

Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств

Д. Г. Фомин ✉, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских,
Д. С. Клыгач, М. Г. Вахитов

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Россия, 454080, г. Челябинск, Проспект Ленина, 76

✉ Fomin95@ya.ru

Аннотация

В статье представлен краткий обзор об особенностях применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств современного радиоэлектронного оборудования. Описывается объемно-модульный способ реализации СВЧ устройств, позволяющий улучшить их массогабаритные характеристики и при этом сохранить и увеличить их функциональные возможности. Сформулированы основные принципы построения объемно-модульных СВЧ электронных устройств и приведены результаты численного моделирования электродинамических характеристик полосково-щелевого перехода – основного базового их элемента. Рассмотрен способ количественной оценки влияния объемно-модульной технологии на массогабаритные характеристики СВЧ электронных устройств. Перечислены основные преимущества и недостатки объемно-модульной технологии.

Ключевые слова

объемно-модульная технология, конструирование, СВЧ электронные устройства, S-параметры

Для цитирования

Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н., Клыгач Д. С., Вахитов М. Г. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001.

Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices

D.G. Fomin ✉, N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh,
D.S. Klygach, M.G. Vakhitov

South Ural State University (National Research University),
76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

✉ Fomin95@ya.ru

Abstract

State of problem. Today a significant part of passive microwave electronic devices is implemented in the form of single-layer structures. In some cases such approach leads to an increase in the overall dimensions characteristics of electronic equipment. Moreover the application of single-layer microwave boards leads to the complexity of replacing individual functional units. Therefore the replacement of the entire microwave board is required to improve any of its functional part. It is nonproft economically and inefficient technologically. Significant progress in eliminating the above mentioned disadvantages may be achieved by the application of volume-modular technology of design microwave electronic devices. **Purpose.** The purpose of the research is to present a brief overview of the features of the application of volume-modular technology in the design of microwave electronic devices of modern radio-electronic equipment. The volume-modular way of implementing microwave devices is described. It allows improving their weight and overall dimension characteristics and at the same time maintaining and increasing their functionality. The basic principles of design of volume-modular microwave electronic devices are formulated. The results of numerical simulation of the electrodynamics characteristics of a strip-slot transition are presented. The method for quantitative assessment of the influence of volume-modular technology on the weight and dimensions characteristics of microwave electronic devices is considered. The main advantages and disadvantages of volume-modular technology are listed. **Results.** We demonstrate a possibility of reducing the overall dimensions characteristics of passive microwave electronic devices by more than 10 times while maintaining their electrical parameters. Each component is presented in the form of a structurally separate and complete board with unified overall and connecting dimensions. The standard electromagnetic coupling between functional parts makes it possible to assemble microwave electronic devices with specified electrodynamics characteristics from the base elements.

Keywords

volume-modular technology, design, microwave electronic devices, S-parameters

For citation

Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N., Klygach D. S., Vakhitov M. G. Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001.

Введение

В связи со значительным развитием электронной компонентной базы происходит широкое распространение идей, методов и устройств радиоэлектроники в различных областях науки, техники и телекоммуникационных технологий [1]. На сегодняшний день значительная часть пассивных СВЧ плат выполняется в виде однослойных конструкций, что приводит в ряде случаев к увеличению габаритных размеров радиоэлектронной аппаратуры. Также применение однослойных СВЧ плат приводит к сложности замены отдельных функциональных узлов. В этих случаях требуется замена всей СВЧ платы, что экономически и технологически невыгодно.

Существенного прогресса в устранении вышеуказанных недостатков можно добиться за счет применения объемно-модульной технологии построения СВЧ устройств. Объемно-модульная технология позволяет реализовать СВЧ устройства в виде многослойных конструкций с высокой степенью интеграции их составных частей (базовых элементов). При этом каждая составная часть представлена в виде конструктивно обособленной и функционально законченной платы, с унифицированными габаритными, присоединительными размерами и заданным способом электромагнитной связи с другими составными частями, что позволяет собирать СВЧ устройства из базовых элементов с необходимыми электродинамическими характеристиками [2–11].

Целью данной работы является формулировка основных принципов построения объемно-модульных СВЧ электронных устройств и исследование электродинамических характеристик одного из вариантов построения полосково-щелевого перехода – основного базового их элемента.

1. Объемно-модульная технология

Объемно-модульная технология предполагает создание на основе известных однослойных СВЧ устройств многослойного аналога, представляющего собой модульную конструкцию из СВЧ плат, где на каждом из слоев реализованы одна или несколько функциональных частей (принцип декомпозиции) исходного устройства. При этом связь между функциональными элементами, расположенными на различных этажах, осуществляется с помощью электромагнитного поля [2].

Примером реализации объемно-модульной технологии является СВЧ делитель мощности (рис. 1). Данное устройство представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из 6 СВЧ плат.

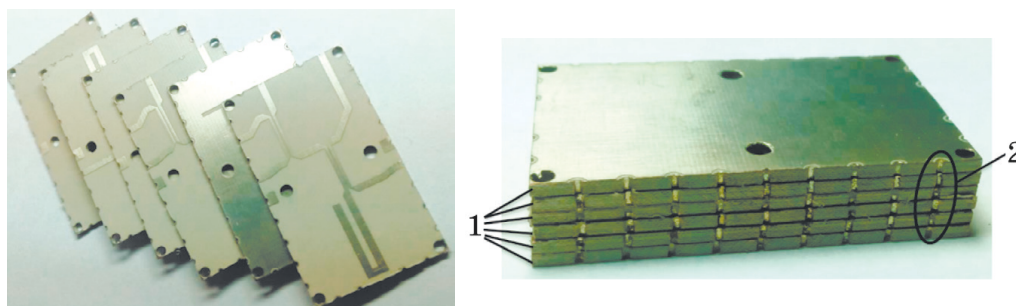


Рис. 1. СВЧ делитель мощности:

- 1 – базовые элементы, реализованные на двуслойном фольгированном СВЧ диэлектрике Arlon AD350, 2 – переходные полуотверстия

Fig. 1. Microwave power divider:

- 1 – basic elements, implemented on a two-layer foil microwave dielectric Arlon AD350, 2 – transitional half-holes

2. Основные принципы объемно-модульной технологии

Реализация объемно-модульной технологии пассивных СВЧ устройств, позволяющей улучшить массогабаритные характеристики при сохранении их электрических параметров, основана на соблюдении трех основных принципов (рис. 2).

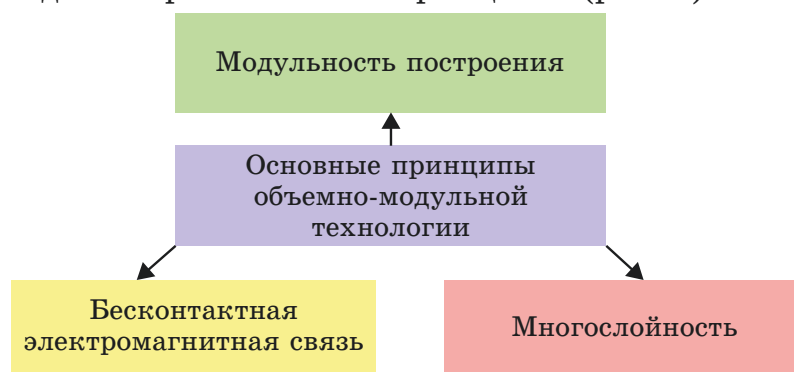


Рис. 2. Основные принципы объемно-модульной технологии

Fig. 2. Basic principles of volumetric modular technology

2.1. Первый принцип объемно-модульной технологии

Первым принципом является принцип многослойности. Реализация этого принципа основана на декомпозиции электрической схемы СВЧ устройства в плоскостном исполнении на простейшие, но функционально законченные блоки. Каждому блоку отводится отдельный конструктивный слой. Благодаря многослойности построения конструкции можно значительно сокра-

тить массогабаритные показатели изделия в целом [2]. Однако реализация этого принципа сопряжена с проблемой реализации электромагнитной взаимосвязи слоев друг с другом. Пример декомпозиции гипотетического пассивного СВЧ устройства в четырехслойную объемно-модульную структуру представлен на рис. 3.

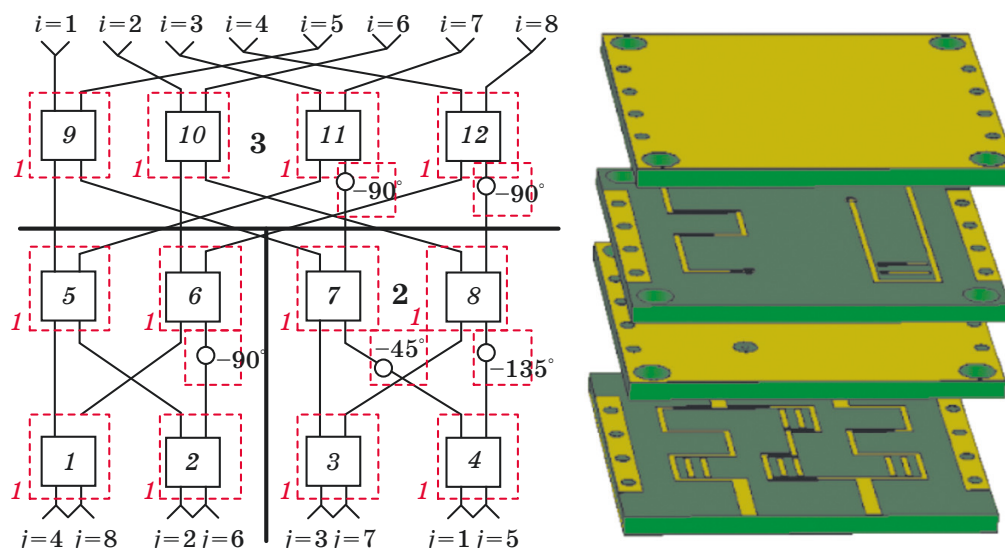


Рис. 3. Декомпозиция гипотетического пассивного СВЧ устройства в четырехслойную объемно-модульную структуру

Fig. 3. Decomposition of a hypothetical passive microwave device into a four-layer volume-modular structure

2.2. Второй принцип объемно-модульной технологии

Вторым принципом объемно-модульной технологии пассивных СВЧ электронных устройств является принцип модульности изделия. Под модульностью понимается такое конструктивное построение СВЧ устройства, которое позволяет заложить в него возможность модернизации и технологичность (рис. 4). Такой ресурс позволяет оперативно осуществлять замену одного или нескольких слоев конструкции на другие, а также проводить корректировку эксплуатационных характеристик изделия [2].

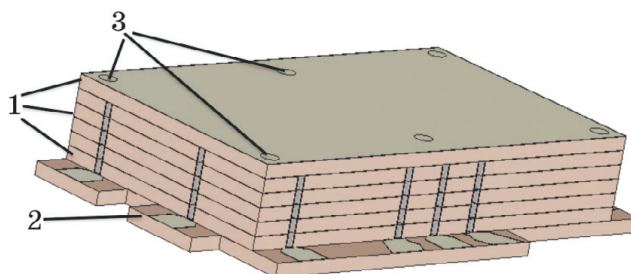


Рис. 4. Структура гибридного делителя:

1 – базовые элементы, 2 – согласующая плата, 3 – элементы крепления

Fig. 4. Hybrid divider structure:

1 – basic elements, 2 – matching board, 3 – fastening elements

2.3. Третий принцип объемно-модульной технологии

Из реализации принципа модульности изделия вытекает третий, самый важный принцип объемно-модульной технологии: принцип бесконтактной электромагнитной связи между слоями объемно-модульной конструкции. Как правило, для эффективной передачи электромагнитной энергии от одного слоя к другому используются четвертьволновые отрезки, позволяющие создавать пучности электрического или магнитного полей в заданной области. Главное преимущество бесконтактной электромагнитной связи между слоями заключается в отсутствии электрических контактов, сопряженных с использованием переходных отверстий и кабельных переходов, что значительно упрощает разбор конструкции при необходимости замены отдельного слоя.

3. Базовые элементы для бесконтактной электромагнитной связи между слоями

Связь между слоями объемно-модульных СВЧ устройств осуществляется с помощью полосково-щелевых переходов. В настоящий момент в литературе можно встретить несколько различных типов переходов, реализованных на базе полосковой и щелевой линий (рис. 5).

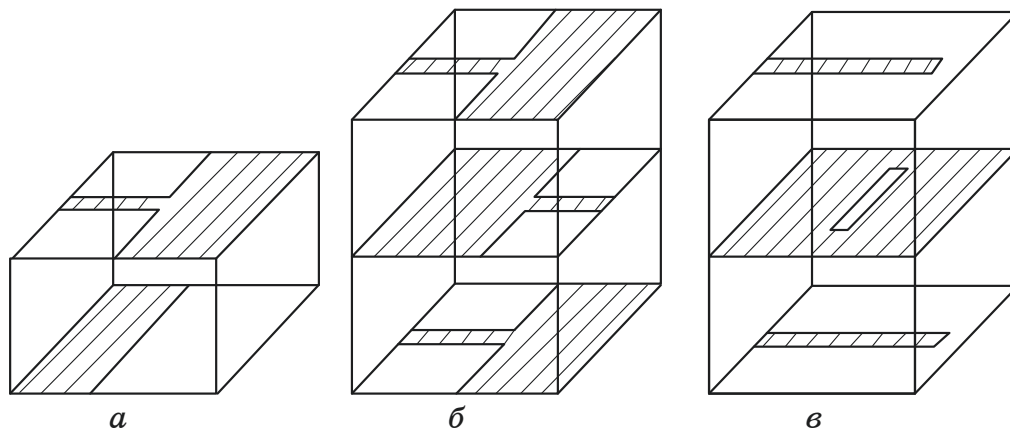


Рис. 5. Типы полосково-щелевых переходов:

- а) переход полосок – объемная щель; б) переход полосок – объемная щель – полосок; в) переход полосок – щель – полосок

Fig. 5. Types of strip-slot transitions:

- a) strip to volume slot transition; b) strip – to volume slot – to strip transition; c) strip – to slot – to stripe transition

Рассмотрим более подробно электродинамические параметры для конструктивного исполнения полосково-щелевого перехода (рис. 5 в), полученные путем численного моделирования.

Из представленных зависимостей S-параметров (рис. 6) следует, что относительная полоса пропускания по уровню ко-

эфициента передачи -3 дБ для конструктивного исполнения полосково-щелевого перехода (рис. 5 в), составляет приблизительно 13,5 %.

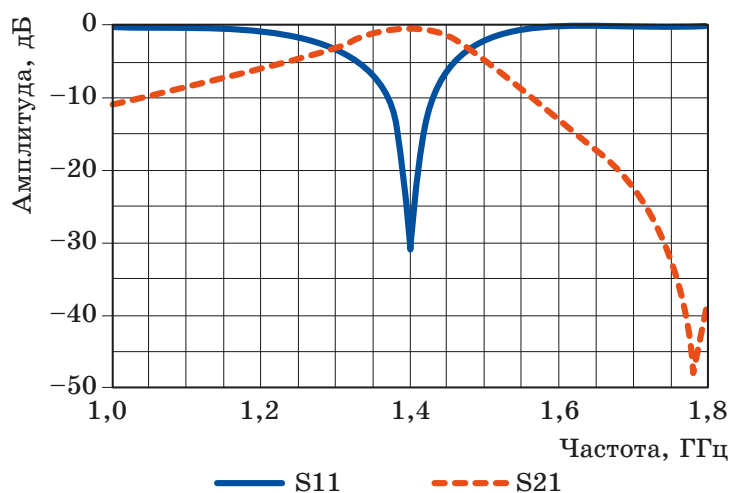


Рис. 6. S-параметры полосково-щелевого перехода в диапазоне частот
Fig. 6. S-parameters of the strip-slot transition in the frequency range

Также известно конструктивное исполнение широкополосного полосково-щелевого перехода (рис. 7), отличающегося П-образной формой полосковых линий. Электродинамические параметры для широкополосного полосково-щелевого перехода, получены путем численного моделирования (рис. 8).

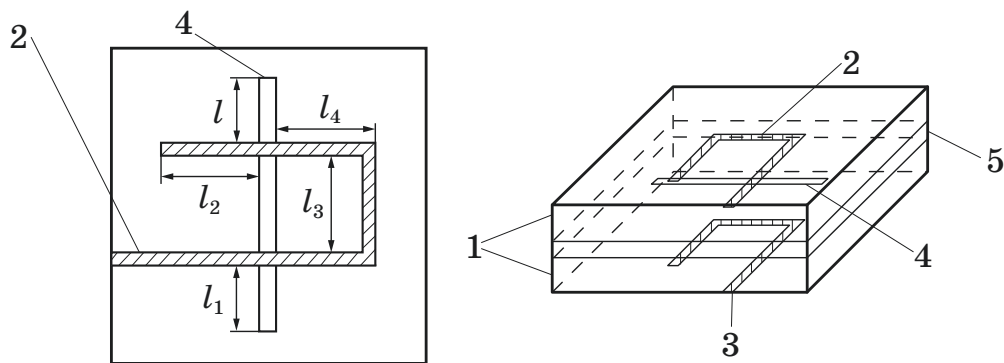


Рис. 7. Широкополосный полосково-щелевой переход:
 1 – элементы многослойной диэлектрической конструкции,
 2, 3 – полосковые линии передачи, 4 – щелевой резонатор,
 5 – экранирующий слой

Fig. 7. Broadband strip-slot transition:
 1 – elements of a multilayer dielectric structure, 2, 3 – strip transmission lines, 4 – slot resonator, 5 – shielding layer

Из представленных зависимостей S-параметров (рис. 8) следует, что относительная полоса пропускания по уровню коэффициента передачи -3 дБ для широкополосного полосково-

щелевого перехода (рис. 7), составляет приблизительно 45 %. Исследования выполнены с использованием суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [12].

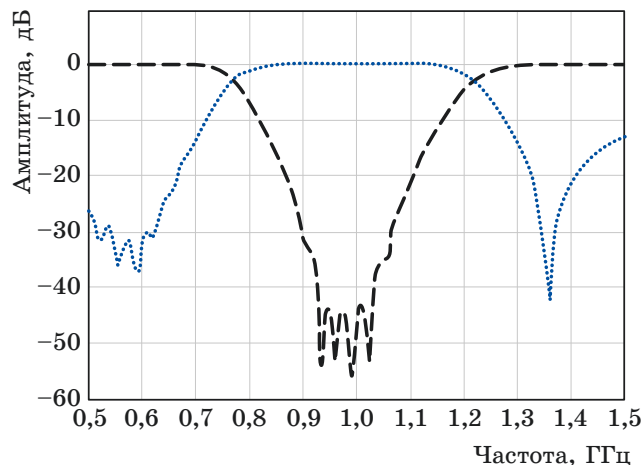


Рис. 8. S-параметры широкополосного полосково-щелевого перехода в диапазоне частот

Fig. 8. S-parameters of a broadband strip-slot transition in the frequency range

Таким образом, при объемно-модульном подходе в проектировании СВЧ электронных устройств можно реализовать как узкополосные устройства с ярко выраженными частотно-селективными характеристиками, так и широкополосные устройства, позволяющие одновременно работать в нескольких диапазонах частот.

4. Основные преимущества и недостатки объемно-модульной технологии и способы их оценки

Основные преимущества объемно-модульной технологии:

Во-первых, это почти кратное улучшение массогабаритных характеристик СВЧ устройства по сравнению с традиционной однослойной конструкцией. В основе уменьшения габаритных характеристик лежит оптимизация количества используемых слоев. Для количественной их оценки можно использовать габаритный коэффициент:

$$K = 6V \sqrt{\frac{\pi}{S^3}}, \quad (1)$$

где V – объем устройства, S – площадь поверхности объемно-модульного устройства.

Наилучший результат достигается при сферической форме модуля ($K = 1$). Но такая форма модульной конструкции нецелесообразна с точки зрения технологичности работы с ней. По-

этому наиболее предпочтительной является кубическая форма конструкции ($K = 0,7$).

Дополнительные условия уменьшения габаритных характеристик устройства связаны с выбором наиболее целесообразной в каждом конкретном случае линии передачи (полосковой, щелевой, компланарной и т.д.). Например, при использовании симметричной и несимметричной полосковой линии в составе многослойной конструкции по массогабаритным характеристикам выигрывает симметричная линия передачи (рис. 9). Особенно это заметно при увеличении количества слоев.

Во-вторых, благодаря высокой степени стандартизации геометрических размеров базовых элементов возникает возможность модернизации функциональных узлов путем их замены внутри конструкции. Благодаря разработке унифицированных элементов межслойной связи достигается высокий потенциал на оперативную замену отдельных слоев в короткие сроки.

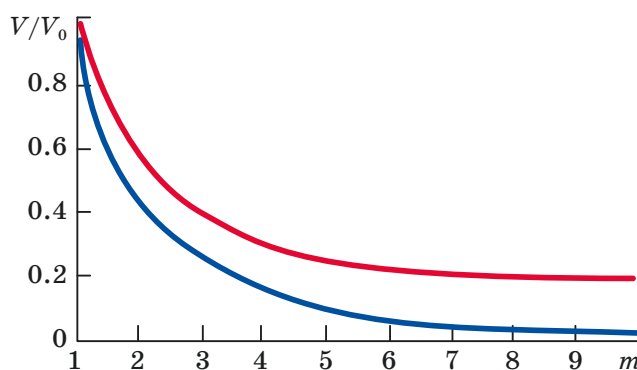


Рис. 9. Зависимость габаритов объемно-модульного устройства от числа слоев

1 – с использованием симметричных полосковых линий,
2 – с использованием несимметричных полосковых линий

Fig. 9. Dependence of the overall characteristics of the volume-modular device on the number of layers

1 – using symmetrical strip lines, 2 – using asymmetrical strip lines

В-третьих, при объемно-модульном подходе в конструировании СВЧ электронных устройств можно реализовать как узкополосные устройства с ярко выраженными частотно-селективными характеристиками, так и широкополосные устройства, позволяющие одновременно работать в нескольких диапазонах частот.

К основным недостаткам объемно-модульной технологии можно отнести следующие:

- объемно-модульным устройствам, как и их традиционным однослойным СВЧ аналогам свойственно ограничение по мощности в пределах от единиц до десятков кВт. Более того, для объемно-модульных устройств данная проблема еще более кри-

тична в связи с высокой плотностью размещения функционала и, как следствие, повышении риска выхода из строя вследствие высокочастотного пробоя или перегрева;

– высокая плотность компоновки функционала объемно-модульных устройств повышает вероятность возникновения электромагнитных помех, создаваемых отдельными элементами. В связи с этим при разработке объемно-модульного СВЧ устройства необходимо тщательно подходить к проблеме экранировки базовых элементов и стремиться избегать близости чувствительных элементов тракта с источниками электромагнитных помех (например, при реализации объемно-модульного дуплексера).

Выводы

Необходимость конструктивного совершенствования пассивных СВЧ электронных устройств обусловлена тем, что в последние годы стало очевидным, что плоскостные традиционные схемы их построения достигли потенциальных пределов по массогабаритным показателям. Для них характерна также слабая ремонтпригодность и отсутствие функциональной гибкости. Существенный прогресс в снижении массогабаритных характеристик указанных устройств может достигаться за счет реализации многослойности их конструкций. Рассмотренные в статье принципы построения СВЧ электронных устройств с использованием объемно-модульной технологии могут быть использованы при их проектировании.

Результаты проведенного исследования указывают на реальную возможность уменьшения более чем в 10 раз габаритных показателей пассивных СВЧ устройств, реализованных согласно принципам объемно-модульной технологии с сохранением электрических параметров, характерных для традиционной однослойной технологии. При этом каждая составная часть представлена в виде конструктивно обособленной и законченной платы, с унифицированными габаритными, присоединительными размерами и стандартным способом электромагнитной связи, позволяющим собирать из базовых элементов СВЧ устройства с заданными электродинамическими характеристиками [2].

Список литературы

1. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Wiley; 2011. 756 p.
2. Дударев Н.В. Разработка метода оптимизации СВЧ узлов диаграммообразующих схем: дис. канд. техн. наук. Самара; 2020. 158 с.
3. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N. Scattering matrix simulation of the volumetric strip-slot transition and estimation of its frequency properties. In: *Proc. of 2nd International Scientific Conference on*

Applied Physics, Information Technologies and Engineering. Krasnoyarsk; 2020. P. 1–6.

4. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65(8):2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

5. Xiaobo H., Wu K.L. A broadband and vialess vertical microstrip-to-microstrip transition. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012;60(4):938–944. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2185945

6. Kim J.P., Park W.S. Novel configurations of planar multilayer magic-T using microstrip-slotline transitions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(7):1683–1688. DOI: 10.1109/TMTT.2002.800387

7. Hou F., Kong D. A novel broadband magic-T based on stripline Y-junction and stripline-slotline transition. In: *2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, China, 5–8 May 2012*. IEEE; 2012. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICMMT.2012.6230034

8. Wong M.-F., Hanna V.F., Picon O., Baudrand H. Analysis and design of slot-coupled directional couplers between double-sided substrate microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1991;29(12):2123–2129. DOI: 10.1109/22.106554

9. Клыгач Д.С., Вахитов М.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н., Дударев С.В. Моделирование объемного полосково-щелевого перехода. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;(7). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.7.11

10. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ*. М.: Высшая школа; 1988. 432 с.

11. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. *Объемные интегральные схемы СВЧ*. М.: Наука; 1987. 256 с.

12. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018*. IEEE; 2018. P. 1–7. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570068

References

1. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Wiley; 2011. 756 p.
2. Dudarev N.V. *Development of a method for optimizing microwave units of diagram-forming circuits: Master's thesis*. Samara; 2020. 158 p. (In Russ.)
3. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N. Scattering matrix simulation of the volumetric strip-slot transition and estimation of its frequency properties. In: *Proc. of 2nd International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering*. Krasnoyarsk; 2020, pp. 1–6.

4. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65(8):2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418
5. Xiaobo H., Wu K.L. A broadband and vialess vertical microstrip-to-microstrip transition. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012;60(4):938–944. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2185945
6. Kim J.P., Park W.S. Novel configurations of planar multilayer magic-T using microstrip-slotline transitions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(7):1683–1688. DOI: 10.1109/TMTT.2002.800387
7. Hou F., Kong D. A novel broadband magic-T based on stripline Y-junction and stripline-slotline transition. In: *2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, China, 5–8 May 2012*. IEEE; 2012, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICMMT.2012.6230034
8. Wong M.-F., Hanna V.F., Picon O., Baudrand H. Analysis and design of slot-coupled directional couplers between double-sided substrate microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1991;29(12):2123–2129. DOI: 10.1109/22.106554
9. Klygach D.S., Vakhitov M.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Dudarev S.V. Simulation of a volumetric strip-slot transition. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2020;(7). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.7.11
10. Sazonov D.M. *Antennas and microwave devices*. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 432 p. (In Russ.)
11. Gvozdev V.I., Nefedov E.I. Volumetric integrated circuits microwave. Moscow: Nauka; 1987. 256 p. (In Russ.)
12. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018*. IEEE; 2018, pp. 1–7. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570068

Информация об авторах

Фомин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Дударев Николай Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Даровских Станислав Никифорович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Клыгач Денис Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Вахитов Максим Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Information about the authors

Dmitriy G. Fomin, post-graduate student, Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk.

Nikolay V. Dudarev, Ph.D., Researcher, Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk.

Stanislav N. Darovskikh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk.

Denis S. Klygach, Ph.D., Senior Researcher, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk.

Maxim G. Vakhitov, Ph.D., Senior Researcher, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk.

Поступила / Received: 10.05.2021

Принята в печать / Accepted: 17.05.2021