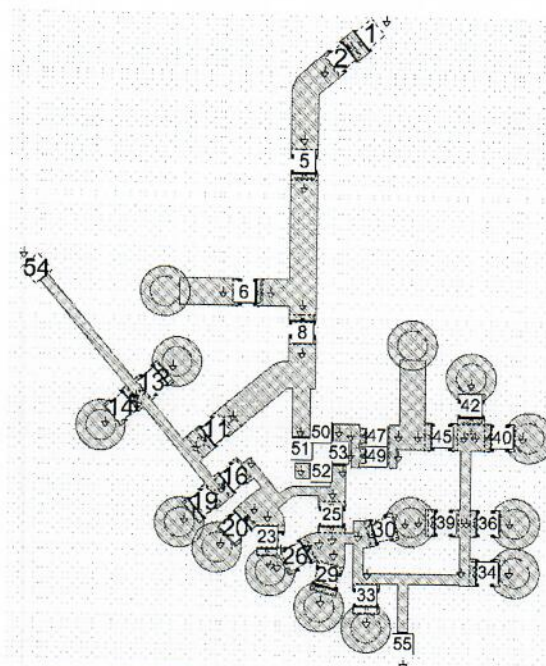


Рис. 10. Топология ГУН в AXIEM

Результатом ЭМ моделирования такой топологии является матрица S-параметров рассматриваемой структуры, которая может использоваться для проведения дальнейшего сравнительного анализа результатов схмотехнического и ЭМ моделирования ГУН. С этой целью данная матрица S-параметров (в качестве подсхемы) импортировалась в MWO (рис. 11).

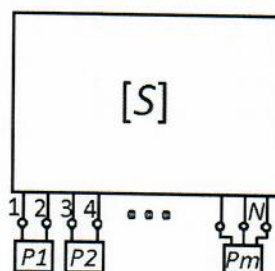


Рис. 11. S-матрица топологии ГУН

К выводам подсхемы с рассчитанными в AXIEM и Analyst S-параметрами топологии ГУН подсоединялись разработанные модели используемых SMD-компонентов, полученные в результате измерений их характеристик в сантиметровом диапазоне волн (гл. 2) – элементы $P_1, \dots, P_m$ (рис. 11).

Анализ стационарного режима работы такой схемы генератора (рис. 11) привёл к результатам, отличающимся от полученных в ходе схмотехнического моделирования ГУН. В связи с этим для проверки адекватности моделирования сверхширокополосного генератора сантиметрового диапазона потребовалось проведение серии экспериментальных исследований и измерений характеристик реальных образцов ГУН.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментального исследования реальных образцов ГУН, изготовленных по гибридной технологии на основе рассмотренных во второй главе электронных компонентов: конденсаторов, резисторов, катушек индуктивности и т.д. На рис. 12 приведена фотография одного из таких образцов ГУН, представляющих платы стандартного размера 0.5"x0.5" (12.7 мм x 12.7 мм), совместимые по габаритам с различными гибридными генераторами, выпускаемыми современными компаниями-производителями электронных компонентов и модулей.

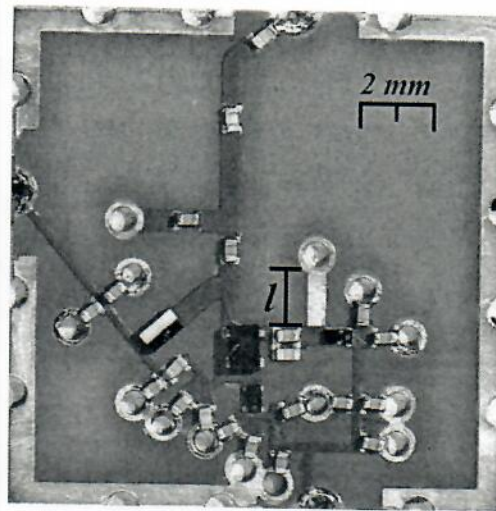
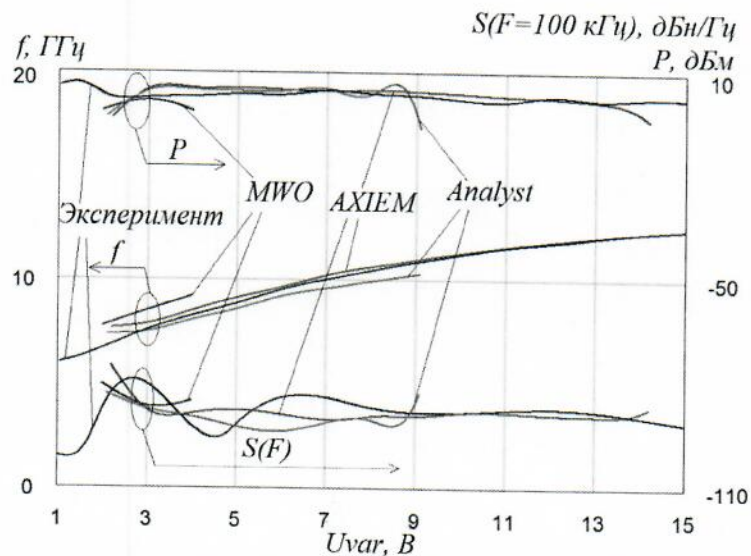


Рис. 12. Фотография платы ГУН

В качестве примера на рис. 13 приведён сравнительный график для характеристик ГУН (с длиной индуктивного шлейфа $l = 1.5$ мм), полученный в результате моделирования и экспериментальных исследований. На данном рисунке использованы следующие обозначения: «MWO» – характеристики, полученные с использованием средств схемотехнического моделирования среды MWO, «AXIEM» и «Analyst» – характеристики, полученные с применением результатов ЭМ моделирования микрополосковой структуры ГУН в соответствующих средах ЭМ анализа.

Рис. 13. Сравнительный график для характеристик ГУН с $l = 1.5$ мм

Проведённые исследования показали, что применение схемотехнического моделирования с использованием встроенных в MWO топологических элементов приводит к существенному отличию получаемых результатов от экспериментальных данных. Так, например, разница между рассчитанными и измеренными значениями частоты генерации может составлять не менее 0.9 ГГц (рис. 13), причём в ряде случаев (для некоторых номиналов используемых SMD-компонентов) применение лишь средств схемотехнического моделирования в MWO может приводить либо к значительному сужению полосы перестройки, либо к отсутствию генерации во всем требуемом частотном диапазоне. Использование же для расчёта параметров микрополосковой топологии ГУН ЭМ моделирования (например, в AXIEM) позволяет существенным образом улучшить совпадение характеристик генератора, полученных в ходе

моделирования, с измеренными данными. Так, например, различие между реальными и рассчитанными с использованием результатов моделирования в АХИЕМ значениями частот выходного колебания ГУН не превосходит 400 МГц и в среднем составляет примерно 200 МГц (рис. 13).

Разработанный генератор обеспечивает сопоставимые (а в некоторых случаях превосходящие) параметры работы по сравнению с зарубежными аналогами (например, НМС732LC4В): перестройка частоты в пределах от 6 до 12 ГГц при относительно небольшой неравномерности уровня мощности выходного колебания ($\Delta P_{\text{макс}} \approx 5$ дБ при среднем значении 3 дБм); не менее чем на 5-7 дБ большее подавление высших гармонических составляющих; спектральная плотность мощности фазового шума (СПМ ФШ) около -95 дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей (при выполнении следующих условий: коллекторный ток не превосходит 30 мА, напряжение коллектор-эмиттер составляет не менее 3 В и коэффициент пропорциональности между величинами базового тока и тока в делителе порядка 25); не менее чем в 1.5 раза меньший уровень потребляемой мощности, не превосходящий 165 мВт.

Учитывая широкое применение октавных генераторов в качестве ГУН широкополосных источников стабильных колебаний сантиметрового диапазона, наряду с рассмотрением автономного режима работы осуществлялось экспериментальное исследование функционирования разработанного генератора в составе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

На рис. 14 приведена плата синтезатора частот (СЧ) с ФАПЧ, построенного с использованием разработанного генератора.

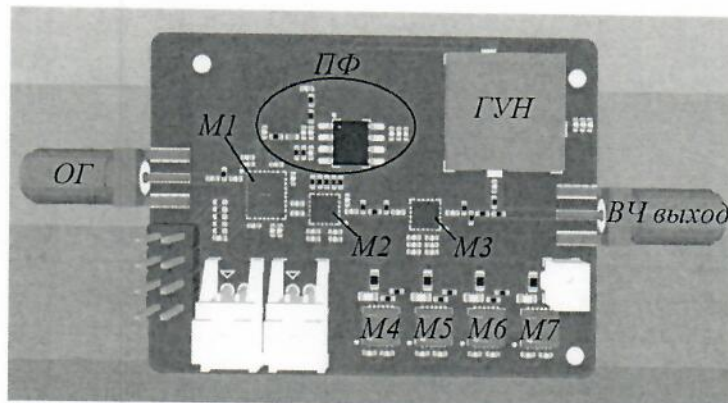


Рис. 14. Синтезатор частот с ФАПЧ

На данном рисунке под символом «ОГ» подразумевается опорный генератор (ОГ) МХО37/14Р, формирующий высокостабильное колебание с частотой 100 МГц, под «М1» – микросхема с встроенными частотно-фазовым детектором (ЧФД), делителями частоты и т.д. (LTC6947), «ПФ» – петлевой фильтр, предназначенный для формирования напряжения управления ГУН, «ГУН» – собственно перестраиваемый генератор, частота выходного колебания которого синхронизируется ОГ, «М2» и «М3» – микросхемы делителя частоты (НМС862) и усилителя мощности (НМС451), согласующие значения уровня мощности и диапазона используемых частот компонентов системы ФАПЧ.

В качестве примера на рис. 15 приведены флуктуационные характеристики данного СЧ на частоте $f = 8$ ГГц.

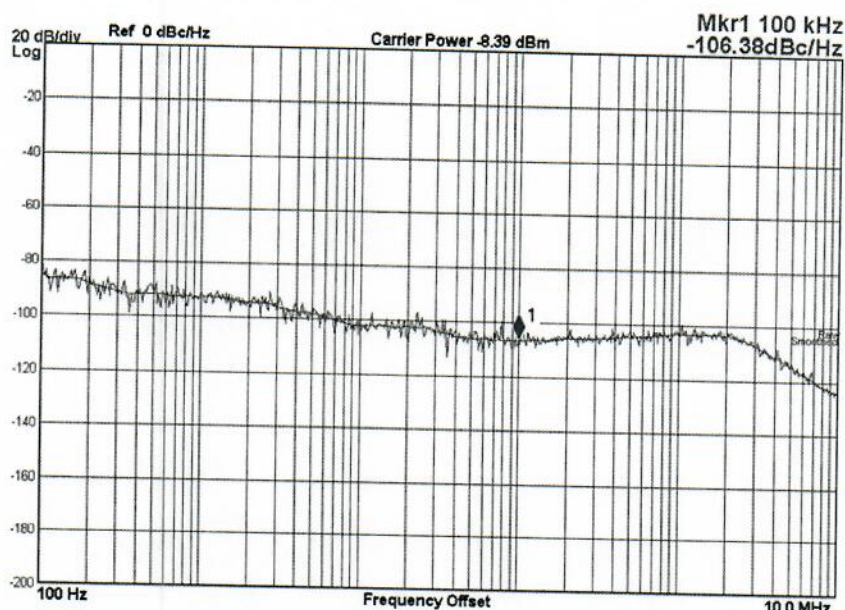


Рис. 15. Флуктуационные характеристики СЧ с ФАПЧ на $f = 8$ ГГц

Для оценки уровня СПМ ФШ в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ может быть использована следующая формула:

$$S_{\text{СЧ}}(F) = 10 \lg(10^{S_{\text{ОГСЧ}}(F)/10} + 10^{S_{\text{СЧравн}}/10} + 10^{S_{\text{СЧфлик}}(F)/10}), \quad (1)$$

где $S_{\text{СЧ}}(F)$ – СПМ ФШ выходного колебания СЧ в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ, $S_{\text{ОГСЧ}}(F)$ – СПМ ФШ ОГ, пересчитанная на выход микросхемы «М1» (рис. 14), $S_{\text{СЧравн}}$ – внутриполосный фазовый шум микросхемы «М1» (рис. 14), $S_{\text{СЧфлик}}(F)$ – внутриполосный фазовый $1/f$ шум микросхемы «М1» (рис. 14).

При этом:

$$S_{\text{ОГСЧ}}(F) = S_{\text{ОГ}}(F) - 20 \lg(R) + 20 \lg(N), \quad (2)$$

$$S_{\text{СЧравн}} = S_{\text{СЧравн_норм}} + 20 \lg(N) + 10 \lg(f_{\text{ср}}), \quad (3)$$

$$S_{\text{СЧфлик}}(F) = S_{\text{СЧфлик_норм}} + 20 \lg(f) - 10 \lg(F), \quad (4)$$

где $S_{\text{ОГ}}(F)$ – СПМ ФШ ОГ, $S_{\text{СЧравн_норм}}$ – нормированный внутриполосный фазовый шум микросхемы «М1» (рис. 14), $S_{\text{СЧфлик_норм}}$ – нормированный внутриполосный фазовый $1/f$ шум микросхемы «М1» (рис. 14), $f_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{ОГ}}}{R}$ – частота сравнения, f – частота выходного колебания СЧ, F – частота отстройки.

Учитывая (1)-(4), было установлено, что расчётное значение СПМ ФШ выходного колебания СЧ на частоте $f = 8$ ГГц в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ составляет $S_{\text{СЧ}}(F) \approx -107.8$ дБн/Гц на отстройке $F = 100$ кГц от несущей (при $R = 1$, $f_{\text{ср}} = 100$ МГц, $N = 80$).

Из рис. 15 видно, что результаты измерений СПМ ФШ выходного колебания СЧ в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ подтверждают полученные расчётные данные. Аналогичная ситуация наблюдается и для других значений частоты выходного колебания СЧ в диапазоне от 6 до 12 ГГц включительно. Иными словами, разработанный ГУН позволил создать

на его основе источник колебаний сантиметрового диапазона, реализующий косвенный метод частотного синтеза и обеспечивающий перестройку частоты в диапазоне частот от 6 до 12 ГГц включительно. При этом измеренный уровень спектральной плотности мощности фазового шума (СПМ ФШ) выходного колебания такого СЧ согласуется с расчётными данными: например, на частоте $f = 8$ ГГц измеренное значение СПМ ФШ на отстройке 100 кГц от несущей не превосходит -106.4 дБн/Гц, тогда как рассчитанная величина данного параметра составляет -107.8 дБн/Гц.

В **Заключении** диссертации сформулированы достигнутые результаты и основные выводы по работе:

1. Определённая на основе результатов анализа линейного и стационарного режимов работы ГУН базовая структура сверхширокополосного перестраиваемого генератора сантиметрового диапазона, выполненного в рамках гибридной технологии, предполагает использование двух управляющих элементов (варикапов) в эмиттерной и базовой цепях активного элемента. Данная схема характеризуется не только относительно небольшим (по сравнению с однодиодной структурой) значением требуемого для обеспечения октавного диапазона перестройки коэффициента перекрытия по ёмкости k (при моделировании схемы ГУН в стационарном режиме работы для варианта с одним диодом $k \approx 6.3$, а с двумя – $k \approx 4.8$), но и меньшей сложностью реализации схемы, чем схема с тремя варикапами.
2. Усовершенствованная (в части учёта дополнительных потерь в измерительной установке, а также её возможной несимметричной структуры) модель исключаемых неоднородностей позволила в несколько раз уменьшить величину взвешенной разницы между измеренными и рассчитанными S-параметрами исследуемого устройства.
3. Проведённые экспериментальные исследования различных SMD-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, варикапов) позволили создать библиотеку их моделей, адекватным образом отражающих частотные характеристики данных электронных компонентов в рассматриваемом (сантиметровом) диапазоне волн. Так, для большинства номиналов рассмотренных SMD-компонентов максимальное значение разницы (на частоте 9 ГГц) между данными измерений и моделирования не превышает 12%, тогда как для варикапов данная разница составляет не более 10% во всем диапазоне частот от 3 до 15 ГГц, что соответствует погрешности определения резонансной частоты управляющих цепей ГУН не более (2-3)%.
4. Расширенная (в части разработки сложных выходных цепей) методика моделирования сверхширокополосных гибридных генераторов сантиметрового диапазона позволила определить вид нагрузочной цепи ГУН, обеспечивающий непрерывную перестройку в рассматриваемом диапазоне частот. Показано, что нагрузка должна быть комплексной с немонотонным характером изменения мнимой составляющей полного сопротивления в пределах полосы перестройки.
5. Использование при разработке сверхширокополосного ГУН, выполненного в рамках гибридной технологии, средств схемотехнического моделирования может приводить к существенным погрешностям. Так, например, разница между рассчитанными и измеренными значениями частоты генерации составляет не менее (0.6-0.9) ГГц, причём для некоторых вариантов ГУН результаты моделирования показывают их функционирование лишь в отдельных частях рассматриваемой полосы частот. Применение же результатов ЭМ моделирования топологии генератора позволяет существенным образом улучшить совпадение его характеристик, полученных в ходе моделирования, с данными измерений. Так, например, различие между реальными и рассчитанными с использованием результатов моделирования в АХИЕМ значениями частот выходного колебания ГУН не превосходит 400 МГц и в среднем составляет примерно 200 МГц. При этом наименьшее расхождение результатов измерений и моделирования гибридного ГУН сантиметрового диапазона обеспечивает использование при его разработке данных ЭМ моделирования в среде АХИЕМ.
6. Разработанный генератор обеспечивает сопоставимые (а в некоторых случаях превосходящие) параметры работы по сравнению с зарубежными аналогами (например,

НМС732LC4В): перестройка частоты в пределах от 6 до 12 ГГц при относительно небольшой неравномерности уровня мощности выходного колебания ($\Delta P_{\text{макс}} \approx 5$ дБ при среднем значении 3 дБм); не менее чем на 5-7 дБ большее подавление высших гармонических составляющих; СПМ ФШ около -95 дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей (при выполнении следующих условий: коллекторный ток не превосходит 30 мА, напряжение коллектор-эмиттер составляет не менее 3 В и коэффициент пропорциональности между величинами базового тока и тока в делителе порядка 25); не менее чем в 1.5 раза меньший уровень потребляемой мощности, не превосходящий 165 мВт.

7. Разработанный ГУН позволил создать на его основе источник колебаний сантиметрового диапазона, реализующий косвенный метод частотного синтеза и обеспечивающий перестройку частоты в пределах от 6 до 12 ГГц. При этом измеренный уровень спектральной плотности мощности фазового шума (СПМ ФШ) выходного колебания такого СЧ согласуется с расчётными данными: например, на частоте $f = 8$ ГГц измеренное значение СПМ ФШ на отстройке 100 кГц от несущей не превосходит -106.4 дБн/Гц, тогда как рассчитанная величина данного параметра составляет -107.8 дБн/Гц.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. СВЧ-модель бескорпусного резистора // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – № 5 (229). – С. 39-46.
2. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Особенности разработки сверхширокополосных перестраиваемых генераторов СВЧ диапазона в гибридном исполнении // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2017. – Т. 10 – № 4. – С. 41-50.
3. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Сверхширокополосный СВЧ-генератор, управляемый напряжением // Радиотехника. – 2018. – № 1. – С. 4-9.
4. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Проектирование широкополосного СВЧ-генератора, управляемого напряжением, на основе электромагнитного моделирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2019. – Т. 12. – № 1. – С. 34-43.
5. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Фазовый шум микрополоскового СВЧ-генератора с варакторной перестройкой частоты 6-12 ГГц // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2020. – Т. 13. – № 4. – С. 34-43.

Статьи в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень Scopus:

1. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. The features of chip resistors usage in hybrid microwave integrated circuits // Conference Proceedings – 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016). – 2017. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878855.
2. Malyshev V.M., Nikitin A.B., Khabitueva E.I. Use of Active Diode Converter for Linearizing of Characteristics of Microwave Generator with Wideband Tuning of Frequency // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018). – 2018. – Pp. 356-362. – DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542247.

3. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. Microwave Ultra-Wideband VCO Design // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018). – 2018. – Pp. 108-112. – DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542435.
4. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. A 6–12 GHz Wideband Hybrid VCO // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech 2018). – 2018. – Pp. 37-39. – DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564362.
5. Khabitueva E.I., Nikitin A.B. The PLL synthesizer based on 6-12 GHz wideband hybrid VCO // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1326(1). – DOI:10.1088/1742-6596/1326/1/012048.
6. Khabitueva E.I., Malyshev V.M., Nikitin A.B. Experimental Studies of the Wideband VCO's Tuning Characteristics Linearization Using an Active Diode Converter // Springer Proceedings in Physics. – 2020. – V. 255. – Pp. 615-619. – DOI: 10.1007/978-3-030-58868-7_67.
7. Khabitueva E.I., Malyshev V.M., Nikitin A.B. Phase Noise Measurement of the Microwave VCO with Linearized Wideband Tuning Characteristic // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2020). – 2020. – Pp. 85-87. – DOI: 10.1109/APEDE48864.2020.9255584.
8. Khabitueva E.I., Nikitin A.B., Okulov D.A. Comparison of Various EM Simulators in the Design of a Wideband Microwave VCO // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech 2020). – 2020. – Pp. 26-29. – DOI: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243996.

Статьи в сборниках материалов конференций, входящих в перечень РИНЦ:

1. Хабитуева Е.И., Никитин А.Б. Исследование сверхширокополосного перестраиваемого генератора сантиметрового диапазона волн // Материалы научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. – 2015. – С. 34-36.
2. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Характеристики чип-резисторов в СВЧ диапазоне // Материалы научного форума с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2015. – С. 25-27.
3. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Исключение влияния измерительного стенда при использовании векторного анализатора цепей // Труды XIII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП – 2016»: в 12 томах. Сер. "Метрология и метрологическое обеспечение". – 2016. – С. 129-132.
4. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Особенности построения сверхширокополосного микрополоскового СВЧ генератора, управляемого напряжением // Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2016. – С. 73-76.
5. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Широкополосный СВЧ генератор, управляемый напряжением // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции им. В.А. Солнцева «Проблемы СВЧ электроники - 2017». – 2017. – Т. 1. – № 3. – С. 89-90.
6. Хабитуева Е.И. СВЧ генератор с октавной перестройкой частоты для синтезатора с ФАПЧ // Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2018. – С. 38-41.
7. Хабитуева Е.И. Особенности электромагнитного моделирования широкополосного СВЧ генератора в среде АХИЕМ // Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ». – 2019. – С. 29-31.