

УДК 621.396

М.С. Мякишева, А.С. Нечаев, М.А. Палачев

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ 40-60 ГГц

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматривается методика автоматизированного проектирования и расчета характеристик широкополосного диодного утроителя частоты 40-60 ГГц на базе программных продуктов компании ANSYS (HFSS и Designer). Данная методика объединяет электродинамический анализ волноведущей части и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами. Приводится сравнение рассчитанной выходной характеристики утроителя частоты с экспериментальными данными. Оценивается влияние параметров цепей автосмещения и диодов на характеристики устройства.

Ключевые слова: утроитель частоты, автоматизированное проектирование, диодный умножитель

Введение

В терагерцовом диапазоне частот для получения необходимой частоты широко применяются умножители частоты. Одним из промежуточных умножителей может быть утроитель частоты 40-60 ГГц. Для анализа характеристик таких умножителей применяются комплексы трехмерного моделирования. Использование программного комплекса точного моделирования трёхмерных структур – это новый, активно используемый в настоящее время подход, который становится основным инструментом автоматизированного проектирования, существенно ускоряя разработку новых устройств. Но до сих пор одной из основных проблем, возникающих при проектировании СВЧ-устройств, построенных на нелинейных элементах, является отсутствие эффективных методик автоматизированного расчета на базе программных средств автоматизированного проектирования, которые бы объединяли в себе электродинамические методы анализа волноведущих структур и расчет характеристик цепей с нелинейными полупроводниковыми элементами.

Несмотря на большое количество различных методов (как аналитических, так и машинных) анализа нелинейных СВЧ-устройств (смесителей, модуляторов, умножителей частоты и др.), задача их проектирования достаточно сложна, трудоёмка и обычно решается итерационно. Кроме этого, важную роль в таком проектировании играют длительные и дорогостоящие экспериментальные исследования.

В данной работе применена предложенная ранее [1-2] методика проектирования с использованием программных продуктов компании ANSYS (системы автоматизированного проектирования HFSS и Designer) для расчета характеристик ранее экспериментально разработанного и серийно выпускаемого широкополосного волноводного диодного утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц. Предложенная методика проектирования состоит из двух этапов, объединяющих электродинамический анализ волноведущей части утроителя частоты и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами (диодами).

Первый этап состоит в том, что в системе автоматизированного проектирования ANSYS HFSS создается модель утроителя частоты без нелинейных элементов. После этого производится расчет S -параметров модели путём решения электродинамической задачи с пространственным распределением полей (расчёт методом конечных элементов).

Второй этап – подключение рассчитанной ранее модели утроителя в качестве многополюсника в САПР ANSYS Designer, подключение диодов, цепей их автосмещения и расчет выходных характеристик (уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала на выходе) утроителя частоты с помощью нелинейного анализа (расчёт методом гармонического баланса).

Схемно-конструктивные особенности утроителя частоты

Схематически утроитель частоты – это широкополосный тракт с парой антипараллельно включенных диодов. Диоды включены через резистивно-емкостные цепи для балансировки утроителя и достижения минимальных потерь преобразования в требуемом диапазоне входных частот путём реализации оптимального автосмещения диодов при максимальном уровне мощности входного сигнала 100 мВт (20 дБм) [3-4].

Конструктивно утроитель частоты выполнен в виде последовательно соединенных входной микрополосковой линии (МПЛ), щелевого резонатора, выходной МПЛ и прямоугольного металлического волновода размерами $3,775 \times 2,388$ мм (рис. 1). Волновод является запердельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала.

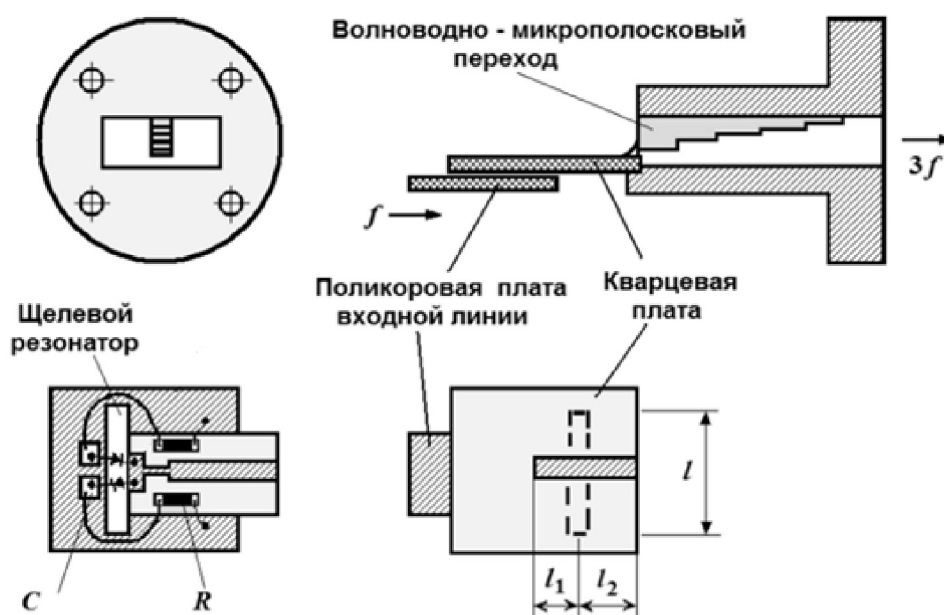


Рис. 1. Конструкция утроителя частоты 40-60 ГГц

Основой всей конструкции являются две платы, скрепленные экранами. На входной поликоровой плате расположена входная микрополосковая линия, а на другой, кварцевой – щелевой резонатор. Умножительные диоды, пересекая резонатор по центру, подключены разнополярно к входной МПЛ и противоположной стороне щелевого резонатора. Входная МПЛ на конце (в точке подключения диодов) имеет низкое волновое сопротивление, образуя шунтирующий конденсатор для замыкания тока третьей гармоники. С обратной стороны платы щелевой резонатор пересекает (перпендикулярно) выходная МПЛ, которая соединена с волноводным трактом с помощью П-образного волноводно-микрополоскового перехода Чебышевского типа.

Входной сигнал поступает через коаксиально-полосковый переход и входную МПЛ, содержащую согласующий фильтр нижних частот, на умножительные диоды, которые осуществляют симметричное ограничение амплитуды и генерируют нечетные гармоники входного сигнала. Расположенный над щелевым резонатором отрезок линии, образованный выводами диодов, возбуждает в нем волну напряжения. Длина резонатора l выбирается равной половине длины волны на третьей гармонике. Выходной сигнал снимается с резонатора с помощью разомкнутого шлейфа длиной l_1 , равной приблизительно четверти длины волны третьей гармоники, и через отрезок МПЛ длиной l_2 и волноводно-микрополосковый переход поступает на выход.

Проектирование и расчет характеристик

Первый этап анализа – создание адекватной модели. В системе автоматизированного проектирования ANSYS HFSS была создана 3D модель, соответствующая ранее экспериментально разработанной конструкции диодного утроителя частоты (рис. 2).

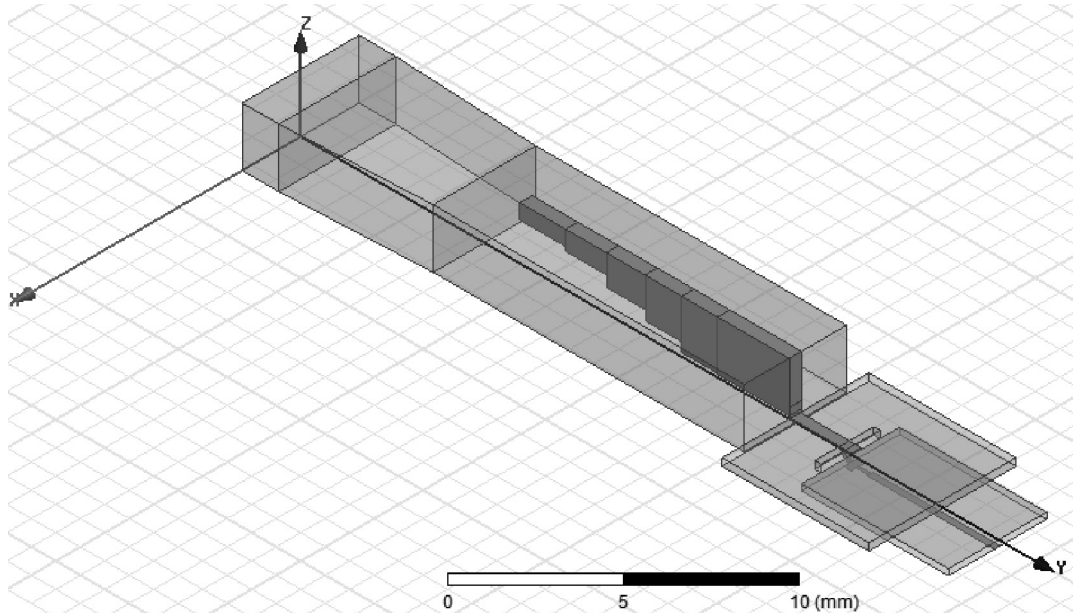


Рис. 2. Модель утроителя частоты в ANSYS HFSS

На входе всей системы установлен сосредоточенный порт 1, в месте расположения диодов, на противоположной стенке входной платы, установлен порт 2, на выходе волновода установлен сосредоточенный порт 3. После создания модели и согласования входного и выходного трактов проведен анализ распределения поля в диапазоне входных частот и анализируемых гармоник в модели утроителя с учетом особенностей конструкции. Были вычислены S -параметры модели утроителя и произведено исследование их зависимости от ширины и длины щели, длины выходной МПЛ и наличия абсорбера, поглощающего отраженное излучение для получения минимальных потерь преобразования.

Коэффициент передачи S_{32} с порта 2 до выхода волновода (порт 3) представлен на рис. 3. Затухание в диапазоне выходных частот 40-60 ГГц составляет в среднем 7 дБ.

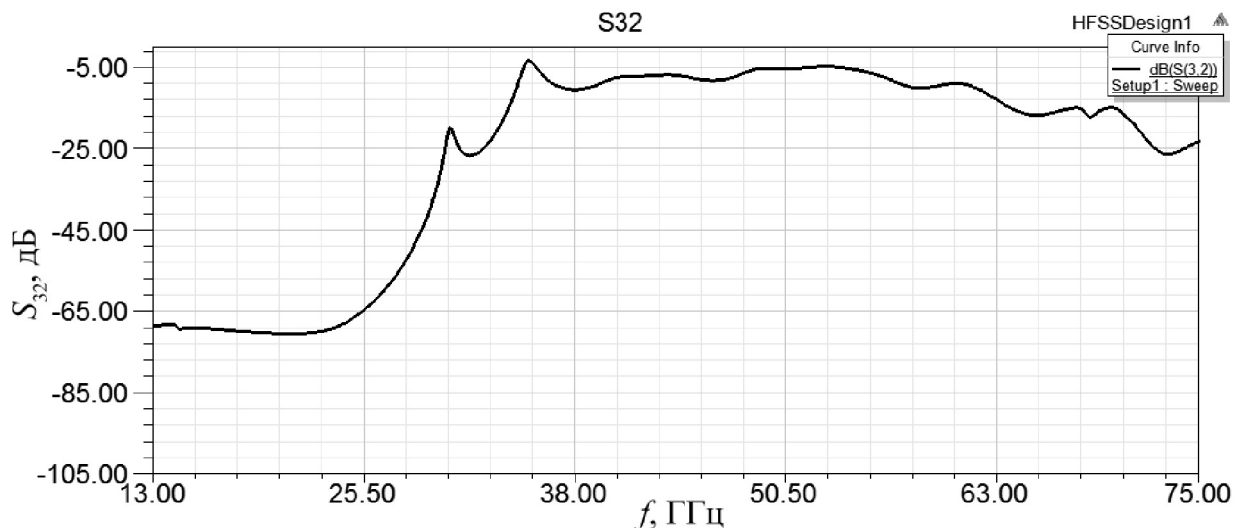


Рис. 3. Коэффициент передачи S_{32}

Второй этап анализа – расчет гармонических составляющих входного сигнала на выходе утроителя частоты методом гармонического баланса

Ранее созданная и проанализированная модель утроителя частоты в ANSYS HFSS была передана в ANSYS Designer и подключена к построенной схеме умножителя частоты в виде многополосника с известной матрицей рассеяния. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer (рис. 4) включает нелинейные элементы – полупроводниковые диоды, резистивно-емкостные цепи для реализации автосмещения диодов и порты входа (с источником гармонического сигнала) и выхода.

В свойствах входного порта 1 был задан источник гармонического сигнала и на вход подавался сигнал в диапазоне частот 13-20 ГГц мощностью 100 мВт (20 дБм). Порт 2 служит для подключения пары диодов с резистивно-емкостными цепями автосмещения. Расчет характеристик утроителя частоты заключается в анализе уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала в порте 3 (выходной порт). Рабочие выходные характеристики – уровни мощности третьей гармоники входного сигнала.

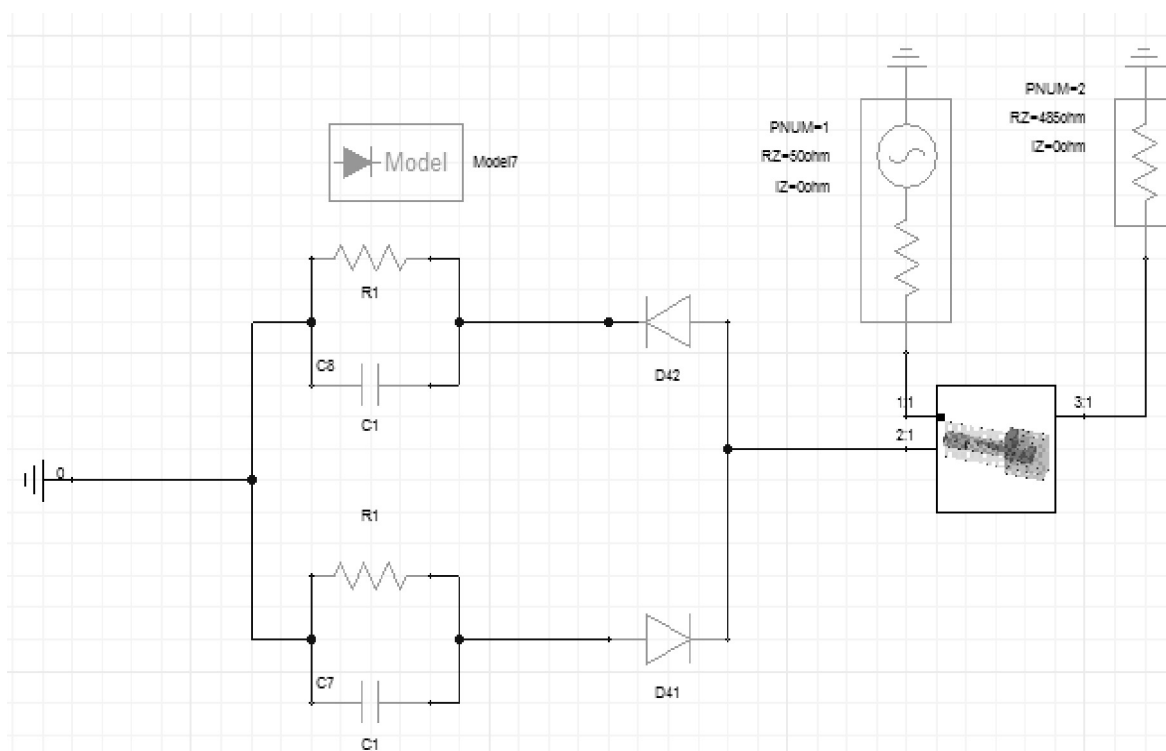


Рис. 4. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer

Порты 1 и 3 согласованы с импедансами волноводов на анализируемых частотах. Параметры используемых диодов: емкость p - n перехода $C_0 = 0,1$ пФ и сопротивление прямого перехода $R_s = 1$ Ом. В схеме ANSYS Designer использовалась модель диодов DIODE_Level7 (Enhanced SPICE Diode). Номиналы элементов цепей автосмещения диодов: $C1 = 10$ пФ, $R1 = 155$ Ом.

Результат анализа – зависимость уровня мощности третьей гармоники от частоты сигнала на входе, полученная в результате моделирования, в сравнении с экспериментально измеренными ранее значениями мощности на выходе утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц производства НИИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова (рис. 5). Уровень мощности третьей гармоники лежит в диапазоне 1-7 дБм. Потери преобразования находятся, в среднем, на уровне 16 дБ.

Кроме рабочей третьей гармоники входного сигнала, в утроителе частоты генерируются и другие нечётные гармоники. Уровень мощности паразитной пятой гармоники подавлен относительно уровня третьей, в среднем, на 20 дБ.

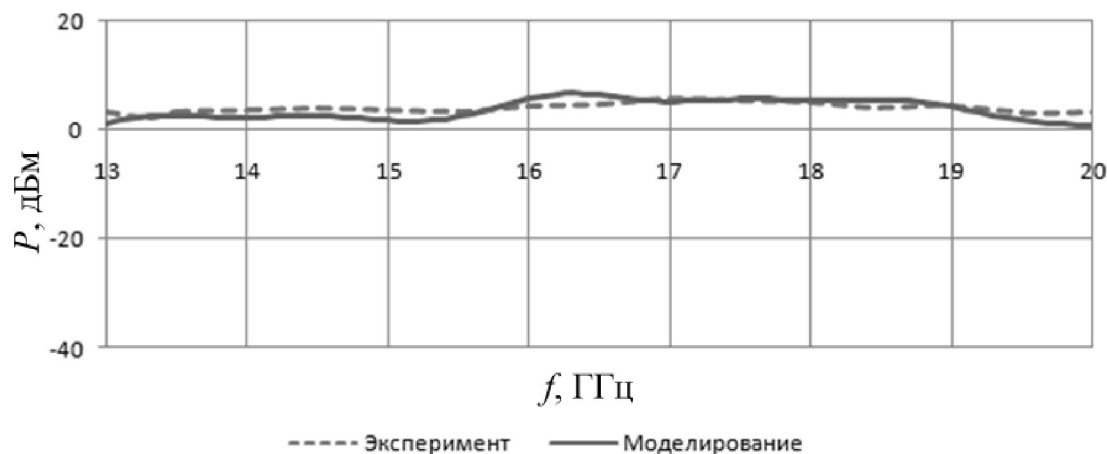


Рис. 5. Уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя

Исследование влияния параметров утроителя частоты на его характеристики

Важный этап в проектировании утроителя частоты – выбор оптимальных номиналов элементов цепей автосмещения диодов (сопротивления $R1$ и емкости $C1$). Уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя частоты при $R1=155$ Ом и различной емкости $C1$ представлен на рис. 6. При изменении емкости $C1$ (от 10 до 50 пФ) уровень мощности третьей гармоники практически не изменяется.

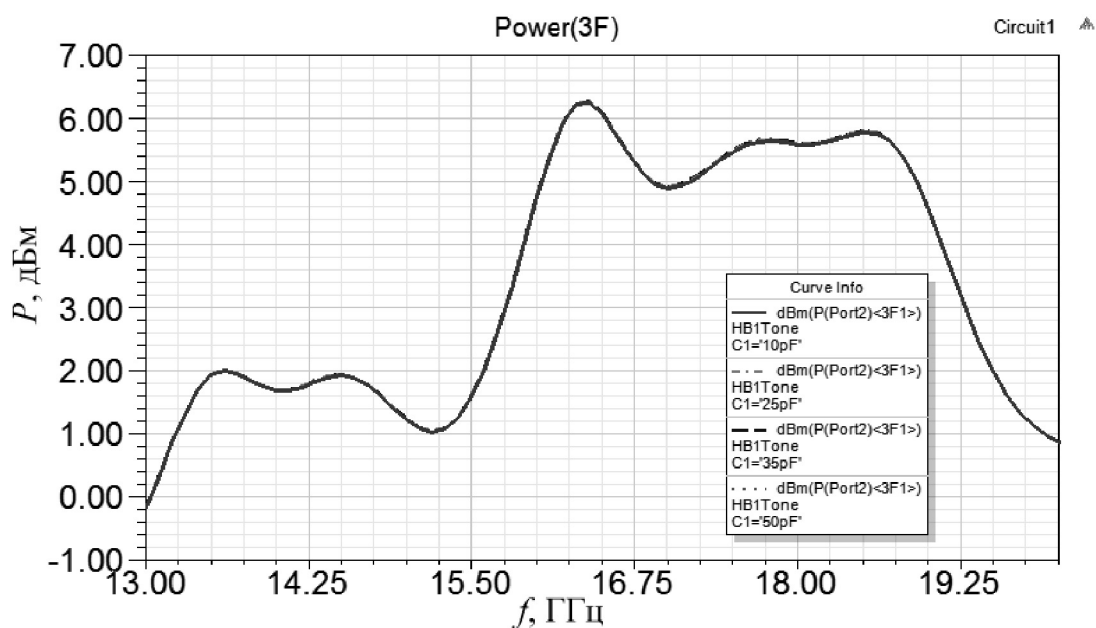


Рис. 6. Зависимость мощности третьей гармоники на выходе от емкости $C1$

Зависимость уровня мощности третьей гармоники на выходе при $C1=10$ пФ и различном сопротивлении $R1$ показана на рис. 7. При увеличении $R1$ с 50 Ом до 1 кОм уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя увеличивается до максимального значения 8 дБм, при дальнейшем увеличении практически не изменяясь. Таким образом, путем изменения сопротивления $R1$ возможно увеличение уровня мощности третьей гармоники приблизительно на 1,7 дБ по сравнению с ранее рассчитанным.

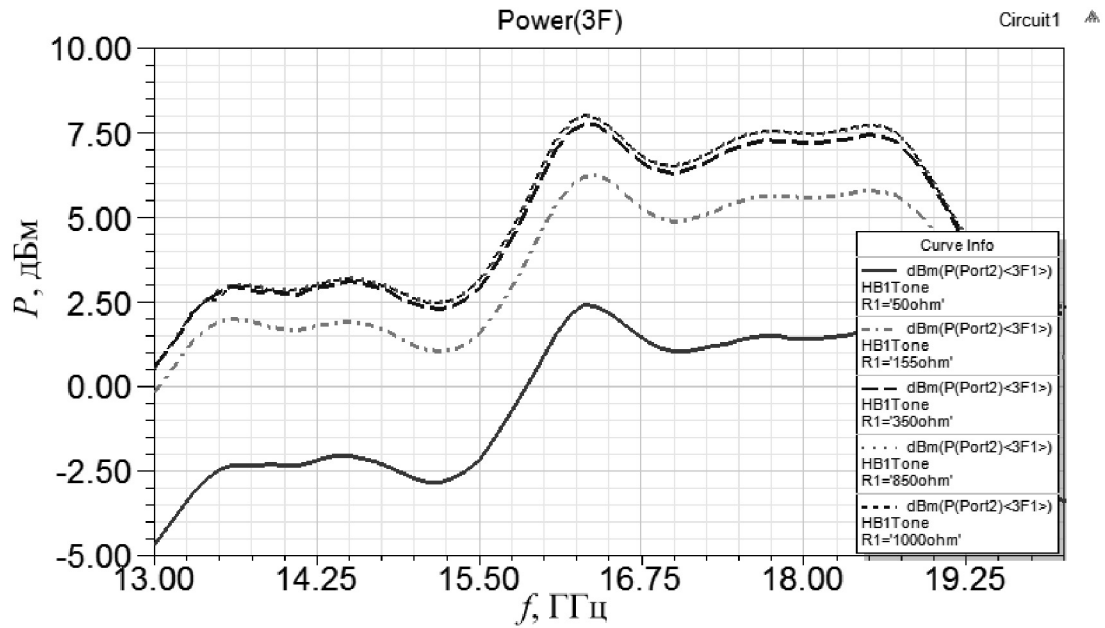


Рис. 7. Зависимость мощности третьей гармоники на выходе от сопротивления R_1

При идентичных параметрах диодов в утроителе частоты четные гармоники входного сигнала не генерируются. Однако на практике всегда имеет место разброс параметров диодов. На рис. 8–9 представлены зависимости уровней мощности паразитных четных гармоник (второй и четвертой) при различной степени неидентичности параметров диодов C_0 (барьерная емкость перехода) и R_s (сопротивление прямого перехода). Анализ произведен при изменении данных параметров на 10% по отношению к номинальным значениям (одновременно и по отдельности).

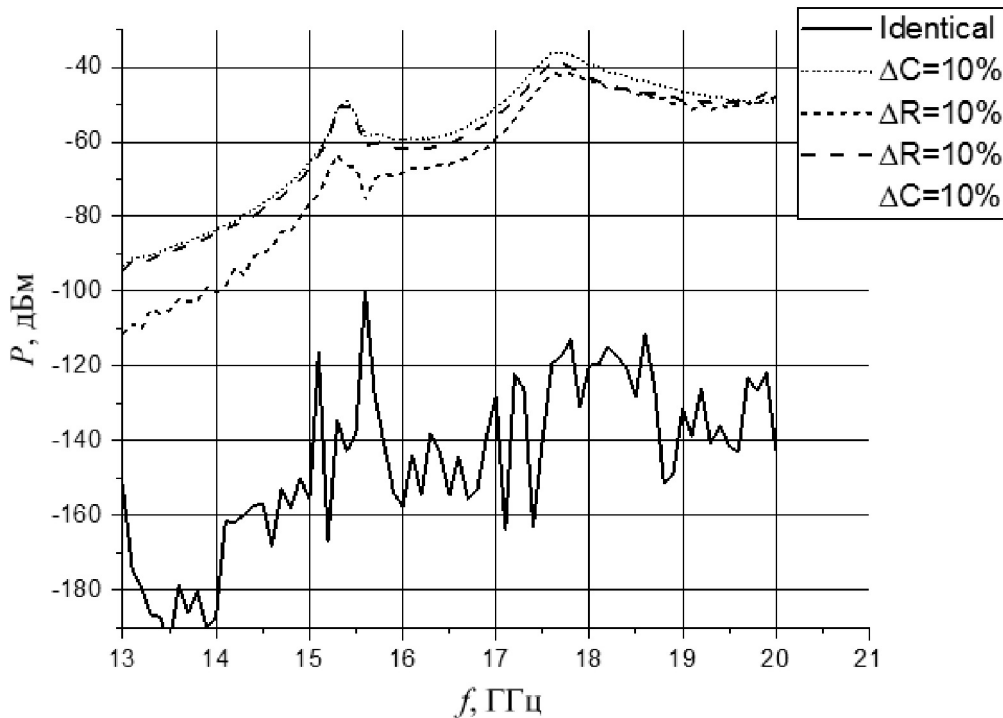


Рис. 8. Уровни мощности второй гармоники при различной степени неидентичности параметров диодов

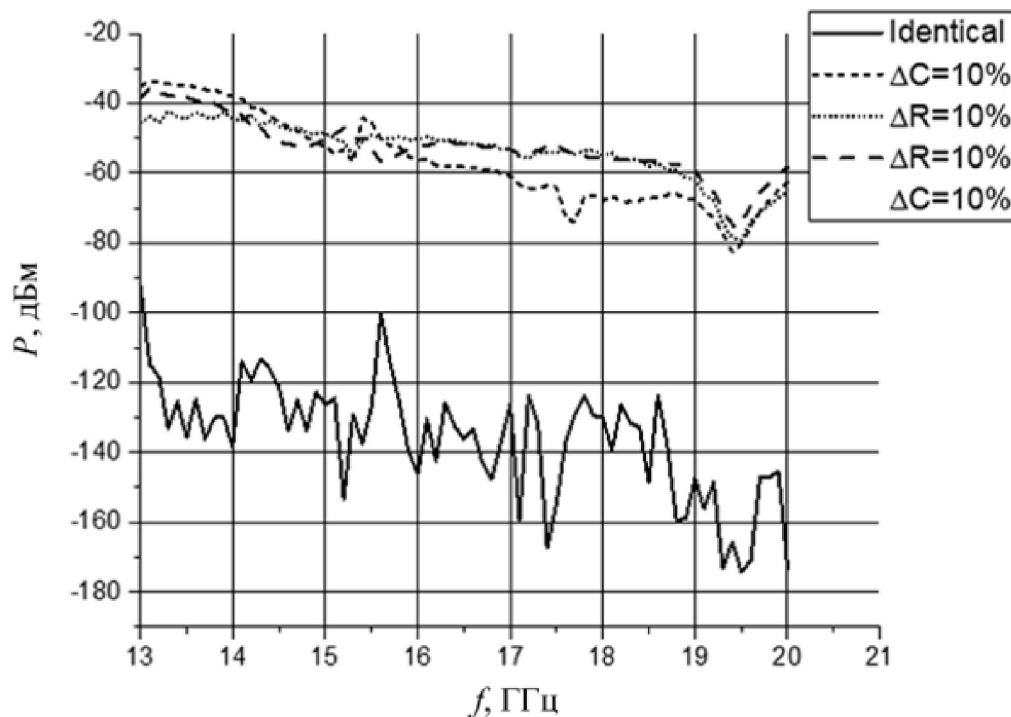


Рис. 9. Уровни мощности четвертой гармоники при различной степени неидентичности параметров диодов

Выводы

Результаты анализа мощности третьей гармоники входного сигнала на выходе утроителя частоты согласуются со значениями мощности, полученными в результате экспериментального исследования утроителя частоты 40-60 ГГц производства НИИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова. Это означает, что предложенная методика проектирования и расчета характеристик может быть применена в дальнейших исследованиях нелинейных СВЧ-устройств. Данная методика дает возможность проводить оптимизацию различных схемно-конструктивных элементов утроителя, как волноведущих трактов, так и параметров нелинейных элементов (диодов), а также позволяет определить потенциальные возможности совершенствования технических характеристик без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований.

В ходе проведенных расчетов были определены возможности совершенствования технических характеристик (увеличение эффективности преобразования и уменьшение уровня паразитных гармоник) утроителя частоты. Анализ характеристик показал, что увеличение мощности третьей гармоники на выходе утроителя возможно осуществить путем изменения параметров используемых цепей автосмещения диодов (увеличение номинала сопротивления R_1).

Анализ уровня мощности четных гармоник на выходе при различной степени неидентичности параметров диодов показывает, что при минимально достижимой на практике неидентичности параметров C_0 и R_s в 10% вторая и четвертая гармоники подавлены относительно третьей в среднем на 35 дБ. В широкополосном утроителе частоты 40-60 ГГц вторая и четвертая гармоники не могут быть отфильтрованы, поскольку находятся в рабочей зоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФ №17-19-01628.

Библиографический список

1. **Березин, В.В.** Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов, С.В. Оболенский // Информационные системы и технологии (ИСТ-2015): материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2015. – С. 62–63.
2. **Щитов, А.М.** Автоматизированный расчет широкополосных волноводных диодных утроителей частоты в диапазонах 75-110 ГГц и 110-170 ГГц / А.М. Щитов, В.В. Березин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015): материалы 25-й Междунар. Крымской конф.: в 2 т. – Севастополь, 2015 – Т. 1. – С. 75–76.
3. **Щитов, А.М.** Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5-110 ГГц) / А.М. Щитов, А.Е. Серебряков // Вестник ВВО АТН РФ, серия Высокие технологии в радиоэлектронике. – 1997. – №1(3). – С. 91–96.
4. **Щитов, А.М.** Расчет и проектирование балансного утроителя частоты на ДБШ в миллиметровом диапазоне // Специальная радиоизмерительная техника, НТС, «Кварц». – Нижний Новгород, 1996. – С. 24–32.

*Дата поступления
в редакцию 08.07.2017*

M.S. Myakisheva, A.S. Nechaev, M.A. Palachyov

**COMPUTER-AIDED DESIGN AND CHARACTERISTICS CALCULATION
OF A BROADBAND 40-60 GHZ FREQUENCY TRIPLER**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The computer aided design and characteristics calculation strategy of a broadband diode 40-60 GHz frequency tripler based on software from ANSYS (HFSS and Designer). The technical characteristics improvement of a previously experimentally developed and serially produced frequency tripler without costly and labor-intensive experimental studies.

Design/methodology/approach: This strategy combines the electrodynamic analysis of a waveguide part and the calculation of circuits with nonlinear elements characteristics. The influence of a self-bias circuit and diode parameters on device characteristics is evaluated.

Findings: As a result, the calculated output characteristic of a frequency tripler are consistent with experimental data.

Key words: frequency tripler, computer-aided design, diode multiplier.