

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт электроники и телекоммуникаций

На правах рукописи

Хабитуева Екатерина Исаковна

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

Направление подготовки: 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

Направленность: 11.06.01_01 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Автор работы: *Хабитуева Екатерина Исаковна*

Научный руководитель: *профессор, д.т.н.*

Цикин Игорь Анатольевич

Санкт-Петербург – 2021 г.

Научный доклад выполнен в Высшей школе прикладной физики и космических технологий (ВШПФиКТ) Института электроники и телекоммуникаций (ИЭиТ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Директор ВШ:

Гельгор Александр Леонидович
к.т.н, доцент

Научный руководитель:

Цикин Игорь Анатольевич
д.т.н., профессор

Рецензент:

Жуков Геннадий Анатольевич
Заслуженный конструктор РФ, к.т.н.,
доцент, советник Генерального
конструктора
ПАО «Интелтех» (г. Санкт-
Петербург)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общая характеристика работы	4
Содержание работы.....	11
1 Обобщённая модель сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн	11
2 Моделирование сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн в гибридном исполнении	17
3 Экспериментальное исследование сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн	23
Заключение	28
Список литературы	30
Публикации по теме представленных в данной работе исследований.....	33

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При создании источников стабильных колебаний сантиметрового диапазона волн, необходимых для работы различных устройств связи, радиолокации, навигации и т.д., в основном применяются синтезаторы частот (СЧ) с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), реализующие косвенный метод частотного синтеза и подразумевающие использование перестраиваемых по частоте генераторов (чаще всего – генераторов, управляемых напряжением (ГУН)) сантиметрового диапазона волн [1-6].

На сегодняшний момент выпускается широкий спектр подобных устройств, функционирующих в различных диапазонах частот и отличающихся величинами полос перестройки. Однако, количество ГУН, обеспечивающих сверхширокополосную (то есть с рабочей полосой не менее октавы) перестройку частоты выходного колебания в сантиметровом диапазоне волн, ограничивается сравнительно небольшим числом образцов, к которым, например, относятся интегральные микросхемы МАОС-409000 [7] и НМС732LC4В [8], перестраиваемые в пределах от 6 до 12 ГГц.

При этом информация об аналогичных генераторах, рассчитанных на работу в высокочастотной части сантиметрового диапазона волн и выполненных на основе более доступной (по сравнению с монолитными интегральными схемами (МИС)) гибридной технологии, в научной и научно-технической литературе практически полностью отсутствует.

Кроме того, в настоящее время существуют определённые трудности с получением из-за рубежа требуемой готовой продукции различного назначения, что связано с имеющимися ограничениями на поставку в РФ целого ряда электронных устройств и систем [9]. В то же самое время для создания ГУН, выполненных в виде МИС, необходимо наличие соответствующего дорогостоящего оборудования, отсутствующего у многих отечественных компаний-производителей радиотехнических устройств. При этом разработка таких устройств осложняется ещё и тем, что этапу изготовления реальных образцов должен предшествовать трудоёмкий процесс исследовательской и проектной деятельности, необходимый для создания итоговой топологии. При этом отсутствует возможность внесения оперативных корректив в схему устройства без существенного изменения всего цикла разработки. Как следствие, достаточно часто процесс создания новых устройств не удовлетворяет условиям жёстких временных рамок реального производства [10].

В связи с изложенным выше 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 при создании таких генераторов особое внимание необходимо уделить имеющимся особенностям рассматриваемого (сантиметрового) диапазона волн, связанным с ограничениями, касающимися возможности использования в схеме сверхширокополосного ГУН элементов с распределёнными параметрами (МПЛ элементов) вследствие значительного изменения их характеристик в пределах полосы перестройки. Применение же в указанном диапазоне частот дискретных элементов (например, SMD-компонентов) требует наличия данных о параметрах и характеристиках рассматриваемых компонентов, учитывающих существенное в сантиметровом диапазоне волн влияние т.н. «паразитных» параметров. Однако, как показывает опыт, несмотря на предоставляемую большинством компаний-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 многих типов и номиналов резисторов, в том числе относительно небольших размеров, специально предназначенных для создания различных высокочастотных устройств. Вследствие этого разработка ГУН требует для своего проведения большого объёма дополнительных исследований, связанных с измерением параметров используемых электронных компонентов [2, 11-15].

Объектом исследования в работе является сверхширокополосный (с полосой перестройки в пределах октавы и более) генератор сантиметрового диапазона волн, выполненный в рамках гибридной технологии с использованием стандартных серийно выпускаемых электронных компонентов.

Предметом исследования являются способы построения гибридных генераторов с полосой перестройки в пределах октавы и более в сантиметровом диапазоне волн.

Целью настоящей работы является исследование путей построения и разработка на их основе сверхширокополосных перестраиваемых генераторов сантиметрового диапазона волн, 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 сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн, а также формулирование требований, предъявляемых к его управляющим элементам (вариантам).

2. Проведение экспериментальных исследований характеристик SMD-компонентов и разработка библиотеки их моделей, необходимых для теоретического анализа стационарного режима работы перестраиваемого генератора.

3. Разработка модели сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн, 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 количества управляющих элементов и способа их включения в схему гибридного ГУН сантиметрового диапазона на характеристики генератора.

3. Разработана методика построения сверхширокополосных генераторов сантиметрового диапазона волн, 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 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 пределах октавы и более) перестройки ГУН в рассматриваемом диапазоне частот.

4. Разработанная на основе ЭМ анализа микрополосковой структуры ГУН модель перестраиваемого генератора демонстрирует хорошее совпадение 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 измерительного стенда методики обработки экспериментальных данных позволяет уточнить параметры SMD-компонентов генератора (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, варикапов) и разработать библиотеку моделей таких элементов, необходимую для разработки сверхширокополосных ГУН.

2. Моделирование стационарного режима перестраиваемого генератора и его экспериментальные исследования позволили определить конфигурацию схемы ГУН и значения её параметров, обеспечивающие октавную 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 дискретных 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 включительно.

Методология 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 (метод гармонической линеаризации, метод комплексных амплитуд и др.).

2. Электромагнитное (ЭМ) 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.

В результате проделанной в рамках данного исследования работы произведён синтез принципиальной электрической схемы сверхширокополосного генератора сантиметрового диапазона волн на основе упрощённых моделей библиотеки стандартных топологических примитивов (т.н. схемотехническое моделирование) с использованием различных методов анализа линейных и нелинейных электрических цепей: метода гармонической линеаризации, метода комплексных амплитуд и др.

При этом для определения параметров выходной согласующе-трансформирующей цепи, обладающей немонотонным характером изменения мнимой составляющей импеданса и обеспечивающей непрерывную перестройку частоты в пределах октавы и более в сантиметровом диапазоне волн, а также при разработке моделей электронных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, варикапов) использовалась процедура оптимизации с применением т.н. симплекс-метода (метода Нелдера-Мида).

Проведён электромагнитный (ЭМ) анализ топологии ГУН, базирующийся на методах моментов (в среде АХИЕМ) и конечных элементов (в среде Analyst). Причём (в результате сравнения эффективности и вычислительной сложности) установлено, что для разработки генератора после этапа схемотехнического моделирования для корректировки полученных результатов целесообразно применение данных, полученных при ЭМ моделировании ГУН в различных ЭМ средах.

Для проверки адекватности результатов моделирования ГУН были проведены исследования их реальных образцов, изготовленных в рамках рассматриваемой гибридной технологии.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование модели исключаемых неоднородностей, учитывающей дополнительные потери, а также возможную несимметричность структуры тестовой установки,

приводит к уменьшению (до нескольких раз) значения взвешенной разницы между измеренными и рассчитанными S-параметрами исследуемого устройства.

2. Созданная библиотека уточнённых моделей SMD-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, варикапов) адекватным образом описывает их реальные характеристики в сантиметровом диапазоне волн.

3. 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 волн с полосой перестройки частоты выходного колебания не менее октавы.

4. Развита в работе методика создания выходных согласующе-трансформирующих цепей с существенно немонотонным характером изменения мнимой составляющей импеданса позволяет построить нагрузочную цепь генератора сантиметрового диапазона волн, обеспечивающую непрерывную перестройку ГУН в полосе частот не менее октавы.

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 - 5 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-техническая 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 ноября – 19 декабря 2016 г.

6. III Всероссийская научно-техническая конференция им. В.А. Солнцева "Проблемы СВЧ электроники - 2017", Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова,

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 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. International Conference on Electrical Engineering and Photonics - IEEE EExPolytech-2018, 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 ноября – 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. Национальная научно-практическая конференция с международным участием для студентов, аспирантов и молодых исследователей из России, стран Ближнего и Дальнего Зарубежья «XLVIII Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 18 ноября – 23 ноября 2019 г.

12. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies, 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. International Conference on Electrical Engineering and Photonics - IEEE EExPolytech-2020, Congress Center of 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Обобщённая модель сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн

Для определения базовой структуры гибридного генератора с полосой перестройки в пределах от 6 до 12 ГГц, а также наиболее подходящих типов его активного (АЭ) и управляющих элементов (варикапов) в среде моделирования Microwave Office (MWO), входящей в состав автоматизированной системы AWR Design Environment (AWR DE) [16], было проведено исследование (в рамках как линейного, так и стационарного режимов работы АЭ) нескольких вариантов построения его схемы, отличающихся друг от друга количеством используемых в ГУН управляющих цепей: от одной до трёх соответственно.

Сравнительный анализ (основанный на использовании соотношений (1)-(3)) импедансных характеристик (а именно частотных зависимостей вещественной и мнимой составляющих полного сопротивления) нескольких типов АЭ ГУН (NESG3031M14 [17], VFU660F [18], BFR740L3RH [19] и т.д.) со стороны их коллекторных выводов при исследовании идеализированной модели генератора с одной управляющей цепью (рисунок 1) показал, что для получения октавной полосы перестройки частоты выходного колебания генератора сантиметрового диапазона волн наиболее подходящим является кремний-германиевый гетеропереходный биполярный транзистор NESG3031M14 [17], не только характеризующийся относительно низким уровнем фазовых шумов, но и обеспечивающий небольшое (менее 5) значение требуемого коэффициента перекрытия по ёмкости k ($k = C_{max}/C_{min}$, где C_{min} и C_{max} – минимальное и максимальное значения ёмкости варикапа).

$$\begin{cases} Re(Z_L) + Re(Z_{Ac}) = 0 \\ Im(Z_L) + Im(Z_{Ac}) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где Z_L – импеданс нагрузочной цепи в коллекторе АЭ ГУН, Z_{Ac} – входной импеданс АЭ генератора со стороны его коллекторных выводов.

В случае, когда выполняется соотношение $Im(Z_L) = 0$, условия, позволяющие приближённо оценить частоту генерации f , а также диапазон её перестройки, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} Re(Z_{Ac}(f)) < 0 \\ Im(Z_{Ac}(f)) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

При этом на частоте генерации f также должно выполняться условие:

$$\frac{\partial Im(Z_{Ac}(f))}{\partial f} > 0 \quad (3)$$

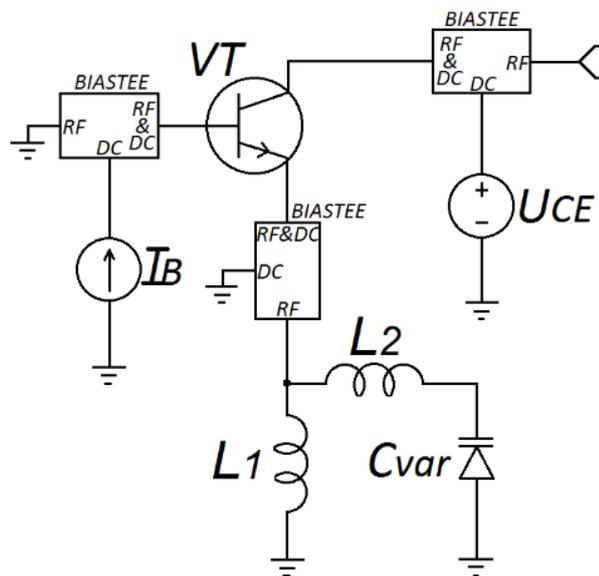


Рисунок 1 – Модель ГУН с одной управляющей цепью

Дальнейшие исследования схем ГУН (отличающихся количеством управляющих цепей и учитывающих влияние микрополосковых элементов топологии генератора, необходимых для соединения его компонентов) в линейном и стационарном режимах работы АЭ (в качестве которого применялся транзистор NESG3031M14 [17]), позволили установить, что при создании гибридного генератора диапазона 6-12 ГГц следует использовать структуру с двумя управляющими элементами в эмиттере и базе транзистора, не только отличающуюся относительно небольшим (по сравнению с однодиодной структурой) значением требуемого для обеспечения октавного диапазона перестройки коэффициента перекрытия по ёмкости k (в стационарном режиме для схемы с одним диодом $k \approx 6.3$, а с двумя – $k \approx 4.8$, рисунок 2), но и характеризующуюся меньшей сложностью реализации схемы и, соответственно, дальнейшего изготовления плат-образцов, чем схема с тремя варикапами.

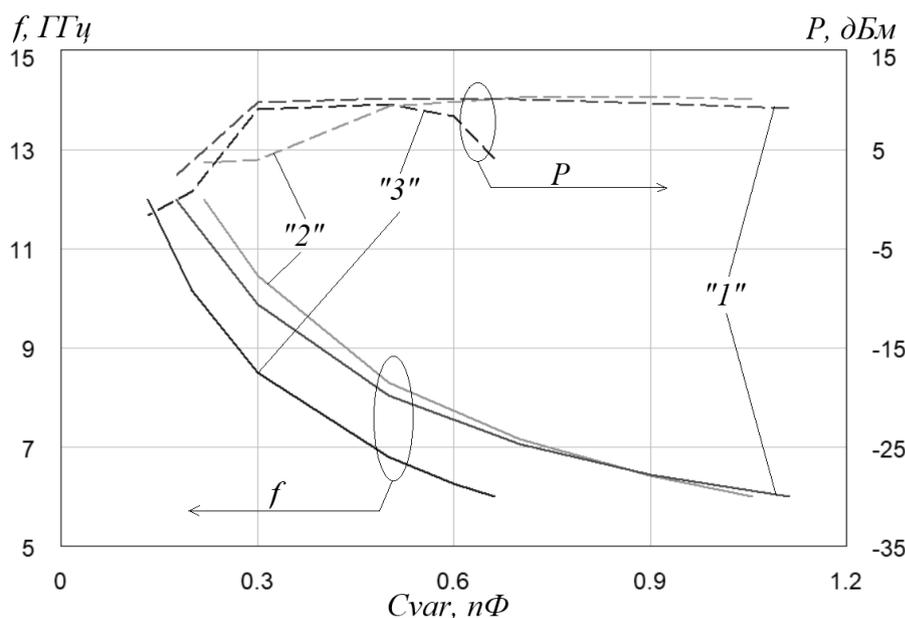


Рисунок 2 – Зависимости основных параметров (частоты и мощности) выходного колебания генератора от эквивалентной ёмкости варикапов: «1» – однодиодная модель генератора; «2» – двухдиодная модель генератора; «3» – трёхдиодная модель генератора

Кроме этого, для обеспечения перестройки частоты выходного колебания ГУН в рассматриваемом (сантиметровом) диапазоне волн требуется наличие варикапов с реализуемыми значениями эквивалентной ёмкости, не превосходящими 1 пФ, а в высокочастотной области указанного диапазона – лежащими в области значений менее 0.15 пФ [20]. Среди диодов, удовлетворяющих указанным требованиям, можно выделить варикапы компании MACOM серий MGV125 [21], обладающие рекордно малыми значениями ёмкостей (вплоть до 0.06 пФ), и MA46H120 [22], отличающиеся меньшими величинами параметра k (для MA46H120 $k \approx 6$ при изменении напряжения управления $U_{упр}$ в пределах от 1 до 15 В, а для MGV125 $k \approx 10$ при варьировании $U_{упр}$ в диапазоне от 2 до 20 В включительно), но при этом изготавливаемые в виде более удобных для монтажа flip chip элементов.

При этом следует отметить, что в рассматриваемых моделях ГУН (характеристики которых приведены на рисунке 2) использовались «идеальные» модели электронных компонентов (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности), а также упрощённые модели варикапов, не учитывающие т.н. «паразитные» параметры компонентов, способные оказать существенное влияние на характеристики всей схемы в рассматриваемом диапазоне частот. Как следствие, требуется проведение дополнительных исследований схем ГУН, направленных на разработку библиотеки моделей SMD-компонентов, адекватным образом отражающих их параметры в рассматриваемом (сантиметровом) диапазоне волн.

При этом процесс создания указанной библиотеки моделей электронных компонентов подразумевает проведение серии измерений их S-параметров, а также использование специальной методики исключения неоднородностей тестовой установки для приведения результатов измерений к плоскости выводов исследуемых компонентов. Для этого прежде всего необходимо определить конфигурацию модели исключаемых неоднородностей, учитывающую не только коаксиально-полосковые переходы, но и подводящие отрезки однородной МПЛ, а затем с помощью инструментов компьютерной обработки данных (в MWO – с помощью функции NEGATE) исключить из данных измерений вносимые возмущения [16, 23].

На рисунке 3а приведена рекомендуемая и чаще всего используемая на практике модель исключаемых неоднородностей [24], применение которой в ряде случаев может приводить к значительному увеличению величины взвешенной разницы δS между измеренными S-параметрами и параметрами модели тестовой установки с отрезком МПЛ (рисунок 3б), вследствие чего было принято решение о модернизации данной схемы (рисунок 3б).

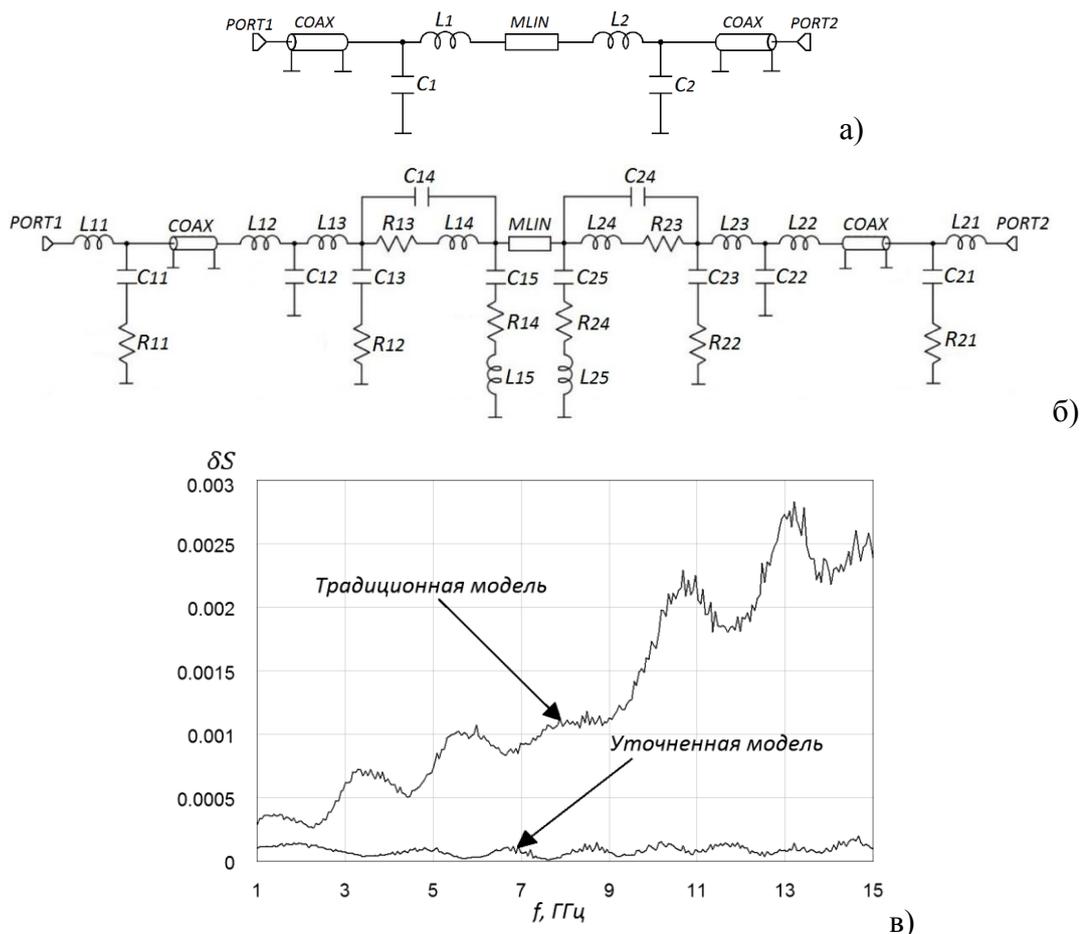


Рисунок 3 – Тестовая установка: (а) – традиционная модель исключаемых неоднородностей; (б) – уточнённая модель исключаемых неоднородностей; (в) – взвешенная разница между измеренными S-параметрами и параметрами модели тестовой установки с отрезком МПЛ

Приведённая на рисунке 3б уточнённая модель исключаемых неоднородностей (в отличие от т.н. традиционной модели, изображённой на рисунке 3а) учитывает не только потенциальные потери в самой тестовой установке (посредством использования элементов R_{ij}), но и возможные различия в геометрических и/или электрических параметрах коаксиально-полосковых переходов (с помощью несимметричности схемы). Как следствие, применение данной модели (в сравнении со случаем использования традиционной схемы) позволяет в несколько раз уменьшить значение параметра δS (рисунок 3в).

Использование данной уточнённой модели исключаемых неоднородностей (рисунок 3б) при обработке экспериментальных данных различных SMD-компонентов (например, резисторов и конденсаторов типоразмера 0201 от компаний Yageo [15] и Murata [25], катушек индуктивности типоразмера 0402 фирмы AVX [26], а также варикапов от MACOM) позволило скорректировать параметры их эквивалентных схем и создать библиотеку моделей электронных компонентов, адекватным образом описывающих их реальные характеристики в сантиметровом диапазоне волн.

В качестве примера на рисунке 4а приведена модель SMD-конденсатора типоразмера 0201 [25], а на рисунке 4б – частотные характеристики конденсатора ёмкостью 1.1 пФ.

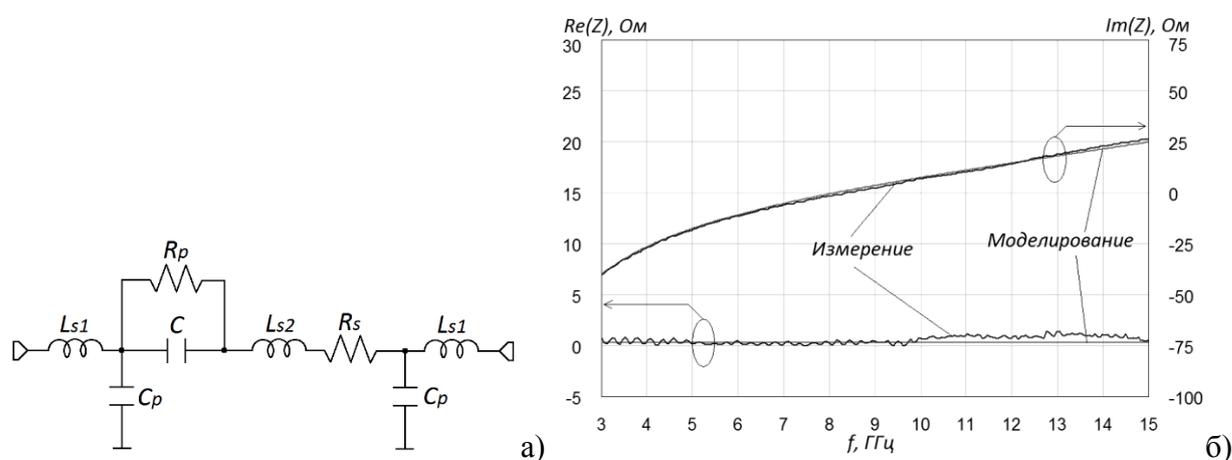


Рисунок 4 – SMD-конденсатор: (а) – уточнённая модель; (б) – импедансные характеристики конденсатора ёмкостью 1.1 пФ

На рисунке 4а « C » – собственно номинал SMD-конденсатора, « L_s »-, « C_p »-, « R_p »- и « R_s »-элементы – «паразитные» параметры, связанные с характеристиками корпуса и самого материала ($L_{s1} = 0.002$ нГн, $C_p = 0.036$ пФ, $L_{s2} = 0.341$ нГн, $R_p = 9.46 \cdot 10^8$ Ом, $R_s = 0.282$ Ом).

Полученные в результате серии экспериментальных исследований уточнённые модели электронных компонентов характеризуются относительно небольшими отклонениями их

параметров от реальных характеристик. Так, например, для большинства номиналов рассмотренных SMD-компонентов максимальное значение разницы между данными измерений и моделирования (на частоте 9 ГГц) 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)%.

2 Моделирование сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн в гибридном исполнении

С учётом описанных выше результатов дальнейшая разработка сверхширокополосного генератора сантиметрового диапазона волн связана с исследованием основных структурных элементов его схемы: цепей подачи смещения на варикап, управляющих цепей, а также выходной согласующе-трансформирующей цепи.

Исследование нескольких построенных в MWO колебательных систем с различными вариантами конфигурации схемы подачи смещения на варикап показало, что при разработке гибридного генератора диапазона 6-12 ГГц наиболее предпочтительной является схема подачи смещения на варикап, базирующаяся на приведении напряжения управления ГУН в точку между катодом диода (варикапа) и несколькими (не менее двух) конденсаторами, замыкающими высокочастотную составляющую на «землю». Данная схема обеспечивает значительное (до нескольких ГГц) увеличение полосы перестройки по сравнению с иными вариантами, а также характеризуется сравнительно большими значениями добротности и отсутствием «паразитных» резонансов.

Сравнительный анализ зависимостей резонансной частоты различных управляющих цепей (а именно последовательной и параллельной схем), от величины напряжения смещения, показал, что для обеспечения октавной полосы перестройки гибридного генератора сантиметрового диапазона волн следует использовать параллельную схему, характеризующуюся лучшими диапазонными свойствами, чем последовательная схема. При этом в качестве варикапов могут использоваться либо бескорпусные диоды MG125_08 и MG125_09, либо диоды MA46H120 [22], выпускаемые фирмой MACOM. Однако для обеспечения требуемого уровня технологичности производства разрабатываемого гибридного генератора сантиметрового диапазона волн на практике наиболее предпочтительным оказывается использование варикапов серии MA46H120 [22], изготавливаемых в виде удобных для монтажа flip chip компонентов.

Кроме этого, необходимо отметить, что применение ранее рассмотренных уточнённых моделей SMD-компонентов, а также учёт особенностей микрополосковой топологии генератора может сопровождаться не только значительным уменьшением величины модуля вещественной составляющей импеданса АЭ ГУН, но и увеличением нелинейности частотной зависимости его сопротивления в рассматриваемом диапазоне частот. В результате это может приводить к

существенному сужению диапазона перестройки вследствие нарушения условий генерации в некоторых областях рабочей полосы частот.

Одним из способов устранения данного негативного эффекта является определение конфигурации схемы выходной цепи ГУН сантиметрового диапазон волн, учитывающей нелинейный характер зависимости отрицательного сопротивления АЭ генератора от частоты и тем самым обеспечивающей выполнение условий генерации во всей рассматриваемой полосе частот.

С этой целью в среде моделирования MWO был проведён анализ стационарного режима работы ГУН на основе его упрощённых эквивалентных схем, приведённых на рисунке 5.

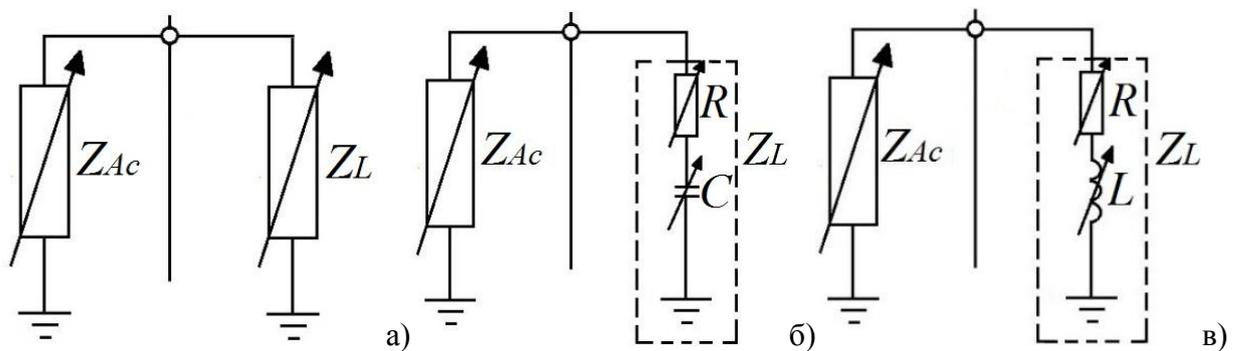


Рисунок 5 – Упрощённые эквивалентные схемы ГУН

В результате анализа в MWO стационарного режима работы ГУН, включающего в себя нагрузку « Z_L » (рисунок 5), было установлено, что зависимости импеданса выходной согласующей цепи ГУН от частоты должны обладать существенно немонотонным характером. Так, например, использование в генераторе, построенном на основе ранее выбранных варикапов МА46Н120 [22], нагрузки вещественного типа (рисунок 5а) не позволяет добиться непрерывной перестройки частоты в пределах от 6 до 12 ГГц, поскольку для поддержания генерации в рассматриваемой полосе частот требуется резистивная нагрузка с существенно нелинейной частотной характеристикой, что не представляется реально осуществимым на практике в октавном диапазоне частот сантиметрового диапазона волн.

Дальнейшие исследования показали, что для устранения указанной проблемы могут быть использованы выходные цепи генератора, в сопротивлении которых присутствует реактивная компонента (рисунок 5б и рисунок 5в), позволяющая реализовать режим автоколебаний при менее жёстких требованиях к вещественной составляющей импеданса нагрузки.

На рисунке 6 показаны границы допустимых областей изменения вещественной $Re(Z_L)$ и мнимой $Im(Z_L)$ составляющих полного сопротивления нагрузочной цепи ГУН.

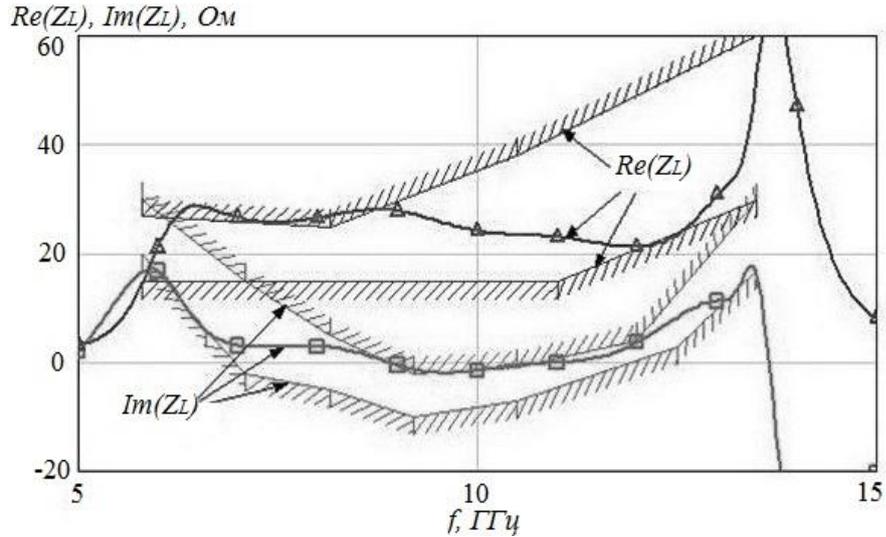


Рисунок 6 – Импедансные характеристики нагрузочной цепи генератора

Из рисунка 6 видно, что в нижней части диапазона вещественная составляющая $Re(Z_L)$ полного сопротивления нагрузки ГУН не должна превышать нескольких десятков Ом (лучше всего – находиться в пределах 20 Ом), в то время как в области 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 рабочих частот свой знак: в середине диапазона реактивность должна обладать емкостным характером, а на краях – индуктивным (рисунок 6).

В качестве примера на рисунке 7 приведена одна из возможных конфигураций выходной согласующе-трансформирующей цепи ГУН.

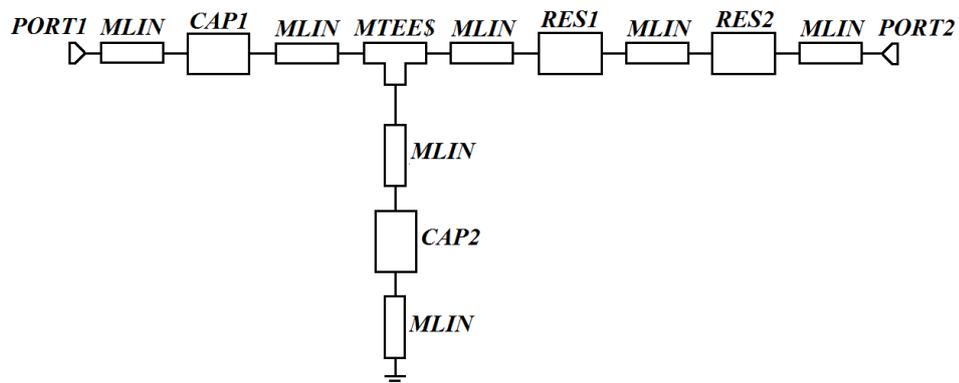


Рисунок 7 – Модель выходной цепи в MWO

На основе полученных результатов схемотехнического моделирования основных структурных элементов схемы ГУН (а именно цепей подачи смещения на варикап,

управляющих цепей, а также выходной согласующе-трансформирующей цепи) в среде моделирования MWO была разработана схема сверхширокополосного гибридного генератора сантиметрового диапазона волн, учитывающая особенности его микрополосковой топологии. При этом на первом этапе модель ГУН формировалась с использованием стандартных микрополосковых элементов библиотеки MWO, используемых при схемотехническом моделировании устройств.

На рисунке 8 приведена обобщённая эквивалентная схема ГУН, построенная в среде MWO.

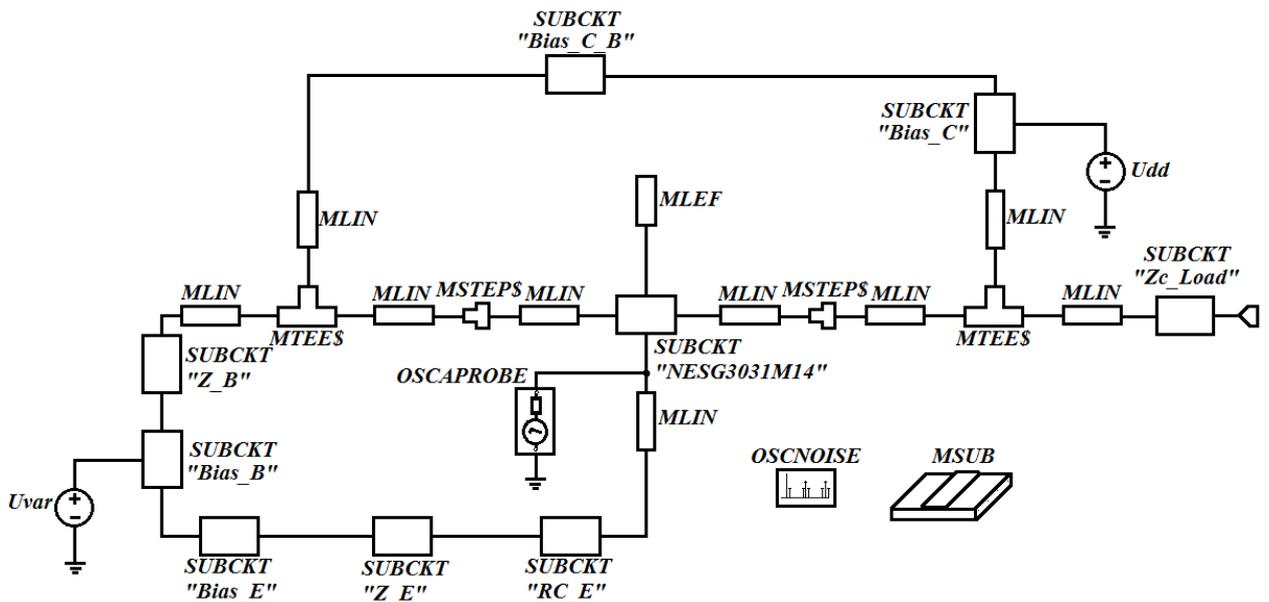


Рисунок 8 – Обобщённая эквивалентная схема ГУН в среде MWO

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 рисунке 9 приведена схема подачи смещения на транзистор ГУН.

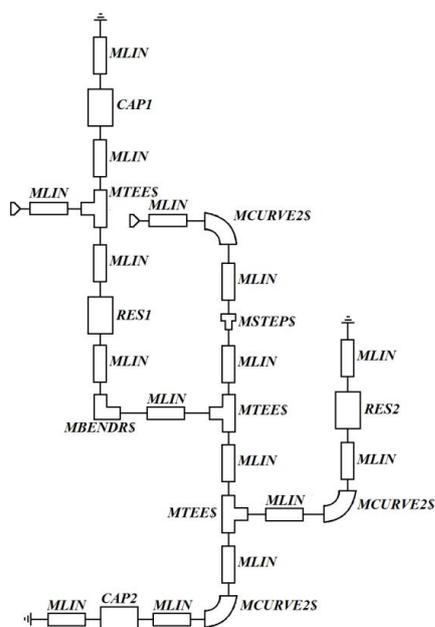


Рисунок 9 – Схема подачи смещения на транзистор генератора

Исследование стационарного режима работы схемы ГУН, приведённой на рисунке 8 (с несколькими значениями длины индуктивного шлейфа в эмиттерной цепи, а также различными вариантами номиналов используемых SMD-компонентов), показало, что применение при разработке сверхширокополосного гибридного генератора сантиметрового диапазона волн средств исключительно схемотехнического моделирования либо обеспечивает перестройку частоты в полосе, не превышающей (2-5) ГГц, либо характеризуется отсутствием генерации во всей рассматриваемой полосе частот.

Предварительные экспериментальные исследования реальных образцов ГУН показали несоответствие их результатов данным моделирования и, как следствие, потребовали уточнения последних. Поскольку при разработке микроволновой схемы генератора решалась задача размещения всех элементов ГУН на относительно небольшой плате стандартного размера (0.5"x0.5", или 12.7 мм x 12.7 мм), то топология микроволновой схемы автогенератора была реализована в условиях достаточно плотного поверхностного монтажа. Близкое расположение компонентов, а также относительно нестандартная микроволновая структура сформированной топологии может являться одним из источников наблюдаемых отличий при проведении схемотехнического моделирования в среде MWO. Как следствие, для адекватного описания в рассматриваемом частотном диапазоне микроволновой схемы ГУН требуется использование более точных моделей, чем те, что входят в стандартную библиотеку MWO.

В связи с этим для уточнения полученных в среде MWO результатов необходимо проведение дополнительных исследований с использованием более эффективного средства –

электромагнитного (ЭМ) моделирования, специально предназначенного для анализа планарных (и не только) устройств, в том числе сантиметрового диапазона волн.

В качестве примера на рисунке 10 приведена топология рассматриваемого генератора, построенная в среде ЭМ моделирования АХИЕМ, входящей в состав автоматизированной системы АWR DE [16].

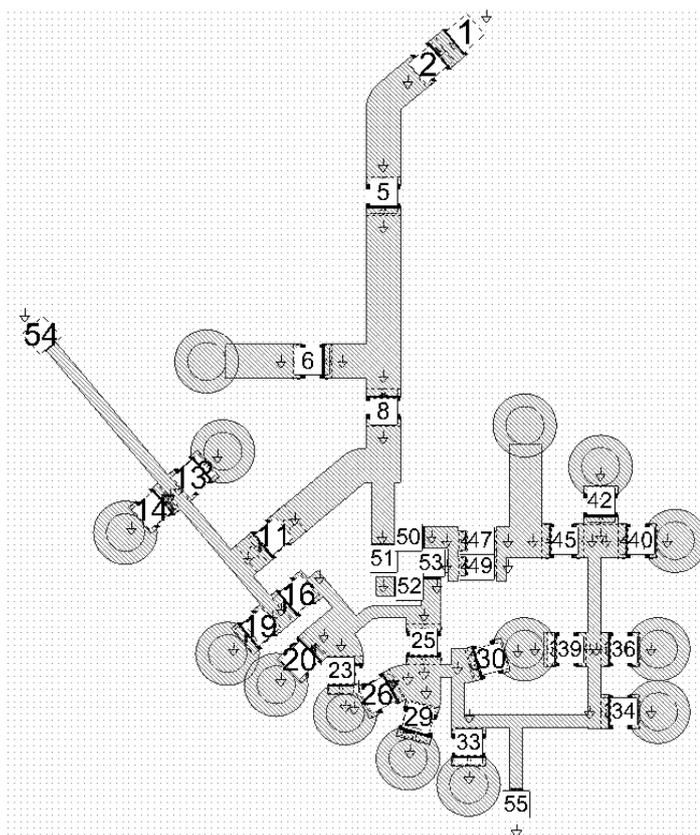


Рисунок 10 – Топология ГУН в АХИЕМ

Анализ стационарного режима работы ГУН, построенного с использованием результатов ЭМ моделирования, показал, что учёт результатов ЭМ анализа топологии генератора, например, в АХИЕМ обеспечивает полосу перестройки ГУН (Δf), близкую к требуемому значению: $\Delta f = 6$ ГГц в трёхсантиметровом диапазоне волн.

В связи с этим для проверки адекватности полученных результатов моделирования гибридного генератора сантиметрового диапазона волн требуется проведение серии экспериментальных исследований и измерений характеристик реальных образцов ГУН.

3 Экспериментальное исследование сверхширокополосного ГУН сантиметрового диапазона волн

Для проведения экспериментальных исследований характеристик ГУН были изготовлены несколько образцов генератора (с различными длинами индуктивного шлейфа l в эмиттерной цепи АЭ), фотография одного из которых приведена на рисунке 11.

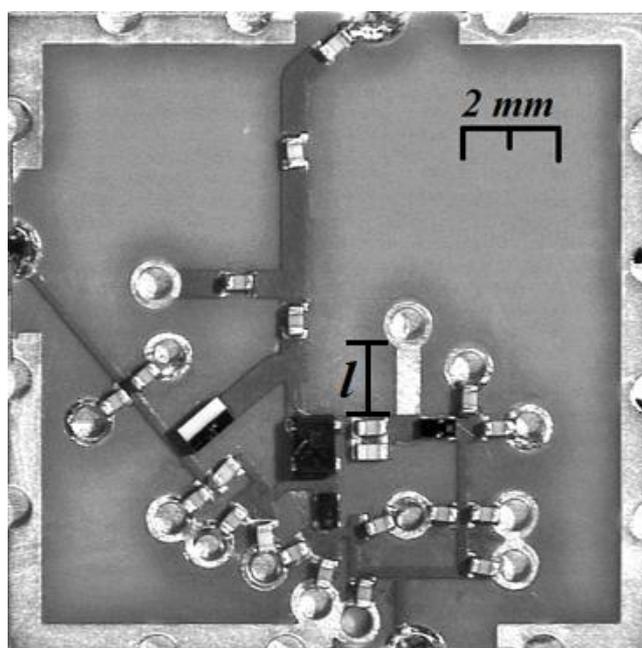


Рисунок 11 – Фотография платы ГУН

Данные макеты ГУН представляют платы стандартного размера 0.5"x0.5", или 12.7 мм x 12.7 мм, совместимые по своим габаритам с гибридными генераторами, выпускаемыми компаниями-производителями электронных компонентов и модулей [27].

В качестве примера на рисунке 12 приведены сравнительные графики для характеристик ГУН (с длиной индуктивного шлейфа $l = 1.5$ мм), полученных в результате моделирования и экспериментальных исследований. На данном рисунке: «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.

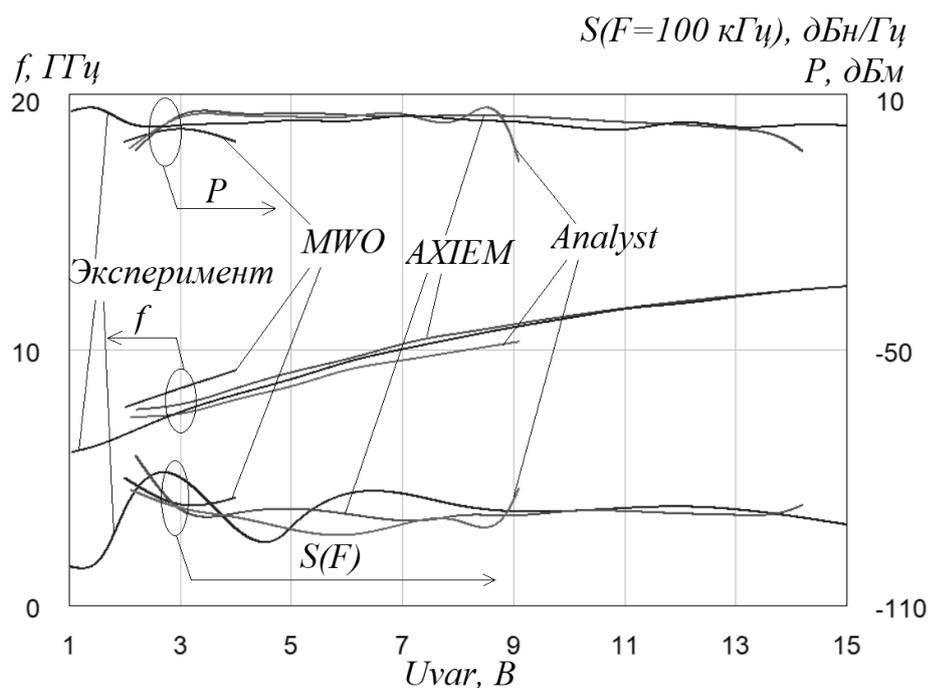


Рисунок 12 – Сравнительные графики для характеристик ГУН с $l = 1.5$ мм

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 около 0.9 ГГц (рисунок 12), причём в ряде случаев (для некоторых номиналов используемых SMD-компонентов) применение средств исключительно 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 AXIEM значениями частот выходного колебания ГУН не превосходит 400 МГц и в среднем составляет примерно 200 МГц (рисунок 12).

Поэтому после этапа схемотехнического моделирования с использованием встроенных в MWO элементов топологии для корректировки полученных результатов целесообразно применение данных, полученных при ЭМ моделировании ГУН в различных ЭМ средах. При этом наименьшее же расхождение результатов измерений и моделирования гибридного ГУН сантиметрового диапазона волн обеспечивает использование при его разработке данных ЭМ моделирования в среде AXIEM.

Разработанный генератор обеспечивает сопоставимые (а в некоторых случаях превосходящие) параметры работы по сравнению с зарубежными аналогами (например, НМС732LC4В [8]): 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); в несколько раз (не менее чем в 1.5 раза) меньший уровень потребляемой мощности (не более 165 мВт).

Для проверки работоспособности рассматриваемого ГУН диапазона 6-12 ГГц в составе стандартной петли ФАПЧ было проведено исследование СЧ с системой ФАПЧ, плата которого представлена на рисунке 13.

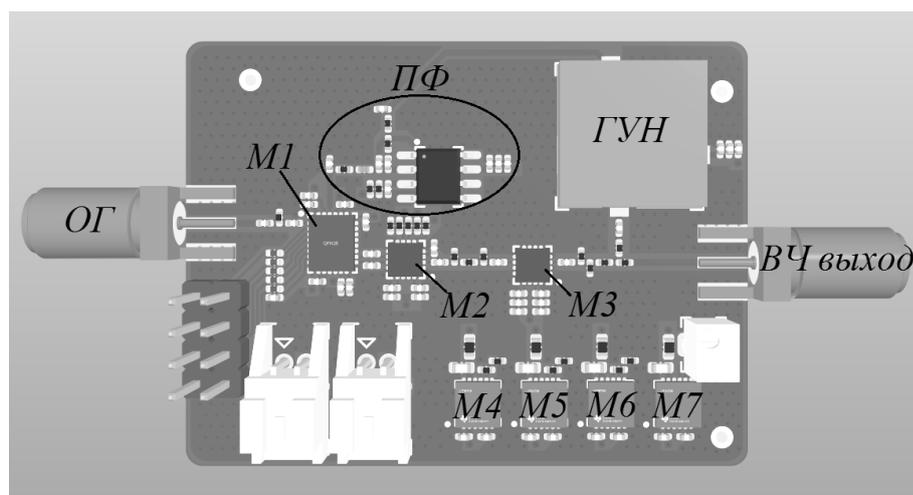


Рисунок 13 – СЧ с ФАПЧ

На рисунке 13 под символом «ОГ» подразумевается опорный генератор (ОГ), под «М1» – микросхема с встроенными частотно-фазовым детектором (ЧФД), делителями частоты и т.д., «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 и усилителя мощности, согласующие значения уровня мощности и диапазона используемых частот компонентов системы ФАПЧ.

В качестве примера на рисунке 14 приведены флуктуационные характеристики СЧ с ФАПЧ, построенного на основе разработанного ГУН 6-12 ГГц (рисунок 13), на частоте $f = 8$ ГГц.

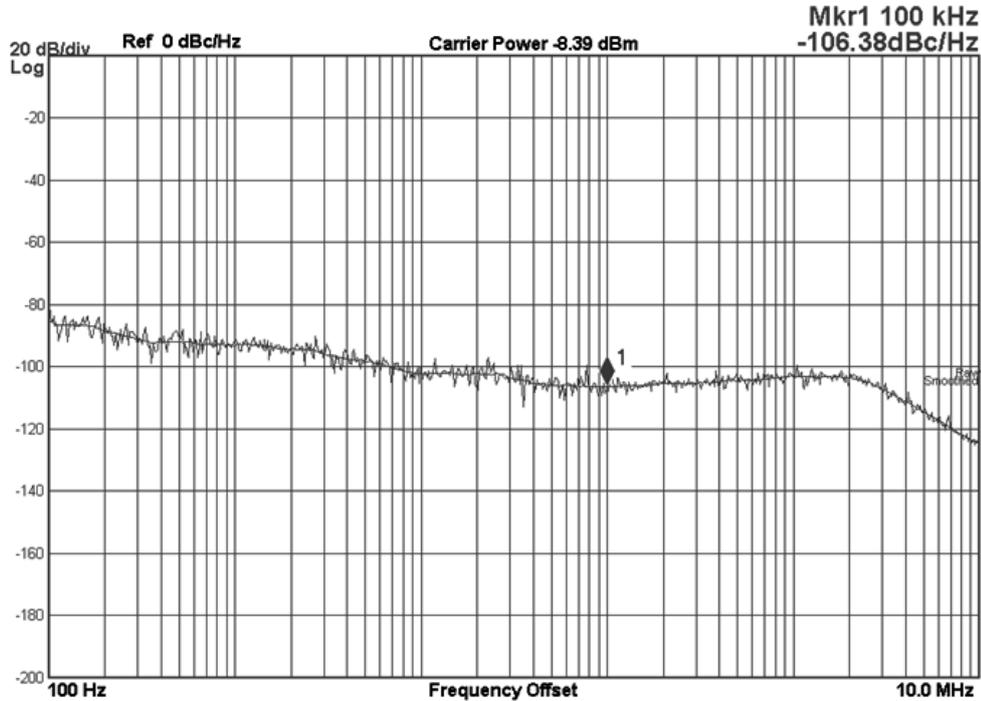


Рисунок 14 – Флуктуационные характеристики СЧ на $f = 8$ ГГц

Для оценки уровня СПМ ФШ в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ может быть использована следующая формула [6, 28, 29]:

$$S_{\text{СЧ}}(F) = 10 \lg(10^{S_{\text{ОГСЧ}}(F)/10} + 10^{S_{\text{СЧравн}}/10} + 10^{S_{\text{СЧфлик}}(F)/10}), \quad (4)$$

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» (рисунок 13), $S_{\text{СЧравн}}$ – внутриполосный фазовый шум микросхемы «М1» (рисунок 13), $S_{\text{СЧфлик}}(F)$ – внутриполосный фазовый $1/f$ шум микросхемы «М1» (рисунок 13).

При этом:

$$S_{\text{ОГСЧ}}(F) = S_{\text{ОГ}}(F) - 20 \lg(R) + 20 \lg(N), \quad (5)$$

$$S_{\text{СЧравн}} = S_{\text{СЧравн_норм}} + 20 \lg(N) + 10 \lg(f_{\text{ср}}), \quad (6)$$

$$S_{\text{СЧ}_{\text{флик}}}(F) = S_{\text{СЧ}_{\text{флик_норм}}} + 20 \lg(f) - 10 \lg(F), \quad (7)$$

где $S_{\text{СЧ}_{\text{равн_норм}}}$ – нормированный внутриполосный фазовый шум микросхемы «MI» (рисунок 13), $S_{\text{СЧ}_{\text{флик_норм}}}$ – нормированный внутриполосный фазовый $1/f$ шум микросхемы «MI» (рисунок 13), $f_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{оп}}}{R}$ – частота сравнения, f – частота выходного колебания СЧ, F – частота отстройки.

Учитывая (4)-(7), 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 100 кГц от несущей.

Из рисунка 14 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённых исследований получены следующие основные результаты:

1. Определённая на основе результатов анализа линейного и стационарного режимов работы ГУН базовая структура сверхширокополосного гибридного генератора сантиметрового диапазона волн подразумевает использование двух управляющих элементов в эмиттере и базе АЭ. Данная схема характеризуется не только относительно небольшим (по сравнению с однодиодной структурой) значением требуемого для обеспечения октавного диапазона перестройки коэффициента перекрытия по ёмкости k (в стационарном режиме для схемы 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 тестовой 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 SMD-компонентов позволили создать библиотеку их моделей, адекватным образом отражающих частотные характеристики компонентов в рассматриваемом (сантиметровом) диапазоне волн. Так, для большинства номиналов рассмотренных электронных 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 ГУН сантиметрового диапазона волн позволила определить вид нагрузки автогенератора, 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 генератора сантиметрового диапазона волн, 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 же расхождение результатов измерений и моделирования гибридного ГУН сантиметрового диапазона волн 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); в несколько раз (не менее чем в 1.5 раза) меньший уровень потребляемой мощности (не более 165 мВт).

7. Разработанный сверхширокополосный ГУН сантиметрового диапазона волн позволил создать на его основе сверхширокополосный источник колебаний, реализующий косвенный метод частотного синтеза и обеспечивающий перестройку частоты в пределах 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 (при $f_{\text{ср}} = 100$ МГц) измеренное значение СПМ ФШ при отстройке 100 кГц от несущей не превосходит -106.4 дБн/Гц, тогда как рассчитанная величина данного параметра составляет -107.8 дБн/Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaikin S.E. Theory of Oscillators: Adiwes International Series in Physics. – Elsevier Science, 2013. – 762 p.
2. Grebennikov A.V. RF and Microwave. Transistor Oscillator Design/A.V. Grebennikov. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007. – 441 p.
3. Rohde U.L., Poddar A.K., Bock G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications: Theory and Optimization. – John Wiley & Sons, Ltd., 2005. – 542 p.
4. Abrie P.L.D. Design of RF and Microwave Amplifiers and Oscillators. – Artech House Publishers, 1999. – 480 p.
5. Глазов Г.Н., Горевой А.В. Методы измерений на СВЧ: т.2 Управляемые генераторы СВЧ. – Томск: ЗАО «Издательство «Красное знамя», 2015. – 1016 с.
6. Chenakin A.V. Frequency Synthesizers: Concept to Product. – ARTECH HOUSE, INC., 2011. – 305 p.
7. MAOC-409000. Broadband Voltage Controlled Oscillator 6-12 GHz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/893810/MA-COM/MAOC-409000.html>.
8. HMC732LC4B. Wideband MMIC VCO with buffer amplifier 6–12 GHz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/hmc732.pdf>.
9. Кочемасов В.Н., Строганова Е.П. Электронные компоненты иностранного производства. Ограничение экспорта в Россию/В.Н. Кочемасов, Е.П. Строганова//Электроника НТБ. – 2013. – № 1. – С. 125-129.
10. Гнатюк Д.Л. Моделирование и проектирование монолитных интегральных схем малошумящих усилителей диапазона крайне высоких частот: дис. ...канд. техн. наук: 05.27.01/Гнатюк Дмитрий Леонидович. – М., 2012. – 122 с.
11. Stauffer G.H. Finding the Lumped Element Varactor Diode Model/G.H. Stauffer//High Frequency Electronics. – 2003. – V. 2. – № 6. – Pp. 22-28.
12. Sun W. Accurate EM Simulation of SMT Components in RF Designs/W. Sun//Proceedings of the 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). – 2017. – Pp. 140-143.
13. Малышев В.М., Матвеев Ю.А., Никитин А.Б., Худяков А.В. Выбор варактора для широкополосного перестраиваемого генератора СВЧ//Материалы Междунар. науч.-техн. конф.

«Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014)». – 2014. – Т. 1. – С. 34-41.

14. Bahl I.J. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. – Artech House, Inc., 2003. – 488 p.

15. High Precision High Stability Thin Film Chip Resistor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yageo.com/en/Product/Index/rchip/thin_film/rt.

16. AWR Design Environment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.awr.com/software/products/awr-design-environment>.

17. NESG3031M14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cel.com/parts.do?command=load&idRootPart=566>.

18. BFR740L3RH. NPN wideband silicon RF transistor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFR740L3RH.pdf>.

19. BFR740L3RH. SiGe:C NPN RF bipolar transistor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFR740L3RH-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d46265f064ff01663896ffd44ecb.

20. Малышев В.М., Матвеев Ю.А., Никитин А.Б., Худяков А.В. Модель варикапа для разработки сверхширокополосных перестраиваемых генераторов СВЧ//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. - № 2 (193). – С. 55-60.

21. MGV125-x Series. GaAs Hyperabrupt Varactor Diodes 1.25 Constant Gamma [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn.macom.com/datasheets/MGV125-x%20Series.pdf>.

22. MA46H120 Series. GaAs Constant Gamma Flip-Chip Varactor Diode [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn.macom.com/datasheets/MA46H120%20Series.pdf>.

23. Niebel M. Основы векторного анализа цепей / Пер. с англ. Смольского С.М. под ред. Филипп У. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 500 с.

24. Agilent De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer. Application Note 1364-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://anlage.umd.edu/Microwave%20Measurements%20for%20Personal%20Web%20Site/5980-2784EN.pdf>.

25. High Q Chip Multilayer Ceramic Capacitors for General Purpose GJM Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://psearch.en.murata.com/capacitor/lineup/gjm/>.

26. L0402 Tight Tolerance RF Inductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datasheets.avx.com/l0402lga.pdf>.

27. Voltage Controlled Oscillator (VCO) Products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zcomm.com/products/voltage-controlled-oscillator-vco/>.

28. LTC6947. Ultralow Noise 0.35GHz to 6GHz Fractional-N Synthesizer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6947f.pdf>.

29. Fractional-N PLL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11183#/p6694=|No>.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ДАННОЙ РАБОТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

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//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. – 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. – DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542435.

4. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. A 6–12 GHz Wideband Hybrid VCO//2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – 2018. – DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564362.

5. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. The PLL synthesizer based on 6-12 GHz wideband hybrid VCO//International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2019). – 2019. – DOI:10.1088/1742-6596/1326/1/012048.

6. Malyshev V.M., Nikitin A.B., Khabitueva E.I. Experimental Studies of the Wideband VCO's Tuning Characteristics Linearization Using an Active Diode Converter//International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2020). – 2020. – DOI: 10.1007/978-3-030-58868-7_67.

7. Malyshev V.M., Nikitin A.B., Khabitueva E.I. 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. – 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//2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – 2020. – 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 научного форума с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2015. – С. 34-36.

2. Хабитуева Е.И., Никитин А.Б. 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. Хабитуева Е.И., Никитин А.Б. 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. Хабитуева Е.И., Никитин А.Б. 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. Хабитуева Е.И., Никитин А.Б. Широкополосный СВЧ генератор, управляемый напряжением//Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева 2017». – 2017. – 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». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2019. – С. 29-31.

Аспирант Хабитуева Екатерина Исаковна