

УДК 621.372.2

К.И. Кисиленко, М.С. Мякишева, Е.П. Тимофеев**РАЗРАБОТКА ТРЕХКАНАЛЬНОГО ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Представлены результаты моделирования и расчета параметров трехканального делителя мощности СВЧ диапазона. В основе конструкции лежит кольцевой делитель - мост Уилкинсона. Моделирование и расчет электрических параметров делителя проводился с помощью пакета программ численного моделирования. Моделирование устройства в диапазоне 3.15 – 4.05 ГГц позволило оптимизировать конструкцию и значительно улучшить электрические характеристики делителя мощности СВЧ.

Ключевые слова: делитель мощности, кольцевой делитель, мост Уилкинсона, СВЧ диапазон, LTCC, моделирование, САПР, CSTStudio, HFSS.

Введение

Делители мощности являются базовыми элементами при создании различных устройств и систем СВЧ диапазона и обеспечения разветвления трактов СВЧ.

Делители мощности СВЧ-диапазона зачастую выполняются на основе микрополосковых линий (МПЛ). Они представляют собой тонкие полоски, выполненные из высокопроводящего материала, расположенные на диэлектрической подложке конечной толщины. Такие конструкции имеют достаточно малые габаритные размеры, они недорогие и просты в изготовлении [1]. Структура электромагнитного поля в линии достаточно сложная. МПЛ является неоднородной линией передачи, по которой распространяется основная волна "квази- T" и волны высших типов.

В данной работе предлагается интерактивный режим проектирования устройства СВЧ (микрополоскового делителя мощности), который сводится к тому, что разработчик, используя САПР в процессе диалога с компьютером, производит подбор геометрических параметров устройства для достижения требуемых частотных характеристик и оптимизации конструкции устройства.

Процедура анализа микрополоскового устройства СВЧ методом численного моделирования с использованием САПР разного уровня имеет следующую схему:

1. На первом этапе использовалось линейное моделирование, при котором на основании упрощенных методов анализа проводились расчет и оптимизация заданной структуры устройства. Использовался метод узловых потенциалов. На данном этапе формировалась топология проектируемого устройства, которая строилась с использованием программы AWRmicrowaveoffice для линейного анализа цепи;

2. На втором этапе полученная топология подвергалась электродинамическому анализу, позволившему увеличить точность и достоверность расчетов характеристик, оптимизировать параметры конструкции устройства. Моделирование, расчет и оптимизация конструкции устройства СВЧ, анализ его характеристик проводился с использованием САПР AnsysHFSS и CSTStudio.

Двухканальные делители мощности используются в трактах СВЧ как самостоятельные узлы, а также как составные (базовые) элементы многоканальных разветвителей мощности. Делители на четное количество выходов наиболее распространены и вариативны. В качестве составной части устройства, рассмотренного в данной работе, использовался двухканальный кольцевой делитель мощности с омической нагрузкой (мост Уилкинсона) [2]. Плечи делителя представляют собой четвертьволновые линии передачи, соединенные на конце активным сопротивлением (рис. 1) [3].

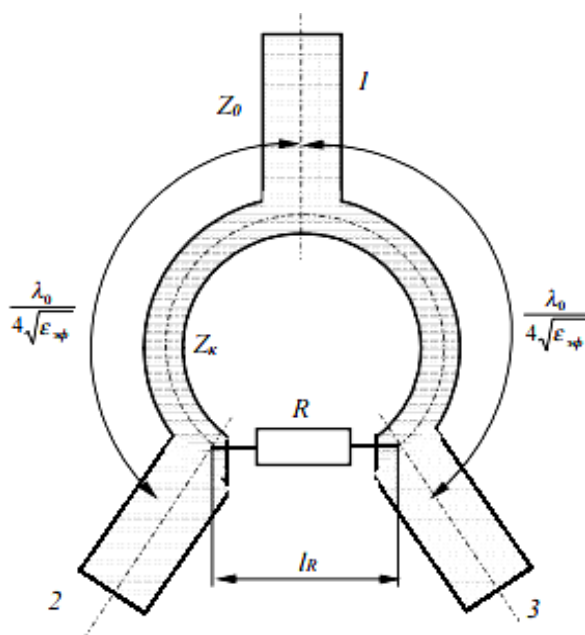


Рис. 1. Схема кольцевого делителя мощности с омической нагрузкой

Наиболее важными параметрами делителя являются:

- согласование входов и выходов во всем диапазоне частот ($K_{СВн} < 1,2$);
- достаточная развязка между выходами (25 дБ и более);
- равное деление мощности на выходах с заданной величиной ослабления при передаче мощности между входом и любым выходом.

Поставленная задача решена последовательным использованием двух кольцевых омических микрополосковых делителей (базовых элементов). Для построения трехканального устройства первым шагом входная мощность разделялась в отношении один к двум: в первый канал поступала треть мощности, во второй две трети мощности. Затем проводилось равное деление мощности пополам во втором канале. Плечи первого кольцевого делителя являются несимметричными для обеспечения неравного деления мощности (рис. 2) [4].

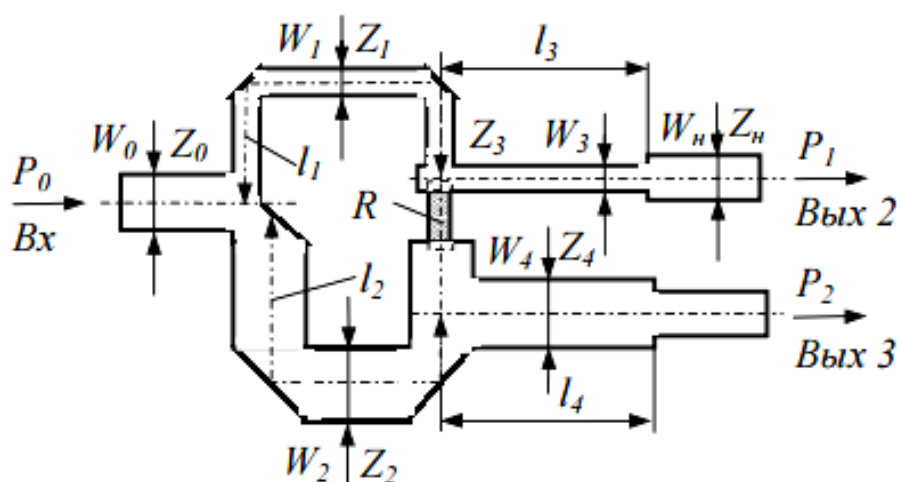


Рис. 2. Несимметричный кольцевой делитель мощности с омической нагрузкой

Расчет параметров делителя методом узловых потенциалов

На основании метода узловых потенциалов, известных теоретических формул возможен первичный расчет геометрии устройства, его топологии. Для ускорения процесса анали-

за в данной работе, как отмечалось ранее, прибегали к двум видам моделирования. На начальном этапе для подстройки параметров устройства использовалось моделирование в линейном режиме. На основе упрощенных методов анализа проведены расчет и оптимизация заданной структуры, его топологии.

В качестве диэлектрика подложки выбран поликор - материал с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$ и тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,003$. Толщина подложки диэлектрика $h=1$ мм. Топология строилась в программе AWR microwaveoffice для линейного анализа цепи (рис. 3). Данный метод анализа позволяет производить быструю оценку параметров цепи, а также осуществить оптимизацию геометрических параметров для достижения требуемых характеристик (в приближении линейного моделирования).

После оптимизации получена топология устройства трехканального делителя мощности, обладающего характеристиками, представленными на рис. 4.

Максимальное различие коэффициентов передачи для трех выходов характеризует то, в какой степени деление мощности будет равным. В данном случае отклонение составляет не более 0,1 дБ. Обеспечивается хорошее согласование входов и выходов во всем диапазоне частот - $K_{СВн}<1,2$. Развязка между выходами более 25 дБ. Полученные параметры подтверждают высокое качество разрабатываемого делителя мощности СВЧ.

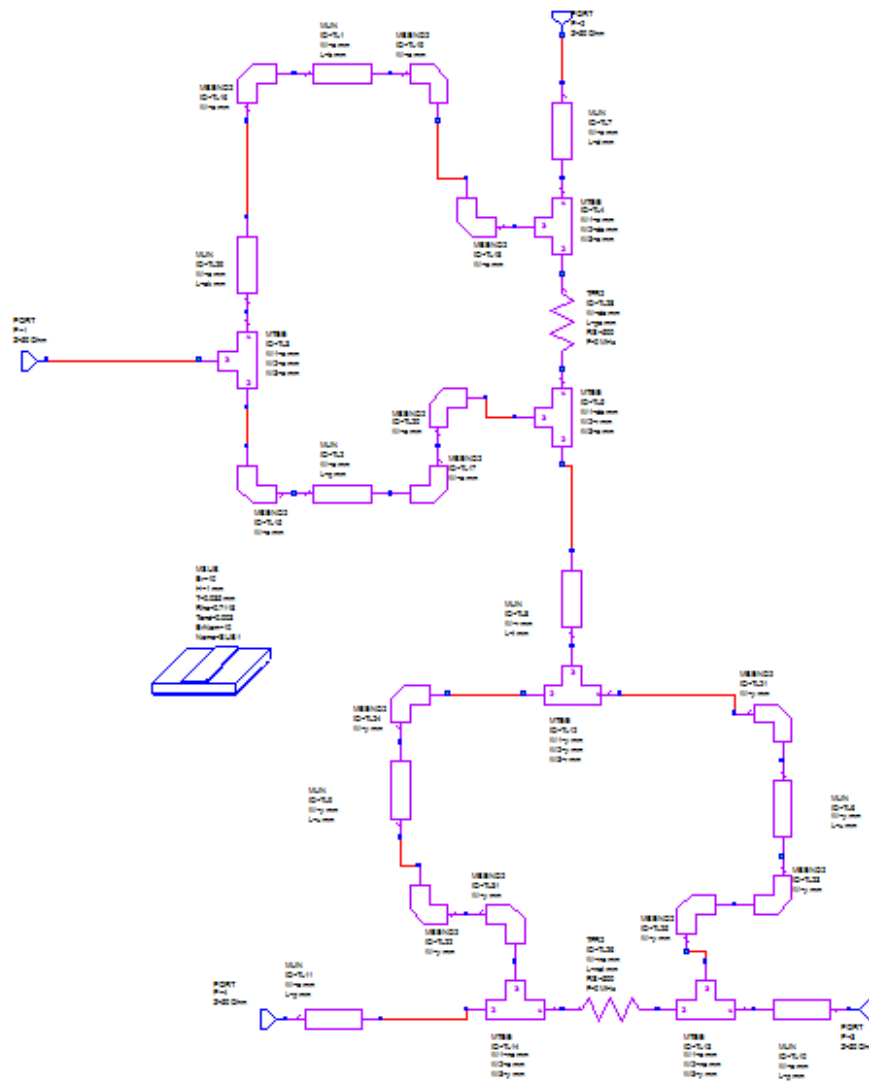


Рис. 3. Схема трехканального делителя мощности (в САПР AWR microwaveoffice)

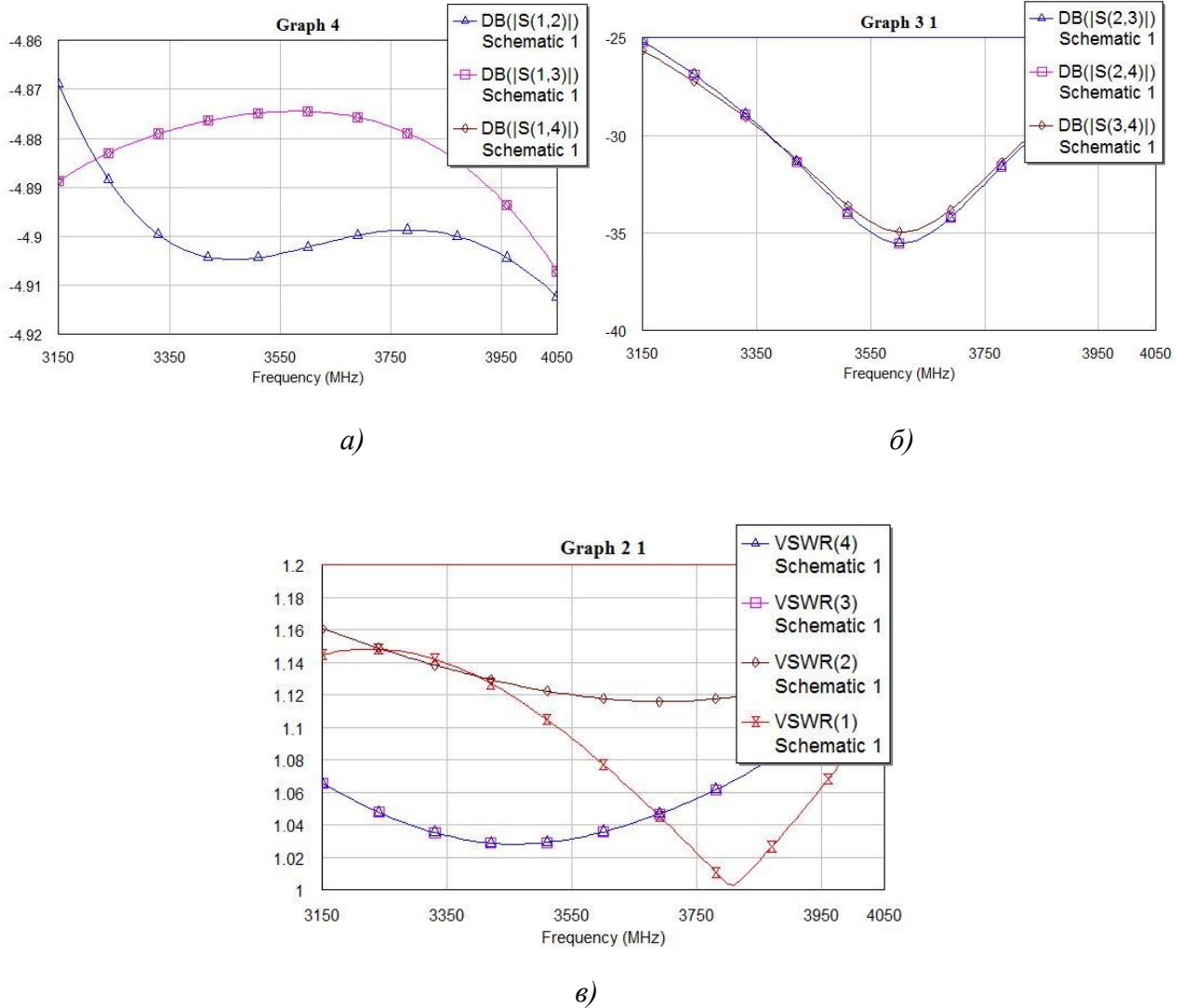


Рис.4. Характеристики делителя мощности в САПР AWR microwaveoffice:
а – деление мощности между выходами; *б* – развязка выходов; *в* – КСВн входа и выходов

Электродинамический расчет параметров делителя методом конечных элементов

Для увеличения точности расчета и достоверности результатов моделирования устройства в диапазоне СВЧ топология делителя, полученная на базе приближенной модели (метод узловых потенциалов), прошла электродинамический анализ, учитывающий волновые процессы в рассматриваемой структуре. Моделирование, расчет и оптимизация конструкции трехканального делителя мощности СВЧ, его электрических характеристик проводился с использованием САПР Ansys HFSS и CST Studio.

Рассмотрим основные характеристики однослойного делителя мощности (рис. 5). В качестве диэлектрика подложки выбран поликор - материал с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=10$ и тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,003$. Диапазон рабочих частот устройства от 3,15 до 4,05 ГГц, толщина подложки $h=1$ мм. Максимальное различие коэффициентов передачи для трех выходов характеризует то, в какой степени деление мощности будет равным. В данном случае отклонение составляет не более 1 дБ. Развязка между выходными каналами составляет не превышает -25 дБ. Требуемое значение КСВн < 1,2 достигается для выходных каналов только вблизи центральной частоты. Для входного канала во всем рассматриваемом диапазоне частот возрастает до уровня КСВн < 1,4.

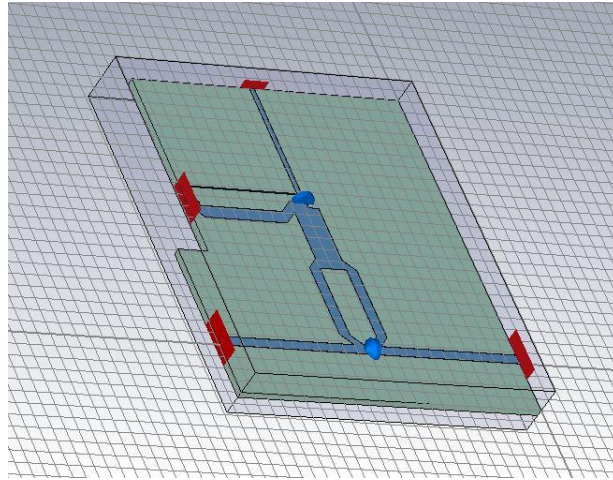


Рис. 5. Внешний вид трехканального делителя мощности

Распределение электромагнитного поля, следовательно, и значения характеристик трехканального делителя мощности во многом зависят от толщины диэлектрической подложки [5]. Если ранее рассматривались характеристики устройства при $h=1$ мм, то теперь рассмотрим изменение параметров при подстройке данной конструкции при толщине подложки $h=0,5$ мм. Максимальное различие коэффициентов передачи для трех выходов составляет не более 0,6 дБ (рис. 6, а), развязка между выходными каналами – не более 25 дБ (рис. 6, б). Требование КСВн < 1,2 достигается для входа и двух выходов устройства. Отклонение коэффициента стоячей волны от требуемого значения для третьего выхода составляет 0,002 (рис. 6, в).

Из сравнения полученных результатов для делителей с разными значениями толщин диэлектрических подложек, можно сделать вывод о достижении наилучшего результата при $h=0,5$ мм. Равное деление мощности по выходным каналам производится более точно, и значение коэффициента стоячей волны ближе к требуемому (КСВн < 1,2) при сохранении достаточной развязки между выходами устройства.

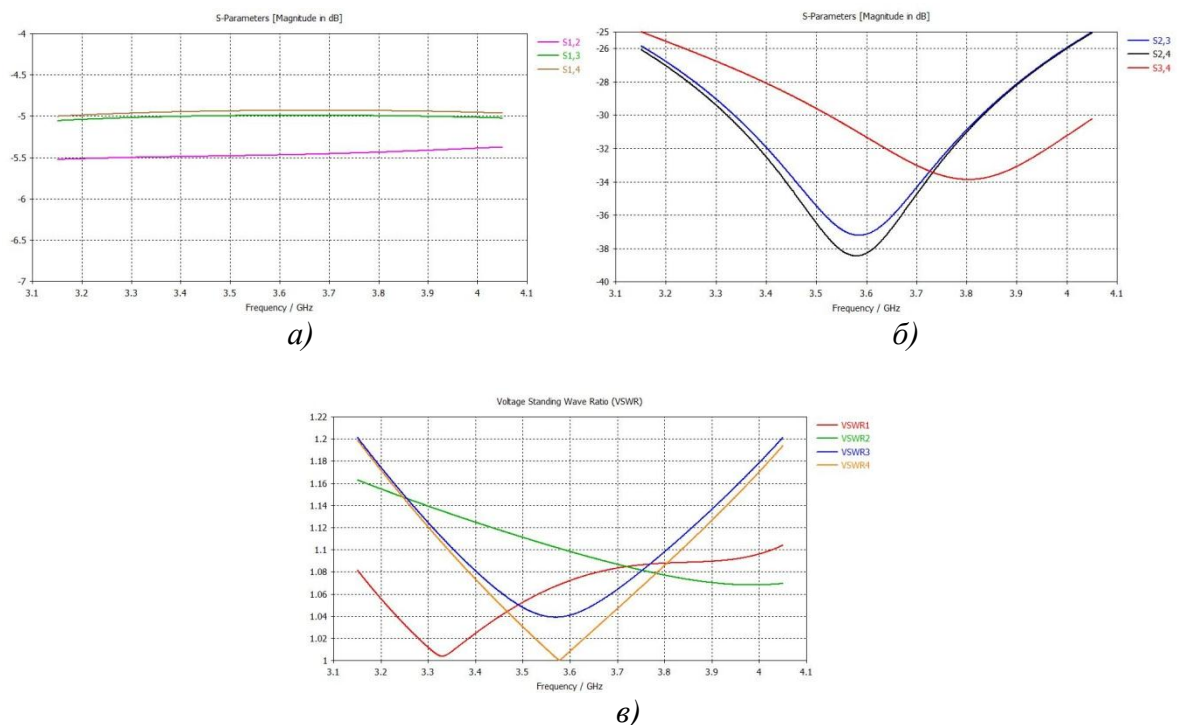


Рис. 6. Характеристики делителя мощности на поликоровой подложке толщиной 0,5 мм: а – деление мощности между выходами; б – развязка выходов; в – КСВн входа и выходов

Реализация трехканального делителя мощности по LTCC-технологии

Помимо реализации рассмотренной однослойной структуры, возможно исполнение делителя по LTCC-технологии (LowTemperatureCo-firedCeramics - низкотемпературная керамика) [6]. Четвертьволновые микрополосковые линии были заменены эквивалентными каскадно соединенными LC-ячейками. Емкости и индуктивности выполнены в данной работе на сосредоточенных элементах с целью уменьшения габаритов устройства. На рис. 7 показана эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами, построенная с использованием двух каскадно соединенных LC-ячеек.

Из большого многообразия возможных реализаций элементов были выбраны плоскопараллельные конденсаторы и стекловые индуктивности. Они позволили реализовать необходимые для нашей схемы значения элементов линии передач. Используются катушки индуктивности с квадратной формой витков. Построенная плата состоит из восьми слоев диэлектрика. Устройства, разработанные по данной технологии отличаются меньшими габаритами и большей плотностью расположения элементов (рис. 7) [7].

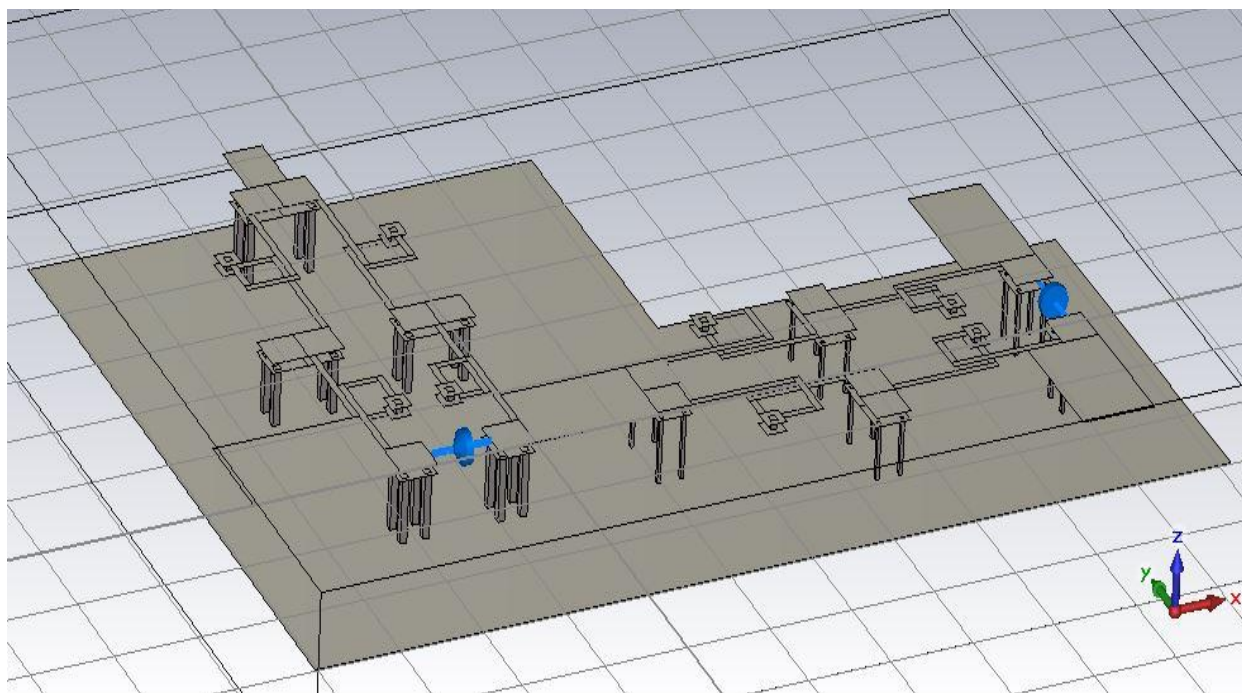


Рис. 7. Вид делителя мощности по LTCC-технологии

Толщина слоев диэлектрика $h=95$ мкм. Диэлектрические слои выполнены из материала, широко применяемого в LTCC-технологии: DuPontGreenTapeTM со значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 7,8$ и тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,002$. Максимальное различие коэффициентов передачи для трех выходов составило не более 1 дБ (рис. 8, а), развязка между выходными каналами – не более 25 дБ (рис. 8, б). Значение КСВн < 1,2 на данном этапе не достигнуто. КСВ < 1,35 (рис. 8, в).

Высокая плотность расположения элементов приводит к трудности расчета электромагнитного поля такой структуры, а следовательно, к значительному увеличению времени анализа такой структуры. Точная подстройка параметров для обеспечения требуемых характеристик занимает продолжительное время.

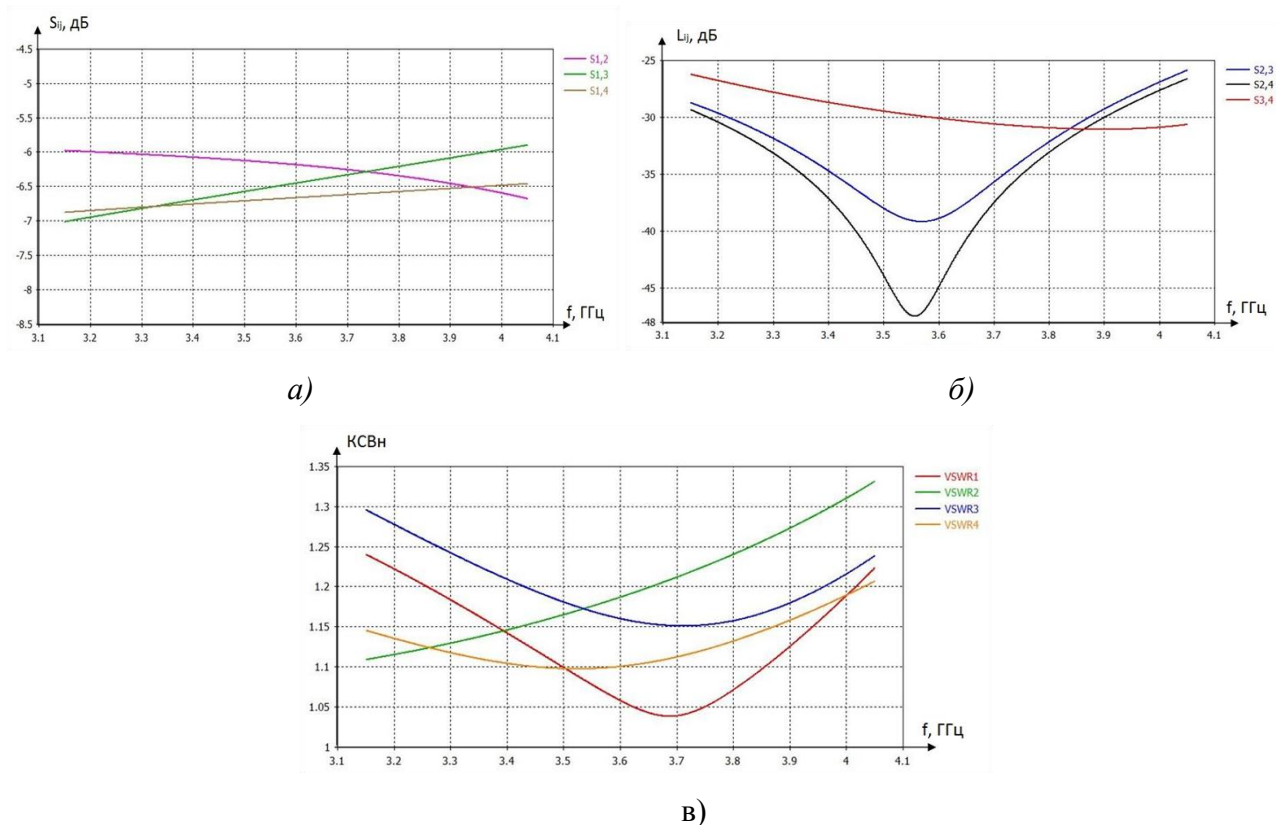


Рис. 8. Характеристики делителя мощности в исполнении LTCC-технологии:
a – деление мощности между выходами; *б* – развязка выходов; *в* – КСВн входа и выходов

Заключение

В данной работе приведены результаты расчета модели трехканального делителя мощности для частот СВЧ диапазона. Для расчета устройства использованы программные пакеты AWR, HFSS и CST Microwave Studio. Создан алгоритм расчета, позволяющий быстро и эффективно проводить расчеты основных параметров и характеристик трехканального делителя мощности, а также моделировать и оптимизировать другие возможные реализации устройства СВЧ с параметрами, превышающими существующие аналоги.

Библиографический список

1. Конструкции СВЧ устройств и экранов: учеб. пособие для вузов / А.М. Чернушенко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
2. Fast design method and validation of very wideband tapered Wilkinson divider / E. Miralles [et al.] // Microwave Conference (EuMC). – Paris, 2015. P. 119–122.
3. **Chen, H.H.** A tri-band Wilkinson power divider utilizing coupled lines/ H.H. Chen, Y.H. Pang // Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on. – Spokane, WA, 2011. – P. 25–28.
4. **Фуско, В.** СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: [пер. с англ.] / В Фуско. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
5. **Мякишева, М.С.** Разработка трехканального делителя и исследование его характеристик / М.С. Мякишева, К.И. Кисиленко // Будущее технической науки БТН-2016: материалы XV междунар. молодежной научно-технич. конф. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 405–406.
6. **Симин, А.** Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига. Ч. 2. Средства проектирования и реализации пассивных устройств / А. Симин, Д. Холодняк // Компоненты и Технологии. – 2005. – №50. – С. 210–216.

7. Симин, А. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига. Ч. 3. Активные устройства, антенны и многофункциональные СВЧ модули/ А. Симин, Д. Холодняк // Компоненты и Технологии. – 2005. – №51. – С. 208–213.

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2016*

K.I. Kisilenko, M.S. Myakisheva, E.P. Timofeev

DESIGN THREE-CHANNEL SPLITTER IN THE MICROWAVE RANGE

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

Purpose: Create and measurement three-channel splitter in microwave range.

Design/methodology/approach: The design is based on the divider ring, called the Wilkinson bridge. Simulation and calculation of electrical parameters of the divider was conducted by means of numerical simulation software package.

Originality/value: Simulation device structure in the range 3.15 - 4.05 GHz produced the following results: the input and output VSWR of less than 1.2; isolation between outputs of at least 25 dB; an equal division of power at the outputs of the divider.

Key words: splitter, power divider, ring divider Wilkinson Bridge, the microwave range, LTCC, modeling, CAD, CST Studio, HFSS.