

EDN: HXUATR

УДК 621.396.96

## Experimental Investigation of the Characteristics of Strip-Band Pass Filters of the Microwave with Wide Stop Bands on a Symmetric Stripe Line in the Interests of Ensuring Electromagnetic Compatibility

Valery P. Berdyshev and Nikita V. Kopylov\*

*Military Academy of Aerospace Defense  
named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukova  
Tver, Russian Federation  
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense  
Yaroslavl, Russian Federation*

Received 17.05.2023, received in revised form 28.08.2023, accepted 04.09.2023

**Abstract.** The method described in the article refers to the construction of bandpass filters (BPF) of ultrahigh frequencies (SHF) on inhomogeneous lines. This method allows you to choose the structure and parameters of the BPF in such a way as to achieve the maximum length of the stopband that meets the requirements of electromagnetic compatibility (EMC), with given restrictions on the attenuation characteristics in the passbands and stopbands, and also take into account design and technological restrictions on the difference in wave impedances and manufacturing permit. The article also presents the results of experimental studies of the characteristics of microwave bandpass filters with wide stopbands on a symmetrical stripline. These studies were carried out with the aim of ensuring electromagnetic compatibility.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, radio electronic means, bandpass filter, stopband, passband, three-stage resonators, wave impedance drop, frequency spacing of parasitic passbands, filter parameters tolerance, field experiment.

Citation: Berdyshev V. P., Kopylov N. V. Experimental investigation of the characteristics of strip-band pass filters of the microwave with wide stop bands on a symmetric stripe line in the interests of ensuring electromagnetic compatibility. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(7), 797–804. EDN: HXUATR



# Экспериментальное исследование характеристик шлейфовых полосно-пропускающих фильтров СВЧ с широкими полосами заграждения на симметричной полосковой линии в интересах обеспечения электромагнитной совместимости

**В. П. Бердышев, Н. В. Копылов**

*Военная академия воздушно-космической обороны  
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова  
Российская Федерация, Тверь  
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны  
Российская Федерация, Ярославль*

---

**Аннотация.** Описанный в статье метод относится к построению полосно-пропускающих фильтров (ППФ) сверхвысоких частот (СВЧ) на неоднородных линиях. Этот метод позволяет выбирать структуру и параметры ППФ таким образом, чтобы достичь максимальной протяженности полосы заграждения, удовлетворяющей требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС), при заданных ограничениях на характеристики затухания в полосах пропускания и заграждения, а также учитывать конструктивно-технологические ограничения по перепаду волновых сопротивлений и допускам на изготовление. В статье также представлены результаты экспериментальных исследований характеристик полосно-пропускающих фильтров сверхвысоких частот с широкими полосами заграждения на симметричной полосковой линии. Эти исследования проводились с целью обеспечения электромагнитной совместимости.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, полосно-пропускающий фильтр, полоса заграждения, полоса пропускания, трехступенчатые резонаторы, перепад волновых сопротивлений, разнос частот паразитных полос пропускания, допуска на параметры фильтров, натурный эксперимент.

---

Цитирование: Бердышев В. П. Экспериментальное исследование характеристик шлейфовых полосно-пропускающих фильтров СВЧ с широкими полосами заграждения на симметричной полосковой линии в интересах обеспечения электромагнитной совместимости / В. П. Бердышев, Н. В. Копылов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(7). С. 797–804. EDN: NXUATR

---

Широкое применение радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения в Вооруженных Силах (ВС) и народно-хозяйственных объектах Российской Федерации (РФ) создаёт всё возрастающие трудности в обеспечении их совместной работы без взаимного влияния друг на друга. При этом сохраняется устойчивая тенденция к увеличению числа, многообразия, сложности РЭС, размещенных в территориальных районах в плотных локальных группировках, повышение мощности радиопередающих (РПДУ) и чувствительности радиоприемных устройств (РПМУ) – энергетических потенциалов радиотехнических средств (РТС), что в условиях ограниченности освоенного частотного диапазона порождает непрерывно усложняющуюся электромагнитную обстановку (ЭМО) в воздухе и на земле и создает трудности обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

По этой причине проведение мероприятий, направленных на обеспечение ЭМС, а также помехозащищённости РЭС, становится обязательным условием сохранения требуемой боеготовности и высокой эффективности использования наземных и бортовых систем управления вооружением.

Мероприятия по обеспечению ЭМС подразделяются на организационные и технические. Комплекс организационных мероприятий («запреты» по частоте, времени и направлению и т.д.) не позволяет решать задачи ЭМС, особенно в военное время при работе большого количества РЭС на ограниченной территории.

Фильтрующие устройства являются основным техническим мероприятием по обеспечению ЭМС. Фильтрующие устройства применяются для подавления побочных излучений (ПИ) и для борьбы от непреднамеренных помех, воздействующих по паразитным каналам приемника (ПКП), наиболее эффективна частотная фильтрация, которая осуществляется в трактах высокой частоты до нелинейных преобразований сигнала с помощью полосно-пропускающих фильтров (ППФ) СВЧ.

Характеристика частотной избирательности ППФ должна обладать минимальными потерями в полосе пропускания (ПП) и заданным уровнем затухания в полосе заграждения (ПЗ). Ширина полосы заграждения оценивается разностью между её граничными частотами. В соответствии с существующими ГОСТами и стандартами по ЭМС в зависимости от типов РЭС протяжённость полосы заграждения должна составлять от 1:5 до 1:10 (разрядка ППП). Уровни затухания в ПЗ (уровни заграждения) определяются исходя, с одной стороны, из норм на ПИ и ПКП, с другой стороны, из характеристик радиопередающих (РПДУ) и радиоприёмных устройств (РПМУ) и находятся в пределах 60...80 дБ, а в некоторых случаях и более [1].

В связи с этим была поставлена научная задача, которая заключалась в разработке метода построения шлейфовых полосно-пропускающих фильтров СВЧ на ступенчатых неоднородных линиях, позволяющего осуществить выбор структуры и параметров ППФ, обеспечивающих максимальную протяжённость полосы заграждения для выполнения требований ЭМС при заданных ограничениях на характеристики затухания в полосах пропускания и заграждения и установленных конструктивно-технологических ограничений по перепаду волновых сопротивлений и допускам на изготовление.

В процессе её решения были разработаны методики и программы для ЭВМ:

### **Методика компенсации паразитных полос пропускания ППФ СВЧ с широкими полосами заграждения**

Суть предлагаемой методики подавления паразитных полос пропускания заключается в компенсации полюсов входного сопротивления однородных отрезков линий передач, соответствующих кратным резонансным частотам, нулями входного сопротивления неоднородной линии и, наоборот, компенсация полюсов неоднородной линии нулями однородной. Следует заметить, что основная резонансная частота этих линий  $\omega_0$  совпадает [2, 3].

Идея методики пояснена на рис. 1, где изображено распределение резонансных (крестики) и противорезонансных (кружочки) частот однородной (рис. 1а) и неоднородных (рис. 1б, в, г) короткозамкнутых линий. На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $\omega_0$  – основная резонансная частота;  $\omega_{pi}$ ,  $\omega_{Pi}$  и  $\omega_{pi}^\infty$ ,  $\omega_{Pi}^0$  – резонансные и противорезонансные частоты однородной и неоднородной линий соответственно.

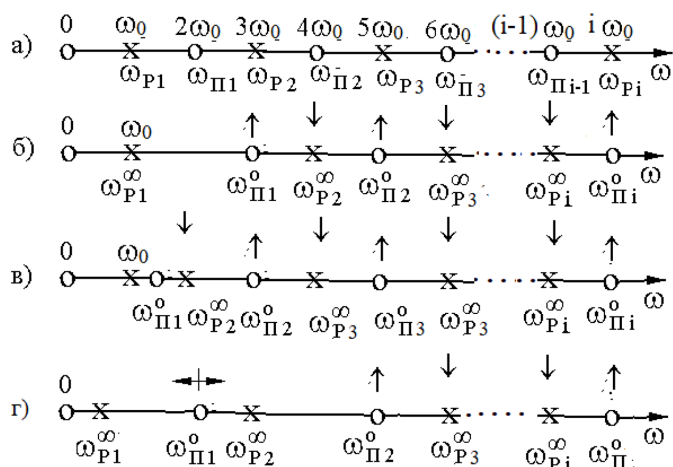


Рис. 1. Распределение спектра резонансных и противорезонансных частот однородной и неоднородных короткозамкнутых линий

Fig. 1. Distribution of the spectrum of resonant and anti-resonant frequencies of homogeneous and inhomogeneous short-circuited lines

Рассматривая рис. 1, можно сделать вывод о том, что взаимная компенсация нулей и полюсов входного сопротивления однородной и неоднородной линий при совпадении основной резонансной частоты  $\omega_0$  позволит подавить паразитные резонансы ОЛ (крестики), возникающие на нечетнократных частотах, например,  $3\omega_0$ ,  $5\omega_0$ ,  $7\omega_0$  и т.д., нулями входного сопротивления неоднородной линии (РЛ) (кружочки на рис. 1б). Очевидно, что полюса НЛ (крестики на рис. 1б) могут также приводить к появлению паразитных резонансов, поэтому для их исключения необходимо полюса НЛ компенсировать нулями ОЛ, т.е. обеспечивать взаимную компенсацию нулями полюсов за исключением полюса на частоте основного резонанса  $\omega_0$ .

### Методика построения шлейфовых полосно-пропускающих фильтров СВЧ на ступенчатых неоднородных линиях [3, 4, 5]

Основу методики составляет подход Кона, который широко применяется при построении фильтрующих и согласующих устройств СВЧ на однородных линиях по параметрам низкочастотного прототипа и методики компенсации паразитных полос пропускания, позволяющий за счет применения в качестве резонаторов короткозамкнутых ступенчатых неоднородных линий синтезировать структуры с неэквидистантным спектром.

Методика *позволяет*: синтезировать многоступенчатые короткозамкнутые для обеспечения требуемой разрядки паразитных полос пропускания за счет компенсации паразитных полос пропускания и определять параметры многоступенчатых линий (электрическую длину и значения волновых сопротивлений ступенек); выбирать структуру и параметры многорезонаторных шлейфовых ППФ СВЧ с четвертьволновыми связями и резонаторами, обеспечивающие требуемую разрядку паразитных полос пропускания для обеспечения ЭМС, и исследовать их потенциальные характеристики; получать при случайных отклонениях параметров шлейфовых ППФ СВЧ на ступенчатых неоднородных линиях от своих номинальных значений

зависимости среднеквадратических отклонений затухания в полосе пропускания и полосе заграждения, назначать допуски на изготовление с учетом процента выхода годных устройств на основе метода статистических испытаний Монте–Карло.

### Усовершенствованная методика назначения допусков на параметры фильтров с широкими полосами заграждения методом Монте–Карло [6, 7]

Суть методики состоит в многократном моделировании на ЭВМ передаточной функции фильтра (характеристики затухания) при различных комбинациях случайных отклонений параметров от своих номинальных значений. В отличие от известных методика позволяет:

- получать при случайных отклонениях параметров ППФ СВЧ от своих номинальных значений зависимости среднеквадратических отклонений затухания в полосе пропускания (ПП) и полосе заграждения (ПЗ);
- назначать допуски на изготовление с учетом процента выхода годных устройств на основе метода статистических испытаний Монте–Карло.

Для проведения натурального эксперимента использовался шлейфовый ППФ, представляющий собой трехрезонаторную структуру с трехступенчатыми короткозамкнутыми резонаторами и параметрами:

- центральная частота полосы пропускания  $f_0 = 1$  ГГц;
- относительная ширина полосы пропускания  $w = 0,3$  (абсолютная 300 МГц);
- уровень пульсаций чебышевской характеристики затухания  $L_r = 0,1$  дБ;
- волновые сопротивления подводящих линий  $W = 50$  Ом.

Опытный образец ППФ (рис. 2а) был изготовлен по промышленной технологии фотохимическим методом на основе фольгированного материала Флан-2,8 (толщина пластины 2 мм) с параметрами:

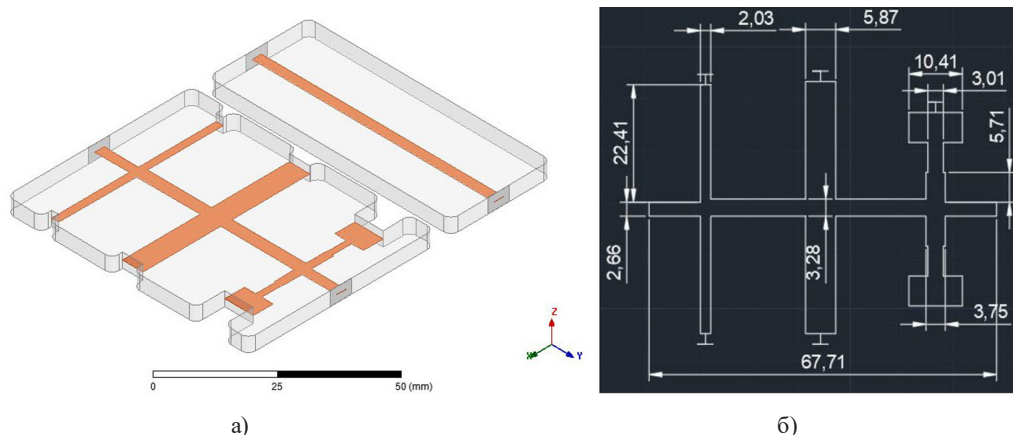


Рис. 2. Модель шлейфового ППФ, выполненного в программе на ЭВМ Ansys HFSS (а), и чертеж в системе AutoCAD с указанием размеров (б)

Fig. 2. Model of the stub BPF made in the Ansys HFSS computer program (a) and a drawing in the AutoCAD system with dimensions (б)

относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 2,8$ ;

толщина симметричной полосковой линии  $b = 4$  мм.

Натурный эксперимент проводился по стандартной методике на приборе фирмы Agilent PNA-L N 5230C – анализатор цепей (рис. 2б).

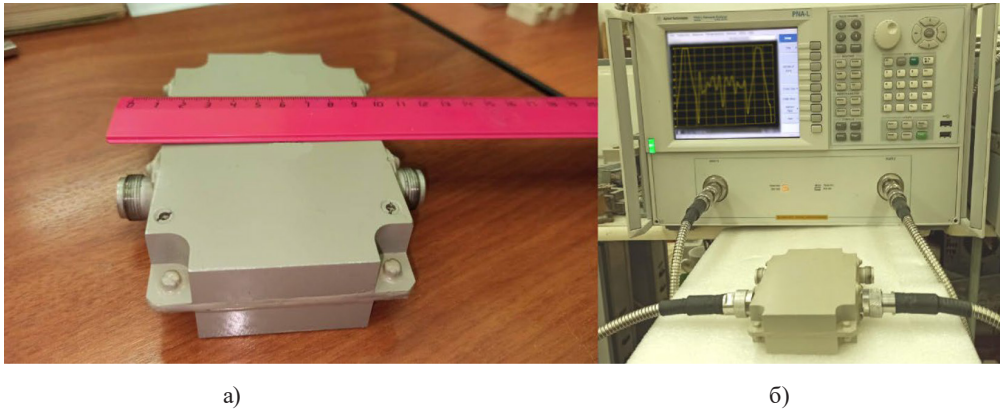


Рис. 4. Внешний вид шлейфового ППФ с широкими полосами заграждения (а), вид экспериментальной установки (б)

Fig. 4. External view of the loop BPF with wide barrier strips (a), view of the experimental setup (b)

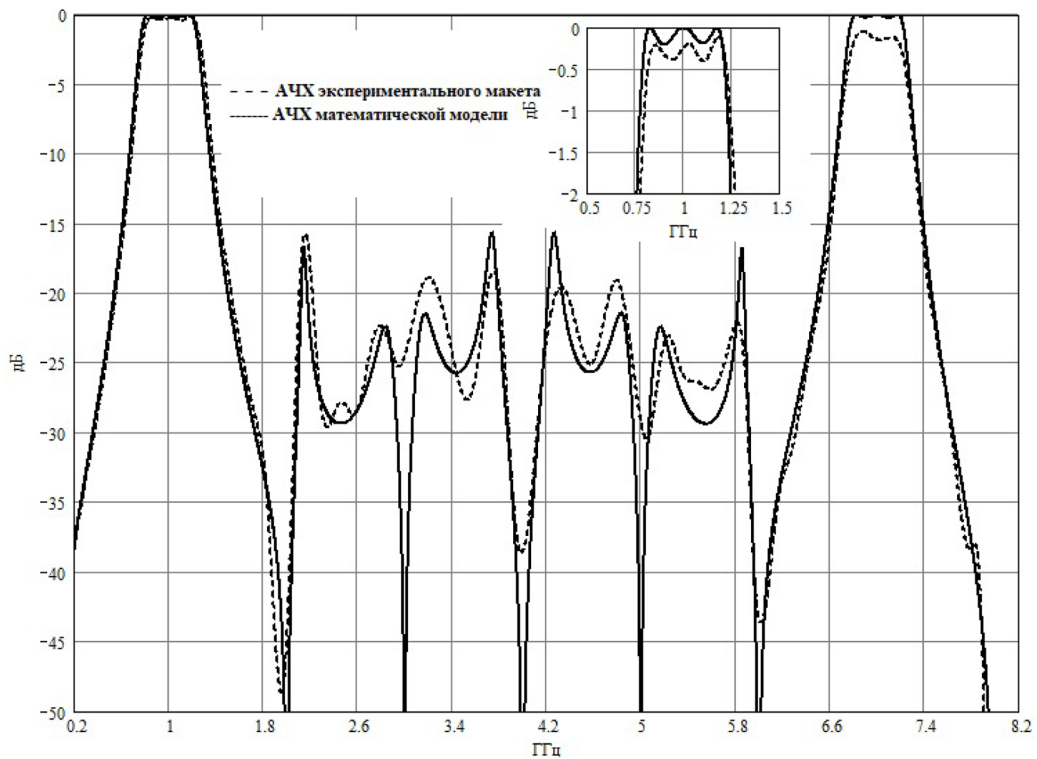


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика шлейфового ППФ с ШПЭ

Fig. 5. The amplitude-frequency characteristic of the stub BPF with SPE

Сравнение измеренных и рассчитанных характеристик фильтра (рис. 5) показало:

- в полосе заграждения (ПЗ) на кратных частотах по сравнению с существующими ППФ на однородных линиях обеспечивается повышенное затухание – на частоте 3 ГГц (первая паразитная полоса пропускания) – более 25 дБ;

- на частоте 5 ГГц (вторая паразитная полоса пропускания) – 30 дБ. Сравнение с измерениями показывает, что на указанных частотах затухание составляет от 25 до 50 дБ;

- первая паразитная полоса пропускания составляет 6,89 ГГц (при основной частоте полосы пропускания 1,04 МГц), что обеспечивает разнос резонансных частот  $R=1:6,64$ , что с точностью 5,4 % соответствует результату математического моделирования и расчетам по формуле (1) – 1:7 (при основной частоте полосы пропускания 1 ГГц).

Результаты измерения показали, что центральная частота полосы пропускания – 1,04 ГГц, больше задаваемой при расчете на 40 МГц (4 %), а полоса пропускания – 323 МГц, что больше на 23 МГц (7,1 %). Наблюдается её смещение в область высоких частот. Отличие расчётных и экспериментальных характеристик обусловлено отсутствием учёта потерь и высших типов волн при моделировании ППФ, а также наличием погрешностей при изготовлении конструкции ППФ.

Таким образом, экспериментальное исследование опытного образца ППФ с ШПЗ позволило подтвердить правильность подхода к разработке ППФ на неоднородных линиях, обеспечивающего заданную полосу заграждения путем компенсации паразитных полос пропускания однородной линии, противорезонаторными частотами входного сопротивления неоднородной линии.

### Список литературы / References

[1] Бердышев Р.В., Журавлев А.В., Егоров М.А., Лой В.В., Копылов Н.В., Копылова А.Д. Анализ фильтрующих устройств СВЧ, используемых в существующих радиотехнических средствах радиотехнических войск. Депонирована в ЦВНИ МО РФ 18.03.2021, инв. № Б-9253. Справка № 19993. Сб. реф. деп. рук. Серия Б, Вып. № 134. – М.: ЦВНИ МО РФ, 2021–38. [Berdyshev R. V., Zhuravlev A. V., Egorov M. A., Loi V. V., Kopylov N. V., Kopylova A. D. Analysis of microwave filtering devices used in existing radio equipment of radio engineering troops. Deposited at the Central All-Russian Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation on March 18, 2021, inv. No. B-9253. Reference No. 19993. Sat. ref. dep. hands Series B, Vol. No. 134. – M.: TsVNI MO RF, 2021–38 Chipboard (in Rus.).]

[2] Бердышев В.П., Синицын А.В. *Развитие методов синтеза и построения фильтрующих устройств СВЧ на неоднородных линиях. Часть 1, Часть 2.* Монография. Тверь, ВУ ПВО, 2001, 2002. 184–218. [Berdyshev V.P., Sinitsyn A.V. *Development of methods for the synthesis and construction of microwave filtering devices on inhomogeneous lines. Part 1, Part 2.* Monograph. Tver, VU PVO, 2001, 2002. 184–218 (in Rus.).]

[3] Бердышев В.П., Егоров М.А., Копылов Н.В., Копылова А.Д. Методика синтеза и оценки частотных характеристик шлейфовых полосно-пропускающих фильтров с широкими полосами заграждения, на основе подхода Кона и метода компенсации паразитных полос пропускания. *Сборник материалов ВНК «Проблемы развития ВКО РФ в период до 2030 года и пути их решения» 26 февраля 2021 г. Секция 5. Проблемы современных форм и способов примене-*

ния РТВ на современном этапе. Тверь, ВА ВКО, 2021. 37–46. [Berdyshev V.P., Egorov M.A., Kopylov N.V., Kopylova A.D. A method for synthesizing and evaluating the frequency characteristics of stub bandpass filters with wide stopbands, based on the Kohn approach and the method of spurious passband compensation. *Collection of materials of the VNK "Problems of development of the aerospace defense of the Russian Federation in the period up to 2030 and ways to solve them" February 26, 2021 Section 5. Problems of modern forms and methods of using RTV at the present stage.* Tver, VA VKO, 2021. 37–46 (in Rus.)].

[4] Бердышев В. П., Журавлев А. В., Егоров М. А., Копылов Н. В., Копылова А. Д. Программа моделирования частотных характеристик шлейфовых полосно-пропускающих фильтров СВЧ с четвертьволновыми связями с широкими полосами заграждения на пятиступенчатых неоднородных линиях. *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020665122. Заявка № 2020664348. дата поступ. 16.11.20, дата регистр. 23.11.2020.* М.: ФГУ ФИПС 2020. [Berdyshev V.P., Zhuravlev A. V., Egorov M. A., Kopylov N. V., Kopylova A. D. A program for modeling the frequency characteristics of stub-band microwave filters with quarter-wave couplings with wide stopbands on five-stage inhomogeneous lines. *Certificate of state registration of computer programs No. 2020665122. Application No. 2020664348. date of admission 11/16/20, date of registration. 11/23/2020.* Moscow. FGU FIPS 2020. (in Rus.)].

[5] Бердышев В. П., Журавлев А. В., Егоров М. А., Копылов Н. В., Копылова А. Д. Программа моделирования частотных характеристик и табулирования параметров многорезонаторных полосно-пропускающих фильтров СВЧ с широкими полосами заграждения на трехступенчатых неоднородных линиях. *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021610773. Заявка № 2020667963, дата поступ. 30.12.2020, дата регистр. 19.01.2021.* М.: ФГУ ФИПС, 2021. [Berdyshev V.P., Zhuravlev A. V., Egorov M. A., Kopylov N. V., Kopylova A. D. Program for simulation of frequency characteristics and tabulation of parameters of multicavity microwave bandpass filters with wide stopbands on three-stage inhomogeneous lines. *Certificate of state registration of computer programs No. 2021610773. Application No. 2020667963, date received. 12/30/2020, date of registration. 01/19/2021.* Moscow. FGU FIPS, 2021. (in Rus.)]

[6] Копылов Н. В., Чеботарь И. В., Ромахин В. А. Методика расчета допусков на параметры шлейфовых полосно-пропускающих фильтров с пятиступенчатым резонатором. *Научная мысль.* Череповец: ВУРЭ, 2022. 21. 3–2(45). 32–39. [Kopylov N. V. Chebotar I. V. Romakhin V. A. Method for calculating tolerances for the parameters of stub bandpass filters with a five-stage resonator. *Scientific Thought.* Cherepovets: VURE, 2022. 21. 3–2(45). 32–39. (in Rus.)].

[7] Копылов Н. В., Егоров М. А., Копылова А. Д. Программа расчета допусков на параметры шлейфовых ППФ с четвертьволновыми связями и резонаторами с широкими полосами заграждения с пятиступенчатым резонатором методом Монте-Карло. *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022612447. Заявка № 2021681042, дата поступ. 16.12.2021, дата регистр. 28.02.2022.* М.: ФГУ ФИПС, 2022. [Kopylov N. V., Egorov M. A., Kopylova A. D. The program for calculating tolerances on the parameters of stub BPFs with quarter-wave couplings and resonators with wide stopbands with a five-stage resonator by the Monte Carlo method. *Certificate of state registration of computer programs No. 2022612447. Application No. 2021681042, date received. 12/16/2021, date of registration. 02/28/2022.* Moscow. FGU FIPS, 2022. (in Rus.)].