

11.1

Высокоселективный каналный полосно-пропускающий фильтр входного мультиплексора спутниковой связи Ku-диапазона

© Б.А. Беляев^{1,2}, А.М. Сержантов^{1,2}, И.Е. Бурлаков^{2,3}, Ан.А. Лексиков³, Я.Ф. Бальва³,
А.А. Александровский³, С.Д. Крёков^{2,3}, С.А. Ходенков¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 22 марта 2024 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2024 г.

Принято к публикации 10 апреля 2024 г.

Разработана конструкция волноводного полосно-пропускающего фильтра двенадцатого порядка с дополнительными двумя индуктивными и двумя емкостными связями, образованными соответствующими небольшими диафрагмами в металлических стенках, между несмежными резонаторами. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_0 = 12.73$ GHz, а ее относительная ширина по уровню 1 dB от уровня минимальных потерь составляет всего $\Delta f/f_0 = 0.3\%$ при собственной добротности резонаторов $Q_0 = 6 \cdot 10^3$. Для получения таких характеристик в традиционном чебышевском фильтре необходима собственная добротность резонатора в 5 раз больше. Высокая избирательность устройства, а также малая неравномерность коэффициента передачи и группового времени запаздывания в полосе пропускания достигаются за счет увеличения потерь на отражение при синтезе фильтра. Конструкция фильтра предназначена для создания на ее основе мультиплексоров спутниковой связи.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, волновод, резонатор, дополнительная связь.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58432.19927

Как известно, для разделения близкорасположенных каналов в спутниковых системах связи требуются СВЧ-фильтры с узкой полосой пропускания и высокой крутизной склонов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [1]. При этом устройства должны быть миниатюрными, иметь малую неравномерность АЧХ и группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания, а также стабильность характеристик при изменении температуры. Для повышения крутизны склонов АЧХ, как правило, используют подход, основанный на формировании вблизи полосы пропускания нулей коэффициента передачи, называемых также полюсами затухания [2,3]. Этот подход используется в устройствах на полосковых [3], коаксиальных [4,5] и волноводных [6,7] резонаторах и, конечно, в фильтрах на квазисосредоточенных индуктивных (L) и емкостных (C) элементах [8]. Максимальная крутизна склонов АЧХ наблюдается при симметричном расположении полюсов затухания справа и слева от полосы пропускания, что достигается дополнительной емкостной связью либо между входом и выходом в фильтре четвертого порядка [2], либо между вторым и пятым резонаторами в фильтре шестого порядка [2,3]. Однако при сравнительно невысокой собственной добротности резонаторов в узкополосных фильтрах близкое расположение полюсов затухания приводит к росту неравномерности коэффициента передачи и группового времени запаздывания в полосе пропускания, что проявляется особенно сильно при относительной ширине полосы пропускания менее 1%.

Нами разработана и изготовлена новая конструкция волноводного полосно-пропускающего фильтра двенадцатого порядка с относительной шириной полосы пропускания 0.3%, имеющего четыре дополнительные связи между несмежными резонаторами, причем две из этих связей носят индуктивный характер, а две другие — емкостной. Высокий порядок фильтра вместе с увеличенными потерями на отражение в полосе пропускания позволяет получить наряду с хорошей частотной избирательностью малую неравномерность АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания, и это при сравнительно небольшой собственной добротности резонаторов.

На рис. 1,а представлена эквивалентная схема на сосредоточенных элементах исследуемого полосно-пропускающего фильтра двенадцатого порядка, резонаторы которого расположены последовательно друг за другом и взаимодействуют посредством индуктивной связи. Отличительной особенностью конструкции является наличие четырех дополнительных связей, две из которых емкостные между парами несоседних резонаторов 4, 9 и 3, 10 ($k_{C4,9}$ и $k_{C3,10}$), а две другие индуктивные между парами несоседних резонаторов 5, 8 и 2, 11 ($k_{L5,8}$ и $k_{L2,11}$). Как показано далее, такое расположение дополнительных связей обеспечивает возможность достижения не только малой неравномерности АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания, но и одновременно высокой избирательности за счет формирования четырех нулей коэффициента передачи на АЧХ фильтра.

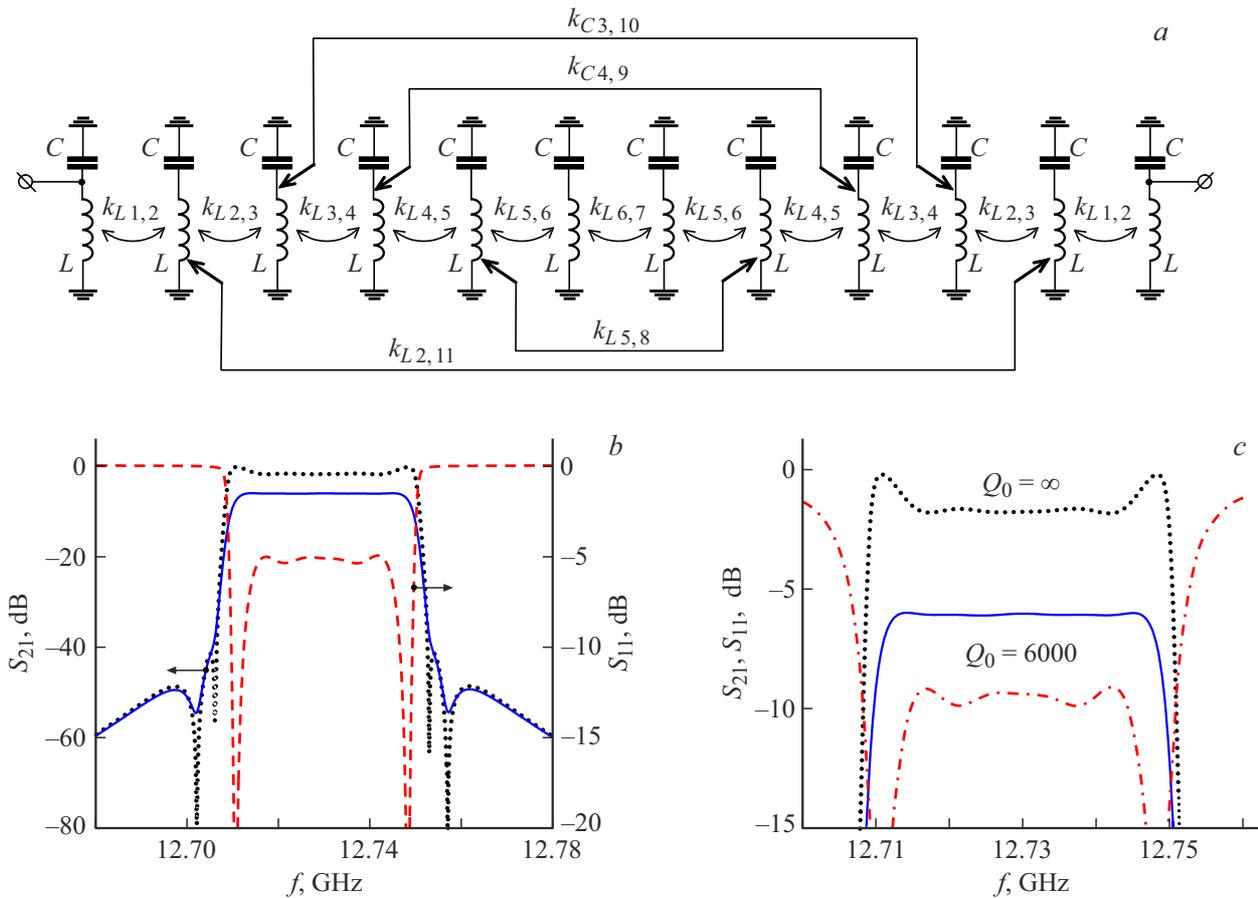


Рис. 1. *a* — эквивалентная схема исследуемого фильтра на сосредоточенных элементах; *b, c* — частотные зависимости прямых потерь S_{21} (пунктир — $Q_0 = \infty$, сплошная линия — $Q_0 = 6 \cdot 10^3$) и потерь на отражение S_{11} (штриховая линия — $Q_0 = \infty$, штрихпунктирная — $Q_0 = 6 \cdot 10^3$) фильтра двенадцатого порядка.

По заданной амплитудно-частотной характеристике на основе разработанной эквивалентной схемы (рис. 1, *a*) был синтезирован полосно-пропускающий фильтр. Для определенности при синтезе фильтра использовались технические требования к каналному фильтру мультиплексора приемного тракта Ку-диапазона спутниковой связи. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_0 = 12.73$ GHz при ее ширине $\Delta f = 36$ MHz, измеренной по уровню 1 dB от уровня минимальных потерь, которые техническим заданием допускаются до 10 dB. Неравномерность группового времени запаздывания не более 40 ns. Волновые сопротивления портов на входе и выходе фильтра 50 Ω . При отстройке на ± 38 MHz от центральной частоты полосы пропускания f_0 уровень затухания должен быть не менее 40 dB относительно минимальных потерь фильтра. Собственная добротность колебательных контуров $Q_0 = 6 \cdot 10^3$ в эквивалентной схеме выбрана такой, как у реальных полых резонаторов, из которых строится фильтр.

В качестве входных параметров алгоритма, используемого при синтезе фильтра, выступали порядок фильтра, центральная частота полосы пропускания f_0 , абсолютная ширина полосы пропускания Δf по заданному уров-

ню, частоты нулей коэффициента передачи и собственная добротность резонаторов Q_0 . Сам алгоритм состоит из нескольких этапов, в результате выполнения которых находится матрица связи резонаторов и отклонения их резонансных частот от центральной частоты полосы пропускания [1], элементы которой представлены в таблице [1,9]. В ней на главной диагонали приведены отклонения частот резонаторов от центральной частоты полосы пропускания (выделены курсивом), а на другой диагонали представлены дополнительные связи между несоседними резонаторами (выделены полужирным шрифтом).

На начальном этапе фильтр синтезируется при бесконечной добротности резонаторов, при этом потери на отражение в полосе пропускания от входа и выхода устройства устанавливаются на уровне -5 dB. Этот уровень определяется в результате предварительных исследований и является оптимальным для параметров рассматриваемого фильтра. В результате при $Q_0 = \infty$ вносимые потери фильтра на центральной частоте полосы пропускания составляют ~ 1.8 dB, а на краях полосы они составляют ~ 0.2 dB (рис. 1, *b, c*). Однако после подстановки реальной собственной добротности резонаторов

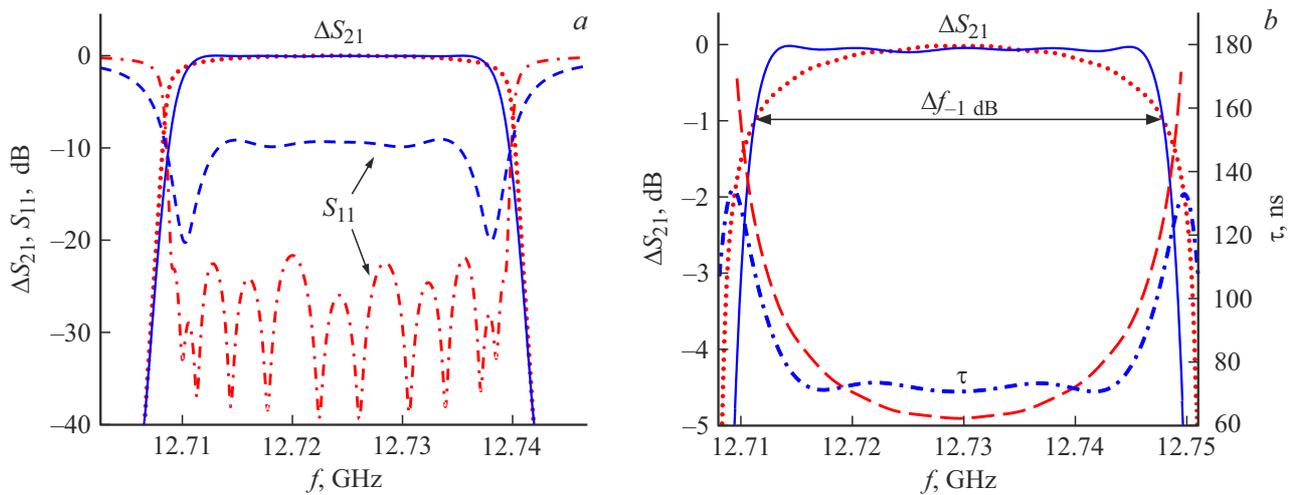


Рис. 2. *a* — частотные зависимости коэффициента передачи за вычетом вносимых потерь $\Delta S_{21}(f)$, а также потерь на отражение $S_{11}(f)$ 12-резонаторного фильтра с чебышевской формой АЧХ при $Q_0 = 3 \cdot 10^4$ (пунктирная и штрихпунктирная линии) и исследуемого фильтра при $Q_0 = 6 \cdot 10^3$ (сплошная и штриховая линии); *b* — АЧХ и частотные зависимости группового времени запаздывания $\tau(f)$ фильтров.

$Q_0 = 6 \cdot 10^3$ минимальные потери в полосе пропускания фильтра становятся ~ 6 dB, а потери на отражение уменьшаются до уровня почти -10 dB (рис. 1, *c*). При этом значительно уменьшаются неравномерности АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания устройства, а его характеристики полностью удовлетворяют техническим требованиям. Важно отметить, что на входе и выходе канальных фильтров, входящих в состав входного мультиплексора, всегда устанавливаются вентили, которые на практике обеспечивают величину отражений на уровне не хуже -25 dB.

Для сравнения с использованием эквивалентной схемы (рис. 1, *a*), в которой исключены дополнительные связи, был синтезирован фильтр с классической чебышевской формой АЧХ. Расчет показал, что для достижения требуемых значений неравномерности коэффициента передачи в полосе пропускания и заданных уровней подавления в полосах заграждения для фильтра с чебышевской формой АЧХ собственная добротность резонаторов должна быть $Q_0 = 3 \cdot 10^4$. На рис. 2, *a* представлены АЧХ двух фильтров, синтезированных на основе эквивалентной схемы с двумя дополнительными связями при $Q_0 = 6 \cdot 10^3$ (сплошная и штриховая линии) и без дополнительных связей с чебышевской формой АЧХ при $Q_0 = 3 \cdot 10^4$ (пунктир и штрихпунктирная линия). Для наглядности сравнения АЧХ из зависимостей $S_{21}(f)$ вычитались вносимые потери на центральной частоте полосы пропускания фильтров, поэтому на графиках показаны зависимости $\Delta S_{21}(f) = S_{21}(f) - S_{21}(f_0)$. Из представленных на рис. 2, *b* зависимостей видно, что предлагаемая в настоящей работе структура построения многорезонаторного фильтра позволяет достичь не только требуемой избирательности, но и требуемой неравномерности группового времени запаздывания, что

недостижимо при использовании классических решений. Неравномерность ГВЗ в полосе пропускания предложенного фильтра $\Delta\tau = 40$ ns оказывается в 2 раза меньше, чем у фильтра с чебышевской формой АЧХ ($\Delta\tau = 80$ ns).

Отметим, что включение одной цепи дополнительной связи в фильтр, формирующей по одному полюсу затухания на склонах АЧХ (так, например, как это сделано в [10]), незначительно снижает требование к величине собственной добротности резонаторов: $Q_0 > 2.4 \cdot 10^4$. Но, как известно, предельная собственная добротность прямоугольного полого резонатора, выполненного из меди и использующего в качестве рабочей моды колебаний H_{011} , в рассматриваемом диапазоне частот при нормальных условиях составляет $Q_0 \approx 7 \cdot 10^3$, а это значит, что при традиционных подходах к конструированию полосно-пропускающих фильтров невозможно выполнить требования, предъявляемые к характеристикам рассматриваемого устройства. Однако предлагаемое в настоящей работе решение позволяет достичь всех требуемых характеристик высокоизбирательного фильтра при собственной добротности резонаторов $Q_0 = 6 \cdot 10^3$.

С использованием матрицы связи (см. таблицу), полученной при синтезе фильтра по эквивалентной схеме (рис. 1, *a*), с помощью пакета программ электродинамического анализа 3D-моделей CST Studio Suite была синтезирована конструкция фильтра на резонаторах из волновода сечением 8×16 mm. В конструкции линейка из двенадцати последовательно соединенных друг за другом через индуктивные диафрагмы резонаторов свернута в два ряда по шесть резонаторов в ряду. Это позволяет легко организовать дополнительные емкостные и индуктивные связи между несмежными резонаторами с

Матрица связи фильтра двенадцатого порядка

		Номер резонатора												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Номер резона- тора	Вход	1.251899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1.251899	0	1.05461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1.05461	0	0.668934	0	0	0	0	0	0	0	0.011188	0
	3	0	0	0.668934	0	0.594437	0	0	0	0	0	-0.01492	0	0
	4	0	0	0	0.594437	0	0.507167	0	0	0	-0.05221	0	0	0
	5	0	0	0	0	0.507167	0	0.422829	0	0.044755	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0.422829	0	0.671303	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0.671303	0	0.423016	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0.044755	0	0.423016	0	0.507249	0	0	0
	9	0	0	0	0	-0.05221	0	0	0	0.507249	0	0.594529	0	0
	10	0	0	0	-0.01492	0	0	0	0	0	0.594529	0	0.669319	0
	11	0	0	0.011188	0	0	0	0	0	0	0	0.669319	0	1.054203
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.054203	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.251899	Выход

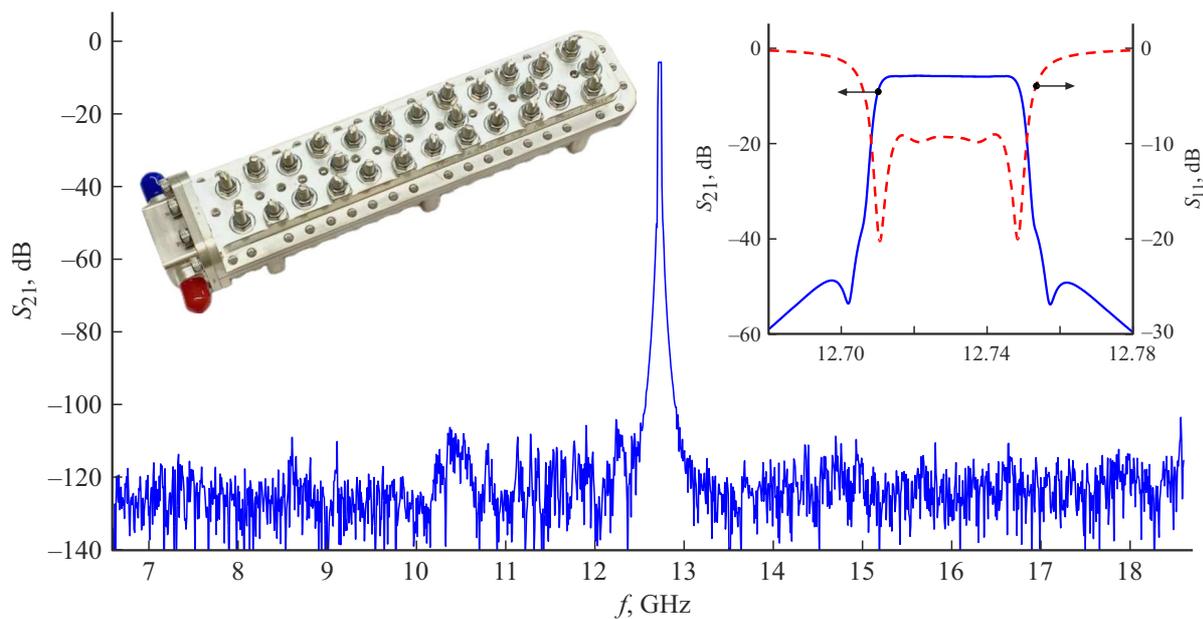


Рис. 3. Измеренные характеристики опытного образца фильтра в широком и узком (правая вставка) диапазонах частот. На левой вставке — фотография устройства.

помощью соответствующих небольших диафрагм в металлических стенках. По полученным конструктивным параметрам высокоизбирательный фильтр был изготовлен из суперинвара (сталь 32НҚД) с гальванически нанесенным слоем серебра толщиной $6 \mu\text{m}$. На входе и выходе фильтра использованы коаксиально-волноводные переходы с разъемами типа SMA.

На рис. 3 показаны измеренные характеристики опытного образца фильтра в широком и узком диапазонах частот, а также приведена фотография фильтра. Фильтр снабжен элементами регулировки частот и связей резонаторов в виде винтов. Достоинствами разработанного фильтра являются малая неравномерность АЧХ в полосе пропускания $\Delta f = 36 \text{ MHz}$, составляющая 1 dB , и высокая селективность устройства, обеспечивающая затухание 50 dB при отстройке на $\pm 38 \text{ MHz}$ от центральной частоты полосы пропускания $f_0 = 12.74 \text{ GHz}$. Важным достоинством является также малая величина изменения группового времени запаздывания в полосе пропускания фильтра $\Delta \tau = 40 \text{ ns}$. Сравнение характеристик, рассчитанных в программе электродинамического анализа, и измеренных характеристик фильтра показало их очень хорошее совпадение, поэтому расчетные характеристики не приводятся, чтобы не загромождать рисунок. Важно отметить, что фильтр показал высокую термостабильность характеристик. В диапазоне температур $\pm 30^\circ\text{C}$ уход центральной частоты наблюдается в интервале всего $\pm 300 \text{ kHz}$.

Таким образом, разработана новая конструкция волноводного полосно-пропускающего фильтра двенадцатого порядка с дополнительными связями между несмежными резонаторами, которая обладает значительным

уровнем подавления помех в полосах заграждения ($\sim 120 \text{ dB}$) и высокой избирательностью благодаря двум парам полюсов затухания на АЧХ, расположенным симметрично относительно центра полосы пропускания. Симметричность расположения полюсов обеспечивается четырьмя дополнительными связями между парами несоседних резонаторов, две из которых являются емкостными, а две другие — индуктивными. Использованный новый подход синтеза фильтра, заключающийся в предельном увеличении потерь на отражение в полосе пропускания устройства, позволил добиться малой неравномерности АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания (по сравнению с традиционными конструкциями построения фильтров).

Благодарности

При проведении работ использовано оборудование Учебного центра коллективного прототипирования пассивной электроники антенно-фидерного тракта ФИЦ КНЦ СО РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание FEFE-2023-0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Yu, W.-C. Tang, A. Malarky, V. Dokas, R. Cameron, Y. Wang, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **51** (12), 2505 (2003). DOI: 10.1109/TMTT.2003.820172
- [2] J.-S. Hong, *Microstrip filters for RF/microwave applications* (John Wiley & Sons, 2011).
- [3] B.A. Belyaev, Y.F. Bal'va, V.V. Tyurnev, A.A. Leksikov, R.G. Galeev, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **56** (9), 2021 (2014). DOI: 10.1002/mop.28507
- [4] R.M. Kurzrok, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **14** (6), 295 (1966). DOI: 10.1109/TMTT.1966.1126254
- [5] Y. Wang, M. Yu, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **57** (12), 2958 (2009). DOI: 10.1109/TMTT.2009.2034221
- [6] J. Kocbach, K. Folger, in *2002 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest* (IEEE, 2002), vol. 3, p. 1449–1452. DOI: 10.1109/MWSYM.2002.1012128
- [7] M. Latif, G. Macchiarella, F. Mukhtar, *IEEE Access*, **8** (7), 107527 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000847
- [8] B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, Ya.F. Bal'va, R.G. Galeev, An.A. Leksikov, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manufactur. Technol.*, **12** (7), 1186 (2022). DOI: 10.1109/TCPMT.2022.3183581
- [9] R.J. Cameron, C.M. Kudsia, R.R. Mansour, *Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications* (Wiley-Interscience, 2007).
- [10] Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, Ан.А. Лексиков, Я.Ф. Бальва, А.А. Александровский, Р.Г. Галлеев, *Письма в ЖТФ*, **49** (10), 33 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55432.19541 [B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, A.A. Leksikov, Ya.F. Balva, A.A. Alexandrovsky, R.G. Galeev, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (5), 72 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.05.56034.19541].