

DOI: 10.18721/JCSTCS.12104
УДК 621.373

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА, УПРАВЛЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЕМ, НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Б. Никитин, Е.И. Хабитуева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты разработки широкополосного перестраиваемого генератора сантиметрового диапазона волн на основе электромагнитного моделирования (ЭМ) его топологической структуры в среде AXIEM системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств NI AWR DE. Рассмотрены основные особенности моделирования топологии широкополосного ГУН в среде AXIEM. На основе экспериментальных исследований разработанного генератора проведен сравнительный анализ возможностей электромагнитного и схемотехнического моделирования с помощью системы NI AWR DE. Показано, что использование ЭМ-анализа в процессе разработки широкополосных перестраиваемых генераторов позволяет существенно повысить точность моделирования.

Ключевые слова: ГУН, СВЧ, моделирование, электромагнитный анализ, AXIEM.

Ссылка при цитировании: 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. DOI: 10.18721/JCSTCS.12104.

DESIGN FOR MICROWAVE WIDEBAND VCO BASED ON ELECTROMAGNETIC SIMULATION

A.B. Nikitin, E.I. Khabitueva

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

This article describes the results of designing a microwave wideband voltage-controlled oscillator (VCO) by using electromagnetic (EM) simulation. EM simulation is carried out in AXIEM, which is included in AWR Design Environment of National Instruments (NI AWR DE). The main features of VCO design using AXIEM are considered. The study analyzed the comparative possibilities of electromagnetic and circuit simulation with the help of NI AWR DE. Analysis was based on the experimental studies of the developed oscillator. It is shown that EM analysis can significantly improve the accuracy of modeling compared with design in Microwave Office (MWO, system of circuit simulation).

Keywords: VCO, microwave, modeling, electromagnetic analysis, AXIEM.

Citation: Nikitin A.B., Khabitueva E.I. Design for microwave wideband VCO based on electromagnetic simulation. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 1, Pp. 34–43. DOI: 10.18721/JCSTCS.12104.

Введение

При создании широкодиапазонных, обладающих высоким быстродействием источников стабильных колебаний сантиметрового диапазона волн широко используются синтезаторы частот (СЧ) с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), одним из ключевых элементов которых является широкополосный (с полосой перестройки в пределах октавы и более) СВЧ-генератор, управляемый напряжением (ГУН) [1–4]. Получение требуемых рабочих характеристик перестраиваемого в октавном диапазоне ГУН в существенной степени зависит от используемой модели генератора. Наличие модели, в полной мере отображающей работу исследуемого устройства, делает процесс проектирования более эффективным, сокращая количество необходимых этапов экспериментальных исследований макетов создаваемого объекта. Проблема разработки адекватной модели особенно актуальна для СВЧ-устройств в гибридном исполнении, сочетающих в себе как дискретные компоненты, так и элементы с распределенными параметрами. Это обстоятельство, а также сверхширокие полосы перестройки (октава и более) и особенности рассматриваемого сантиметрового диапазона, требующие учета влияния на характеристики устройства неоднородностей, возникающих при изменении топологии микрополосковой схемы, а также в местах подключения к отрезкам микрополосковых линий (МПЛ) дискретных компонентов, делают задачу построения модели СВЧ ГУН актуальной и практически значимой.

Современные системы автоматизированного проектирования электронных устройств позволяют проводить моделирование устройств, работающих в том числе в СВЧ-диапазоне [5–8]. Одной из наиболее широко используемых и популярных у разработчиков систем такого рода является пакет AWR Design Environment (AWR DE) от компании National Instruments [6]. Эта система имеет в своем составе библиотеку стандартных электронных компонентов и топологических элементов микрополосковых схем, а также симуляторы для проведе-

ния электромагнитного (ЭМ) анализа исследуемой структуры. С помощью AWR DE можно осуществлять как схемотехническое моделирование электронных устройств на основе эквивалентных схем, так и моделирование на основе ЭМ-анализа топологических структур. Особенности различных способов моделирования электронных устройств в системах автоматизированного проектирования, сравнение методов схемотехнического и ЭМ-анализа рассматриваются в ряде работ, однако в качестве практических примеров реализации моделируемых устройств в них выступают, как правило, пассивные СВЧ-цепи, например, микрополосковые фильтры [5, 9–13].

При этом, как показывает практика, использование для построения широкополосного СВЧ ГУН инструментов исключительно схемотехнического моделирования, например, системы Microwave Office (MWO) пакета AWR DE, может приводить к расхождениям с результатами экспериментальных исследований [14]. Данное обстоятельство, по-видимому, обусловлено тем фактом, что элементы схемы, выполненные на основе отрезков МПЛ, а также неоднородности, возникающие в местах соединений линий и изменения их геометрии, учитываются с помощью стандартных моделей, входящих в библиотеку MWO и не в полной мере отображающих особенности рассматриваемого диапазона частот. Поэтому исследование путей построения адекватной модели широкополосного СВЧ-генератора, учитывающей топологические особенности его структуры, является актуальной и практически значимой задачей. В данной статье описывается методика моделирования широкополосного ГУН сантиметрового диапазона волн с октавной перестройкой частоты (6–12 ГГц), базирующаяся на ЭМ-анализе топологической схемы генератора.

Моделирование ГУН в MWO

В [14, 15] описана методика создания широкополосного СВЧ-генератора, рассчитанного на работу в диапазоне частот

от 6 до 12 ГГц. Исследования проводились на базе системы автоматизированного схемотехнического моделирования Microwave Office (MWO), входящей в состав пакета AWR Design Environment (AWR DE) и предназначенной для проектирования различных СВЧ-устройств на основе стандартных элементов, реализуемых в том числе в виде линий различного типа (например, МПЛ) [6].

С помощью элементов библиотеки MWO формировалась не только электрическая схема генератора, но и его топология, представляющая собой достаточно «сложную» с точки зрения геометрической формы структуру, включающую в себя неоднородности различного типа. При этом модели используемых дискретных компонентов уточнялись на основе проведенных в СВЧ-диапазоне измерений их S -параметров.

Измерение частотных характеристик данных макетов выявило расхождения с результатами схемотехнического моделирования, выполненного на основе библиотеки стандартных компонентов микрополосковых элементов AWR DE [6, 14, 15]. Так, диапазон перестройки частоты выходного колебания разработанного ГУН оказался сдвинут вниз по сравнению с данными моделирования на величины, превышающие 0,5 ГГц. Как следствие, для обеспечения перестройки частоты выходного колебания ГУН в заданном диапазоне частот (в пределах от 6 до 12 ГГц) потребовалось внесение корректив в определение номиналов используемых компонентов для поверхностного монтажа.

Поскольку модели применяемых электронных компонентов (SMD-резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности) были получены на основе измеренных в СВЧ-диапазоне их S -параметров, естественно предположить, что наблюдаемые различия между результатами измерений и компьютерного моделирования скорее всего связаны с особенностями моделирования топологии генератора в используемой системе автоматизированного проектирования. То есть модель генератора, созданная в MWO на основе встроенной библиотеки

стандартных элементов, не в полной мере отражает реальные характеристики микрополосковой структуры ГУН в сантиметровом диапазоне волн. Поэтому для уточнения модели ГУН при его проектировании были применены иные методы анализа, основанные на расчете электромагнитных полей – так называемое ЭМ-моделирование.

Моделирование ГУН в AXIEM

В качестве симулятора ЭМ-анализа задействован встроенный в пакет AWR DE инструмент AXIEM, предназначенный для моделирования планарных СВЧ-устройств [6, 9].

Для расчета токов в проводниках в AXIEM используется так называемый метод моментов, или «планарный 3D-метод», основанный на исследовании функций Грина. Выбор данного ЭМ-симулятора обусловлен следующими причинами [6].

В отличие от другого, имеющегося в составе AWR DE инструмента ЭМ-анализа EMSight, в AXIEM нет ограничений на встраивание топологической структуры в сетку. Иными словами, исследуемый объект не обязательно должен точно «вписываться» в геометрическую сетку, как это было реализовано в EMSight. В результате отсутствует необходимость в уменьшении шага сетки с целью «привязки» к ней «сложной» топологии устройства, а значит, при прочих равных условиях может быть уменьшено время проведения анализа. При этом в AXIEM отсутствует обязательный для EMSight прямоугольный корпус, определяющий границу анализа топологии, что позволяет располагать внешние порты устройства под различными углами.

Кроме того, в AXIEM возможен учет геометрических размеров «разрывов» в отрезках МПЛ, предназначенных для установки компонентов для поверхностного монтажа и способных оказать существенное влияние на характеристики всего СВЧ-устройства.

При моделировании разработанного ГУН в среде AXIEM формировалась его топология (рис. 1).

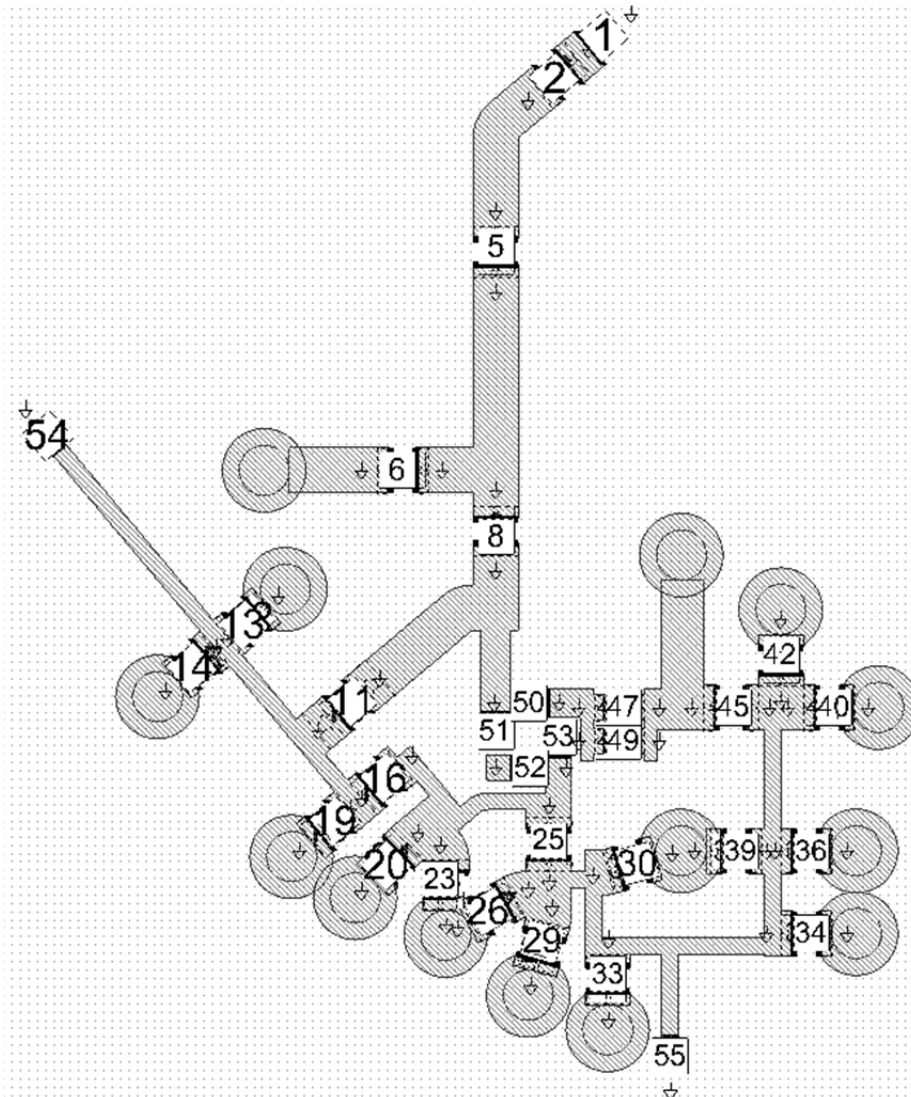


Рис. 1. Топология генератора в AXIEM
 Fig. 1. Oscillator EM-layout in AXIEM

Поскольку по умолчанию при моделировании в AXIEM устанавливаются проводники «нулевой» (бесконечно малой) толщины [6], то для проведения корректного ЭМ-анализа рассматриваемого генератора указывалась толщина слоя металлизации и тип используемого материала.

В «разрывы» отрезков МПЛ устанавливались специальные порты, необходимые для подключения различных компонентов для поверхностного монтажа (SMD-резисторов, конденсаторов, транзисторов, варикапов и т. д.) Поскольку рекоменда-

ции по выбору типов портов и их параметров, имеющиеся в различных источниках, посвященных особенностям ЭМ-анализа микрополосковых СВЧ-устройств, нередко неоднозначны, а иногда и противоречивы (например [6, 9]), то для уточнения влияния выбора используемых в AXIEM портов на получаемые результаты были проведены дополнительные исследования.

Результаты моделирования показали, что для рассматриваемой топологии ГУН в качестве портов для подключения компонентов генератора целесообразно применять так

называемые «краевые» порты, позволяющие проводить процедуру исключения неоднородностей (de-embedding), исключая влияние на характеристики устройства неоднородностей самого порта [6].

С этой целью в параметрах порта необходимо указать плоскость заземления (в рассматриваемом случае в качестве такой плоскости выступает нижний слой платы ГУН). Подобная конфигурация (четко определенный тип заземления) также позволяет сдвигать референсные (отсчетные) плоскости порта на необходимое расстояние от края проводника. Без явного заземления проведение указанной процедуры невозможно.

Кроме того, «краевые порты» (рис. 2 б) также позволяют учитывать геометрические размеры зазоров в отрезках МПЛ, предназначенных для подключения SMD-компонентов (рис. 2 а), в отличие, например, от так называемых «внутренних» портов (рис. 2 в).

Учет влияния соседних портов в процессе исключения неоднородностей можно осуществлять с помощью процедуры объединения портов в группы (метод Mutual Groups [6]). Однако проведенные исследо-

вания показали, что использование подобного способа исключения неоднородностей оказалось менее продуктивным по сравнению с методом, используемым для отдельного краевого порта (Single Line [6]).

В результате была разработана ЭМ-модель микрополосковой структуры генератора, в которой для подключения компонентов ГУН использовались краевые порты с опцией явного заземления. При этом общее количество таких портов, определяемое требуемым числом выводов для подключения навесных дискретных компонентов, в рассматриваемом случае достигает величин, превышающих 50 (см. рис. 1). На основе ЭМ-анализа данной структуры в АХИЕМ была сформирована матрица ее S -параметров, которая далее импортировалась в систему схемотехнического моделирования (в данном случае – в MWO) в качестве подсхемы с N портами (рис. 3 а).

В MWO к выводам такой подсхемы подсоединялись модели используемых дискретных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и т. д.), полученные в результате измерений их S -параметров в сантиметровом диапазоне волн – элементы P_1, \dots, P_m (рис. 3 а).

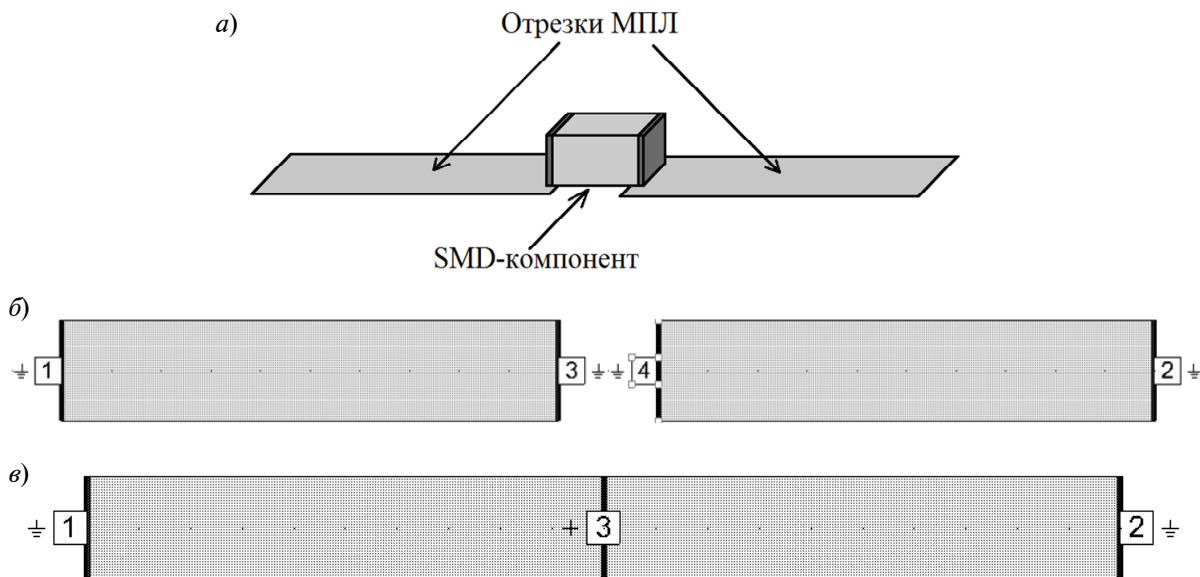


Рис. 2. Конфигурации портов для подключения навесных компонентов
Fig. 2. Port configurations for SMD-components

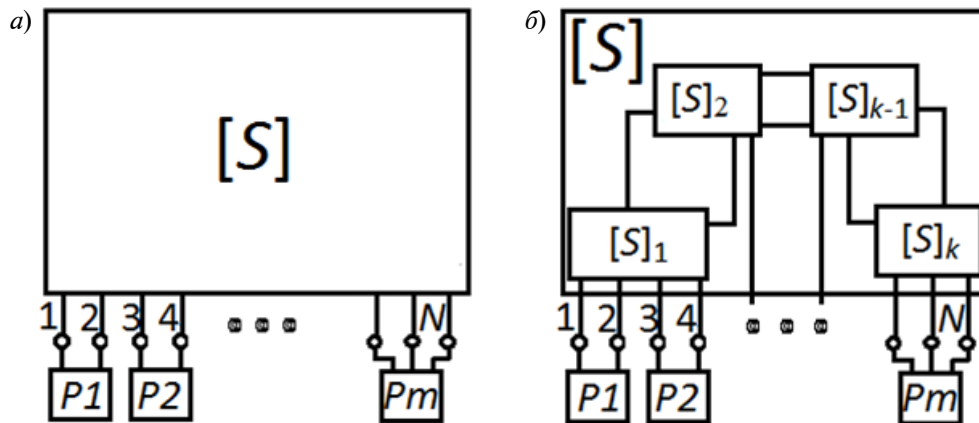


Рис. 3. Эквивалентная схема ГУН
 Fig. 3. VCO's equivalent schematic

В результате при таком способе проектирования модель микрополосковой структуры генератора формируется с помощью ЭМ-анализа в системе АХИЕМ, в отличие от методики, основанной на схемотехническом моделировании его микрополосковой схемы с использованием стандартной библиотеки топологических компонентов MWO и представленной в [14, 15].

В процессе проектирования рассматривались различные варианты построения модели генератора, отличающиеся способом формирования S -матрицы микрополосковой структуры генератора:

- S -матрица, полученная в результате ЭМ-анализа единой N -портовой структуры (рис. 3 а);
- разбиение при ЭМ-анализе топологии на отдельные функциональные части, на основе моделирования которых комплектуется результирующая S -матрица микрополосковой структуры генератора (рис. 3 б).

Следует отметить, что второй вариант формирования модели ГУН продемонстрировал на практике лучшее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Так, например, если отделить цепи подачи смещения и питания от ВЧ-цепей (рис. 4), можно добиться разницы между измеренной полосой перестройки и ее расчетным значением, не превосходящей величин порядка

4 %, при расхождении в значениях средней частоты диапазона не более 2 %.

Кроме того, при наличии в структуре СВЧ-генератора однотипных элементов подобное разбиение топологии может существенно сократить время анализа, а значит, и всего процесса проектирования в целом.

Дальнейшее разбиение топологии генератора на подсхемы при ЭМ-моделировании (например, разделение цепей подачи питания на транзистор и управляющего смещения на варикапы) не приводит к существенному улучшению получаемых результатов.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными проводилось на основе исследования генератора, построенного на базе малошумящего SiGe-транзистора по схеме с двумя варикапами в базовой и эмиттерной цепях [14, 15]. Макет такого ГУН, выполненного по гибридной технологии на плате ламинированного материала размером 0,5"×0,5" и толщиной 0,01", представлен на рис. 5.

На рис. 6 приведены характеристики одного из вариантов схемы такого ГУН, полученные в результате проведения различных способов моделирования (схемотехническое в MWO и на основе ЭМ-анализа в АХИЕМ) в сравнении с экспериментальными данными.

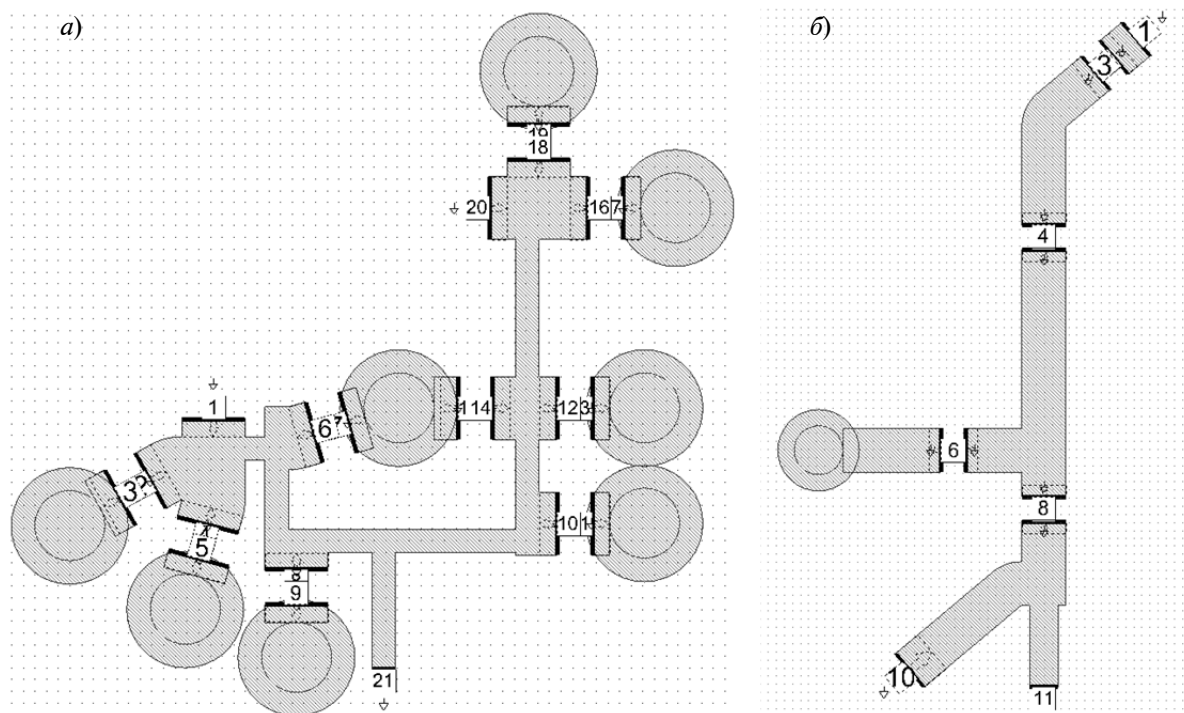


Рис. 4. Вариант разбиения топологии ГУН в AXIEM:
a – цепь подачи смещения на варикапы; *b* – выходная согласующая цепь
Fig. 4. VCO layout splitting in AXIEM:
a – circuit for varicaps control voltage feeding; *b* – output matching circuit

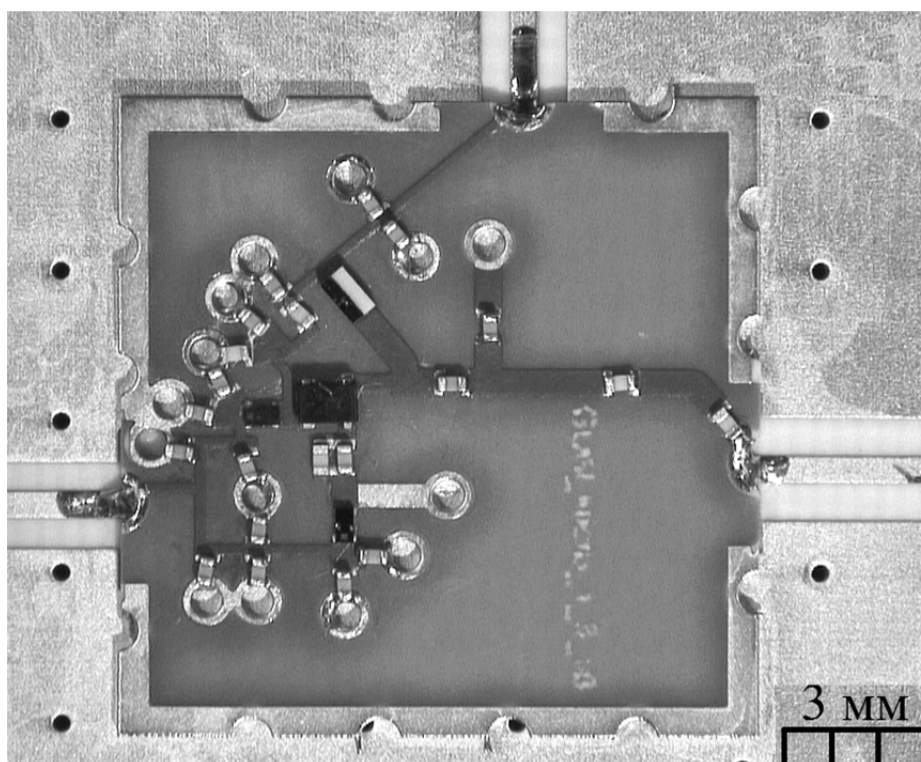


Рис. 5. Макет ГУН
Fig. 5. Photograph of the fabricated VCO

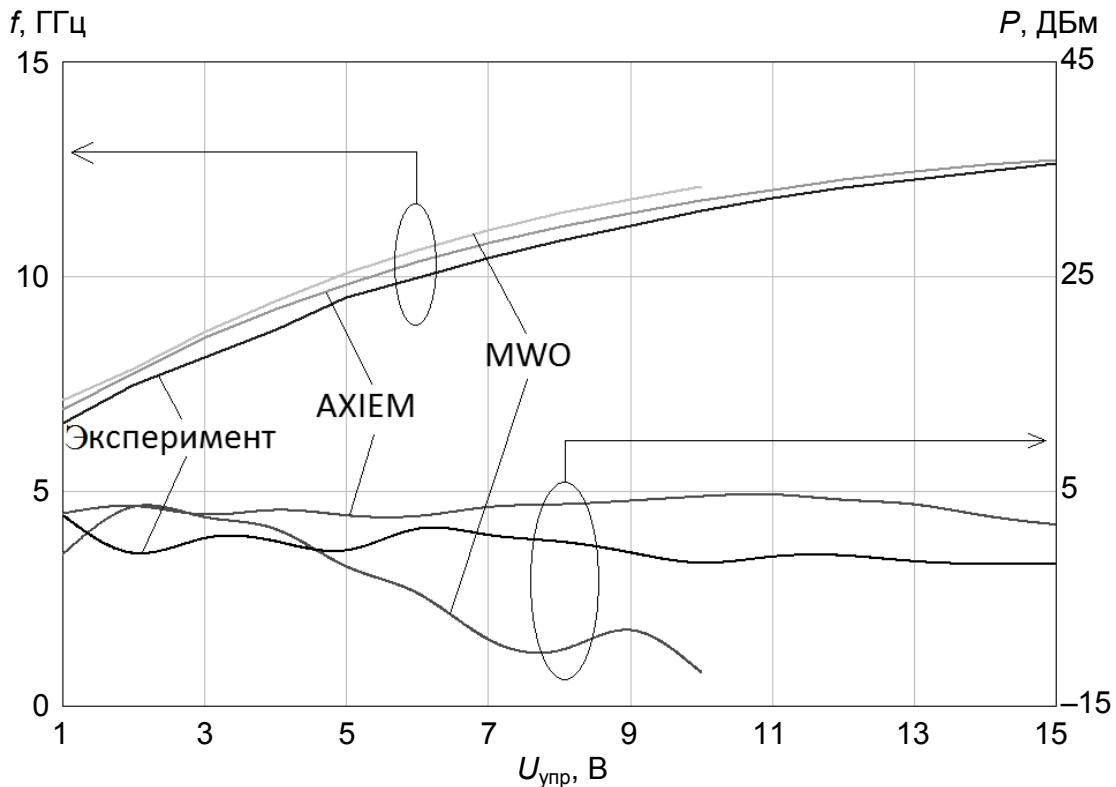


Рис. 6. Характеристики ГУН
Fig. 6. VCO characteristics

Анализ полученных данных показал, что применение при проектировании широкополосного СВЧ ГУН результатов ЭМ-моделирования его топологической структуры позволяет добиться лучшего совпадения расчетных параметров с реальными характеристиками по сравнению со случаем использования схемотехнического моделирования в MWO. Так, например, разница между значениями частоты выходного колебания ГУН в случае AXIEM составляет не более 0,2 ГГц, тогда как в MWO данное различие достигает величин порядка 0,5 ГГц и более (рис. 6). При этом для некоторых вариантов схем генератора, эксперименты с которыми показывают их работоспособность, результаты компьютерного моделирования в среде MWO могут демонстрировать отсутствие генерации как во всем рассматриваемом диапазоне частот, так и в отдельных его частях (рис. 6).

Аналогичная ситуация наблюдается и при анализе величин реализуемой мощности колебания на выходе генератора. Отличие измеренных во всей полосе частот (от 6 до 12 ГГц) значений мощности выходного колебания ГУН от рассчитанных в AXIEM составляет порядка единиц дБ, тогда как от полученных в среде MWO – не менее 3–4 дБ в нижней части рассматриваемого диапазона частот и более 6 дБ в высокочастотной его части (рис. 6).

В процессе проектирования генератора при сравнении различных способов моделирования (схемотехническое в MWO и на основе ЭМ-анализа в AXIEM) использовались одни и те же модели навесных компонентов для поверхностного монтажа с одинаковыми значениями их параметров. Поэтому представленные результаты свидетельствуют о том, что применение при разработке микрополосковой схемы ГУН методов ЭМ-моделирования позволяет су-

щественно повысить продуктивность проектирования генераторов СВЧ в гибридном исполнении. Данное обстоятельство, по-видимому, обусловлено тем, что стандартные элементы встроенной в MWO библиотеки компонентов не в полной мере отражают особенности микрополосковой структуры генератора в сантиметровом диапазоне волн.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что использование при создании устройств сантиметрового диапазона волн результатов ЭМ-анализа их топологических структур позволяет существенным образом уменьшить разницу между данными измерений и компьютерного моделирования. Так, например, разница между значениями частоты выходного колебания рассматриваемого ГУН в случае AXIEM составляет не более 0,2 ГГц, тогда как в MWO данное различие достигает величин порядка 0,5 ГГц и более. Диапазон перестройки разработанного ГУН, построенного по гибридной технологии, составлял октаву (от 6 ГГц до 12 ГГц) при изме-

нении управляющего напряжения в интервале 1...13 В. При этом средний уровень выходной мощности в полосе перестройки имел величину порядка 1,5 дБм.

Полученные результаты позволяют считать, что в рассматриваемом частотном диапазоне при построении ЭМ-модели микрополосковой структуры в качестве выводов для подключения дискретных компонентов целесообразно использовать «краевые» порты с опцией явного заземления.

При моделировании в среде AXIEM разбиение топологии устройства на несколько частей (высокочастотные цепи и цепи подачи напряжения питания активного элемента и управляющего напряжения на варикапы) может повысить продуктивность проектирования. Подобное разбиение схемы СВЧ-устройства позволяет не только уменьшить погрешность моделирования, но и сократить время анализа в случае наличия в исследуемой структуре однотипных элементов. Полученные результаты могут использоваться при разработке СВЧ-устройств в гибридном исполнении на основе моделирования в системах автоматизированного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chenakin A.V., Kochemasov V.N., Pestrakov A.V.** Current state and development trends of microwave frequency synthesizers // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2018. Pp. 667–673.
2. **Chenakin A.V.** Frequency synthesis: current status and future projections // *Microwave Journal*. 2017. Vol. 60. No. 4. Pp. 22–36.
3. **Chenakin A.V.** Synthesizers: looking beyond the basics // *Microwave Journal*. 2014. Vol. 57. No. 4. Pp. 84–94.
4. **Khanna A.P.S.** State of the art in microwave VCOs // *Microwave Journal*. 2015. Vol. 58. No. 5. Pp. 23–40.
5. **Dunn J.M.** Where did EM simulation tools Go? // *IEEE Microwave Magazine*. 2014. Vol. 15. No. 1. Pp. 65–69.
6. NI AWR Design Environment // URL: <https://www.awrcorp.com/products> (Дата обращения: 01.05.2019).
7. Системы проектирования электронных устройств компании Keysight Technologies // URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/design-software.html> (Дата обращения: 01.05.2019).
8. Системы проектирования электронных устройств компании ANSYS // URL: <https://www.ansys.com/products/electronics> (Дата обращения: 01.05.2019).
9. **Delgado I., Skidmore S., Dunleavy L.** NI AWR Design Environment/AXIEM EM Co-Simulation with Modelithics Models // 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conf. 2015. Pp. 1–4.
10. **Delgado I., Levesque L., Dunleavy L., Kahler J.** Synthesize filters with wideband success // *Microwaves & RF*. 2014. Vol. 53. No. 7. Pp. 60–62.
11. **Bedford I., Skidmore S., Dunleavy L.** 3D-surface mount component modeling for HFSS // IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conf. WAMICON. 2018. Pp. 1–4.
12. **DeMartino C.** How port tuning makes filter design more efficient // *Microwaves & RF*. 2018. Vol. 57. No. 4. Pp. 81–85.

13. Sun W. Accurate EM simulation of SMT components in RF designs // Proc. of the 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp. 2017. Pp. 140–143.

14. Никитин А.Б., Хабитуева Е.И. Сверхширокополосный СВЧ-генератор, управляемый

напряжением // Радиотехника. 2018. № 1. С. 4–9.

15. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. A 6–12 GHz wideband hybrid VCO // 2018 IEEE Internat. Conf. on Electrical Engineering and Photonics. 2018. Pp. 37–39.

Статья поступила в редакцию 06.02.2019.

REFERENCES

1. Chenakin A.V., Kochemasov V.N., Pestryakov A.V. Current state and development trends of microwave frequency synthesizers. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2018)*, 2018, Pp. 667–673.

2. Chenakin A.V. Frequency synthesis: current status and future projections. *Microwave Journal*, 2017, Vol. 60, No. 4, Pp. 22–36.

3. Chenakin A.V. Synthesizers: looking beyond the basics. *Microwave Journal*, 2014, Vol. 57, No. 4, Pp. 84–94.

4. Khanna A.P.S. State of the art in microwave VCOs. *Microwave Journal*, 2015, Vol. 58, No. 5, Pp. 23–40.

5. Dunn J.M. Where did EM simulation tools Go? *IEEE Microwave Magazine*, 2014, Vol. 15, No. 1, Pp. 65–69.

6. NI AWR Design Environment. Available: <https://www.awrcorp.com/products> (Accessed: 01.05.2019).

7. Keysight Technologies. Circuit Design Software. Available: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/design-software.html> (Accessed: 01.05.2019).

8. ANSYS. Electromagnetic field simulation. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics> (Accessed: 01.05.2019).

9. Delgado I., Skidmore S., Dunleavy L. NI AWR Design Environment/AXIEM EM Co-Simulation with Modelithics Models. *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON*, 2015, Pp. 1–4.

10. Delgado I., Levesque L., Dunleavy L., Kahler J. Synthesize filters with wideband success. *Microwaves & RF*, 2014, Vol. 53, No. 7, Pp. 60–62.

11. Bedford I., Skidmore S., Dunleavy L. 3D-surface mount component modeling for HFSS. *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON*. 2018, Pp. 1–4.

12. DeMartino C. How port tuning makes filter design more efficient. *Microwaves & RF*, 2018, Vol. 57, No. 4, Pp. 81–85.

13. Sun W. Accurate EM simulation of SMT components in RF designs. *Proceedings of the 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, 2017, Pp. 140–143.

14. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. Ultra-wideband microwave voltage-controlled oscillator. *Radiotekhnika*, 2018, No.1, Pp. 4–9. (rus)

15. Nikitin A.B., Khabitueva E.I. A 6–12 GHz wideband hybrid VCO. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 2018, Pp. 37–39.

Received 06.02.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

НИКИТИН Александр Борисович

NIKITIN Aleksandr B.

E-mail: nikitin@mail.spbstu.ru

ХАБИТУЕВА Екатерина Исаковна

KHABITUEVA Ekaterina I.

E-mail: basilliounderground@mail.ru