

Инфокоммуникационные технологии и системы Infocommunication technologies and systems

Научная статья
УДК 621.372.543.2
DOI: 10.14529/ctcr220405

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.Н. Даровских, darovskikhsn@susu.ru

Д.Г. Фомин, fomindg@susu.ru

Н.В. Дударев, dudarevnn@susu.ru

Д.С. Клыгач, klygachds@susu.ru

М.Г. Вахитов, vakhitovmg@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Частотно-селективные СВЧ-устройства являются неотъемлемой частью антенно-фидерного тракта систем радиолокации и радионавигации, а также других инфокоммуникационных систем связи. Наибольшее распространение в указанных системах получили полосно-пропускающие фильтры. Они обеспечивают первичную селекцию полезного сигнала в смеси его с шумом. Перспективным направлением конструирования СВЧ полосно-пропускающих фильтров является их многослойное исполнение с применением полосковых и щелевых резонаторов. В настоящее время такая конструкция СВЧ полосно-пропускающих фильтров до конца не исследована. **Цель исследования.** Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии их построения. При этом экспериментальному исследованию подлежат их амплитудно-частотные характеристики, в том числе элементы матрицы рассеяния – коэффициент отражения и коэффициент передачи в диапазоне частот. **Материалы и методы.** В рамках настоящего исследования проведено компьютерное моделирование полосно-пропускающих фильтров в программе электродинамического моделирования, где были подобраны основные геометрические размеры элементов топологии фильтров и предварительно исследованы их амплитудно-частотные характеристики. При этом особенностью исследуемых полосно-пропускающих фильтров является применение в их конструкции отечественного СВЧ-материала на основе слоев фторопласта – ФАФ-4Д, что соответствует программе импортозамещения. По результатам компьютерного моделирования были изготовлены макеты полосно-пропускающих фильтров и проведено их экспериментальное исследование при использовании векторного анализатора цепей в диапазоне частот до 2 ГГц. **Результаты.** По результатам экспериментального исследования было определено хорошее качественное и количественное согласование теоретических и экспериментальных данных. Так, максимальное отклонение значения амплитуды коэффициента передачи, полученного по результатам компьютерного моделирования, от результатов эксперимента составляет не более 0,53 дБ; максимальное отклонение границ полосы пропускания составляет не более 30 МГц (3 % относительно центральной частоты). **Заключение.** Результаты экспериментального исследования доказывают возможность разработки и применения СВЧ полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии.

Ключевые слова: многослойная полосково-щелевая технология, полосовой фильтр, СВЧ-измерения

Для цитирования: Экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / С.Н. Даровских, Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 48–55. DOI: 10.14529/ctcr220405

EXPERIMENTAL STUDY OF BAND PASS FILTERS BASED ON MULTILAYER TECHNOLOGY

S.N. Darovskikh, darovskikhsn@susu.ru

D.G. Fomin, fomindg@susu.ru

N.V. Dudarev, dudarevnn@susu.ru

D.S. Klygach, klygachds@susu.ru

M.G. Vakhitov, vakhitovmg@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Frequency-selective microwave devices are an integral part of the antenna-feeder path of radar and radio navigation systems, and other infocommunication systems. Band pass filters are the most widely used in these systems. They provide primary selection of a useful signal mixed with noise. A promising direction in the design of microwave band pass filters is their multilayer design using strip and slot resonators. At present, such a design of microwave band pass filters has not been fully investigated. **Purpose of the study.** The purpose of this paper is an experimental study of band pass filters based on the multilayer strip-slot technology of their design. At the same time, their amplitude-frequency characteristics, including the reflection coefficient and the transmission coefficient in the frequency range, are subject to experimental study. **Materials and methods.** The computer simulation of band pass filters was carried out in electro-dynamics simulation program, where the main geometric dimensions of the filter topology elements were selected and their amplitude-frequency characteristics were preliminary studied. At the same time, a feature of the studied band pass filters is the use in their design of domestic microwave material based on fluoroplast layers – FAF-4D, which corresponds to the import substitution program. Based on the results of computer simulation, prototypes of band pass filters were made and their experimental study was carried out using a vector network analyzer in the frequency range up to 2 GHz. **Results.** According to the results of the experimental study, a good qualitative and quantitative agreement between theoretical and experimental data was determined. Thus, the maximum deviation of the gain amplitude value obtained from the results of computer simulation from the experimental results is no more than 0.53 dB; the maximum deviation of the bandwidth limits is no more than 30 MHz (3% relative to the center frequency). **Conclusion.** The results of the experimental study prove the possibility of developing and using microwave band pass filters based on multilayer strip-slot technology.

Keywords: multilayer strip-slot technology, band pass filter, microwave measurements

For citation: Darovskikh S.N., Fomin D.G., Dudarev N.V., Klygach D.S., Vakhitov M.G. Experimental study of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):48–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220405

Введение

В настоящее время известны различные виды полосно-пропускающих СВЧ-фильтров. Они отличаются друг от друга своими массогабаритными характеристиками, конструктивным исполнением, технологией изготовления, а также удобством настройки и регулировки основных электрических параметров. Широко известны своим применением на практике следующие виды полосовых фильтров: волноводные фильтры [1], полосковые/микроросконовые фильтры [2–6], фильтры на сосредоточенных элементах [7] и др. [8–10]. Одним из перспективных направлений конструирования полосовых фильтров является применение многослойной полосково-щелевой технологии, основанной на соблюдении трех основных принципов: принцип бесконтактной электромагнитной связи, принцип многослойности, принцип модульности построения [11–14]. Настоящее исследование является логическим продолжением работы [14], в которой представлено теоретическое исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии, в том числе при одно-, двух- и трехмодовом режимах «возбуждения»

щелевого резонатора в составе их конструкции. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии.

1. Методы исследования

В рамках настоящего исследования проведено компьютерное моделирование в программе электродинамического моделирования, где были подобраны основные геометрические размеры элементов топологии фильтров и предварительно исследованы их амплитудно-частотные характеристики. Исследования выполнены при использовании суперкомпьютерных ресурсов Южно-Уральского государственного университета [15]. По результатам компьютерного моделирования были изготовлены макеты фильтров с применением отечественных СВЧ-материалов, таких как ФАФ-4Д, и проведено их экспериментальное исследование при использовании векторного анализатора цепей. В настоящей работе были исследованы три типа конструкции полосно-пропускающих фильтров (ППФ): 1 – с режимом «возбуждения» первой (основной) моды щелевого резонатора, 2 – с режимом «возбуждения» первой и второй мод щелевого резонатора, 3 – с режимом «возбуждения» первой, второй и третьей мод щелевого резонатора. При этом основная мода щелевого резонатора в составе конструкции ППФ № 1 соответствовала частоте – 1000 МГц, в составе конструкции ППФ № 2 – 660 МГц, в составе конструкции ППФ № 3 – 500 МГц. Центральная частота во всех случаях – 1000 МГц. Основные размеры для каждой исследуемой конструкции приведены в табл. 1.

Параметры основных элементов конструкций ППФ

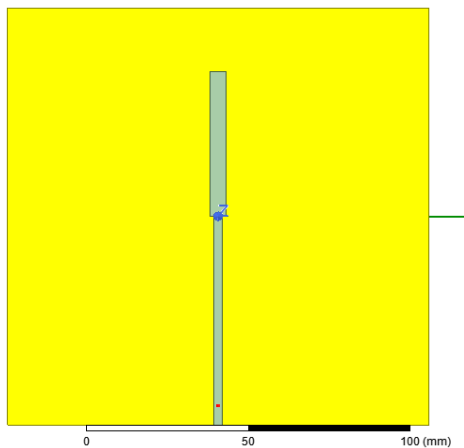
Таблица 1

Parameters of the main elements of BPFs designs

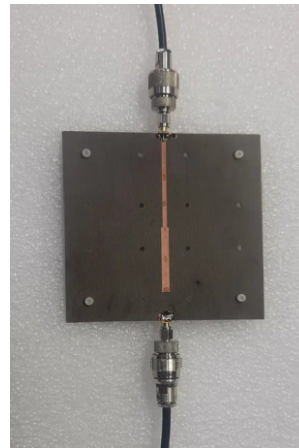
Table 1

Параметр	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Параметры подложки	Материал ФАФ-4Д, толщина 1 мм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 2,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,018$		
Размер диэлектрического основания, мм	130 × 130	200 × 120	220 × 140
Длина полоскового резонатора, мм / электрическая длина на центральной частоте, °	45 / 79,6	49 / 86,7	50 / 88,4
Ширина полоскового резонатора, мм / волновое сопротивление, Ом	5 / 33,5		
Длина щелевого резонатора, мм / электрическая длина на частоте основной моды щелевого резонатора, °	102 / 180,5	160 / 186,9	205 / 181,4
Ширина щелевого резонатора, мм / волновое сопротивление, Ом	0,3 / 55		

Компьютерные модели исследуемых конструкций ППФ, используемые при компьютерном моделировании, а также макеты, изготовленные на их основе, приведены на рис. 1–3.



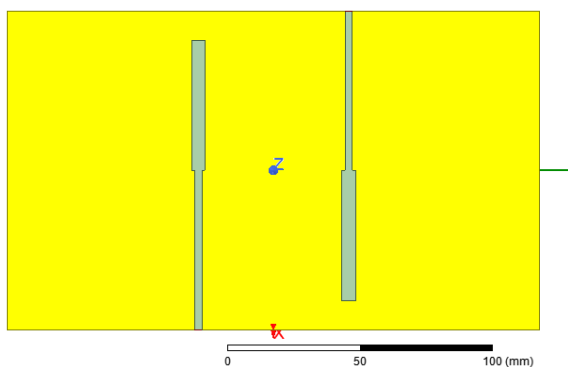
a)



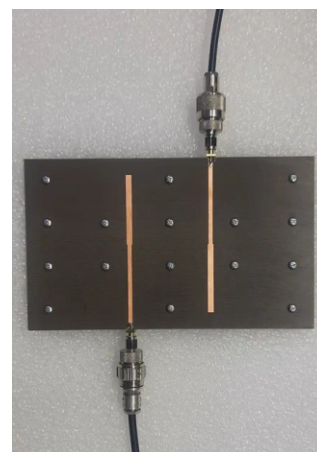
b)

Рис. 1. Конструкция ППФ № 1: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 1. Design of BPF No. 1: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout



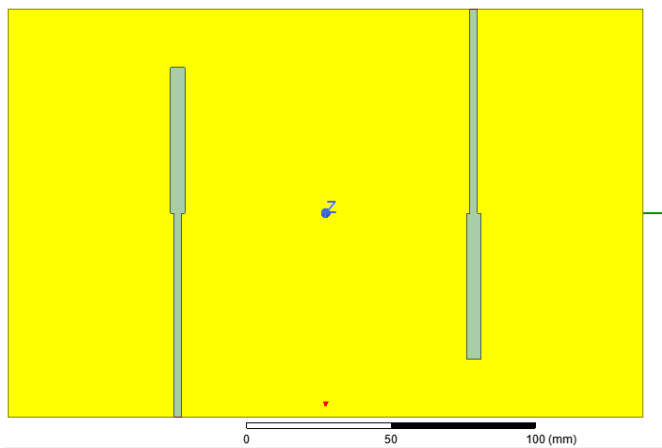
a)



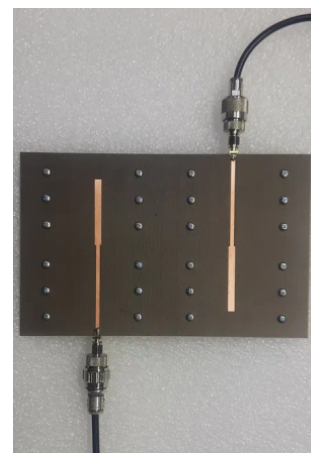
b)

Рис. 2. Конструкция ППФ № 2: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 2. Design of BPF No. 2: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout



a)



b)

Рис. 3. Конструкция ППФ № 3: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 3. Design of BPF No. 3: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout

2. Результаты

Результаты теоретического и экспериментального исследований электрических характеристик рассматриваемых конструкций ППФ приведены на рис. 4–6, а также в табл. 2.

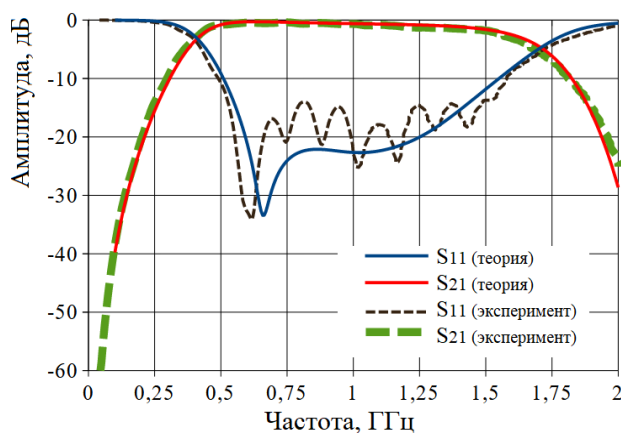


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 1 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 4. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 1 in the frequency range up to 2 GHz

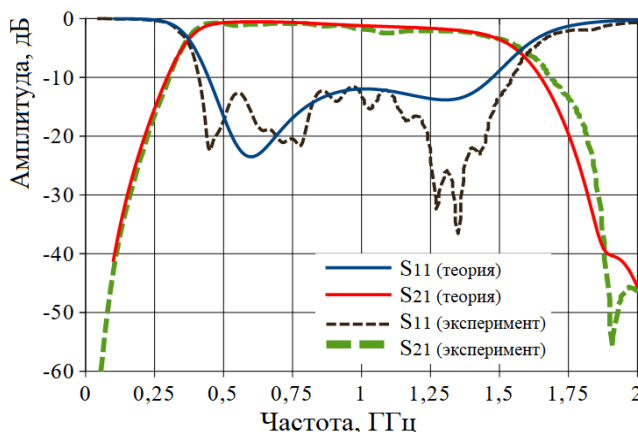


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 2 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 5. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 2 in the frequency range up to 2 GHz

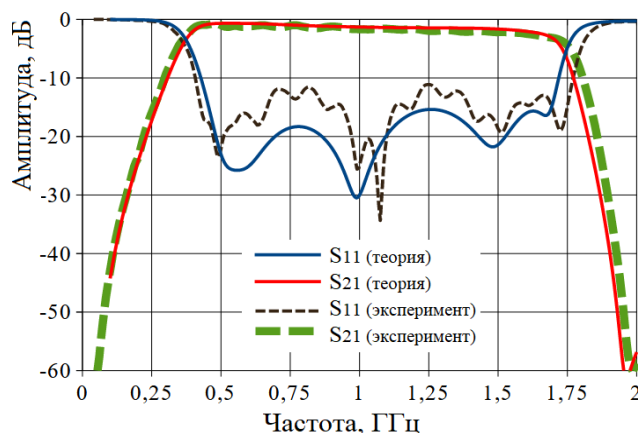


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 3 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 6. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 3 in the frequency range up to 2 GHz

Таблица 2

Результаты исследований

Table 2

Research results

Параметр	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, ГГц (теория/эксперимент)	(0,41–1,63)/ (0,4–1,6)	(0,38–1,48)/ (0,37–1,48)	(0,38–1,69)/ (0,37–1,69)
Затухание на центральной частоте, дБ (теория/эксперимент)	0,62 / 0,68	1,08 / 1,61	1,25 / 1,5
Полоса пропускания по уровню КСВН $\leq 1,9$, ГГц (теория/эксперимент)	(0,51–1,55)/ (0,49–1,58)	(0,44–1,47)/ (0,41–1,54)	(0,43–1,72)/ (0,41–1,77)

Из представленных графических зависимостей и табличных данных следует, что теоретические результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования, а также данные экспериментальных исследований находятся в хорошем качественном и количественном согласовании. Отклонение коэффициента передачи на центральной частоте составляет не более 0,53 дБ; отклонение границы полосы пропускания составляет не более 30 МГц (3 % относительно центральной частоты). Отклонение границы полосы пропускания по уровню КСВН менее 1,9 составляет не более 70 МГц (7,2 % относительно центральной частоты). Это связано с наличием дополнительных потерь на коаксиальных кабелях, используемых при экспериментальных исследованиях. Наличие дополнительных потерь уменьшает уровень отраженной мощности и приводит к улучшению КСВН.

Заключение

В работе представлены теоретическое и экспериментальное исследования полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии, реализованных на отечественном СВЧ-материале ФАФ-4Д. Теоретические результаты получены при использовании программы численного электродинамического моделирования. Экспериментальные результаты получены на макетах исследуемых полосно-пропускающих фильтров при использовании векторного анализатора цепей. По результатам исследований получены частотные зависимости S-параметров исследуемых фильтров, которые находятся в хорошем качественном и количественном согласовании. Таким образом, возможность «возбуждения» многомодового режима щелевого резонатора в составе многослойных конструкций полосно-пропускающих фильтров экспериментально подтверждена.

Список литературы

1. Комаров В.В., Лукьянов М.А. Волноводные СВЧ-фильтры: технические решения, тенденции развития и методы расчёта. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. № 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.1.9
2. Kikkert C.J. A design technique for microstrip filters, Signal Processing and Communication Systems // 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCS.2008.4813713
3. Летавин Д.А. Способ миниатюризации микрополоскового двухшлейфного моста // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 41–46.
4. Letavin D.A., Alaev D.P. A compact 3-dB coupler with stubs // Journal of Physics: Conference Series. IC-MSQUARE 2020. 2021. Vol. 1730, no. 1. P. 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1730/1/012104
5. Letavin D.A., Terebov I.A. Investigation of a Broadband Five-Stub 3 dB Coupler Using Microstrip Cells // 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTTS 2020. September 2020. DOI: 10.1109/EWDTTS50664.2020.9224938
6. Chinig A. A Design of Microstrip Diplexer based on Modified Stepped Impedance Resonators // Mediterranean Telecommunications Journal. Jan. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–7.
7. Zukocinski M., Gołaszewski A.Z., Abramowicz A. Shaping frequency characteristics of

wideband direct-coupled resonator filters by means of electric and magnetic couplings // 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON). 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899835

8. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.

9. Matthaei G., Young L., Jones E.M.T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw Hill Book Company, 1971.

10. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. New York: Wiley. 2007. 772 p.

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

12. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices / N.V. Dudarev, D.G. Fomin, S.N. Darovskikh et al. // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021. 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

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

14. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин, С.Н. Даровских, Н.В. Дударев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2022. Т. 22, № 1. С. 77–87. DOI: 10.14529/ctcr220106

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

References

1. Komarov V.V., Lukyanov M.A. [Waveguide microwave filters technical solutions, development trends and calculation methods]. *Journal of Radio Electronics*. 2021;(1). (In Russ.) DOI: 10.30898/1684-1719.2021.1.9

2. Kikkert C.J. A design technique for microstrip filters, *Signal Processing and Communication Systems*. In: 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCS.2008.4813713

3. Letavin D.A. The method of miniaturization of a microstrip branch-line couplers. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics = Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. 2017;(5):41–46. (In Russ.)

4. Letavin D.A., Alaev D.P. A compact 3-dB coupler with stubs. *Journal of Physics: Conference Series. IC-MSQUARE 2020*. 2021;1730(1):012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1730/1/012104

5. Letavin D.A., Terebov I.A. Investigation of a Broadband Five-Stub 3 dB Coupler Using Microstrip Cells. In: 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTTS 2020. September 2020. DOI: 10.1109/EWDTTS50664.2020.9224938

6. Ching A. A Design of Microstrip Diplexer based on Modified Stepped Impedance Resonators. *Mediterranean Telecommunications Journal*. Jan. 2018;8(1):1–7.

7. Zukocinski M., Gołaszewski A.Z., Abramowicz A. Shaping frequency characteristics of wideband direct-coupled resonator filters by means of electric and magnetic couplings. In: 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON). 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899835

8. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2011. 732 p.

9. Matthaei G., Young L., Jones E.M.T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw Hill Book Company; 1971.

10. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. New York: Wiley; 2007. 772 p.

11. 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

12. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices. In: *2021 Ural Symposium on Bio-medical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021*; 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

13. 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;65:2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

14. Fomin D.G., Darovskikh S.N., Dudarev N.V., Prokopov I.I., Dudarev S.V. Simulation of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):77–87. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220106

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

Информация об авторах

Даровских Станислав Никифорович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; darovskikhsn@susu.ru.

Фомин Дмитрий Геннадьевич, младший научный сотрудник кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; fomindg@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, и. о. заведующего кафедрой инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dudarevnn@susu.ru.

Клыгач Денис Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; klygachds@susu.ru.

Вахитов Максим Григорьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vakhitovmg@susu.ru.

Information about the authors

Stanislav N. Darovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; darovskikhsn@susu.ru.

Dmitriy G. Fomin, Junior Researcher of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; fomindg@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Information and Communication Technologies, Acting Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevnn@susu.ru.

Denis S. Klygach, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; klygachds@susu.ru.

Maksim G. Vakhitov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vakhitovmg@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022

The article was submitted 05.07.2022