

УДК 621.396, 621.3.049

# Волноводно-планарные полосно-пропускающие фильтры с широкой полосой заграждения

Омельяненко М. Ю., Романенко Т. В.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского“

E-mail: hohner\_@ukr.net

В статье изложены результаты разработки новых гибридно-интегральных полосно-пропускающих фильтров коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Фильтры относятся к классу волноводно-планарных, основу которых составляют продольные металлодиэлектрические структуры, помещаемые в Е-плоскости прямоугольного волновода. В отличие от широко применяемых фильтров на продольных индуктивных диафрагмах (так называемых “фильтров на индуктивных полосках”) предложенные структуры, построенные на резонаторах со ступенчатым изменением импеданса, обладают значительно более широкими полосами заграждения, а при том же числе резонаторов – значительно большей величиной затухания в ней и, примерно, на четверть меньшими размерами. В работе детально рассмотрены специфические свойства предложенных волноводно-планарных резонаторов со ступенчатым изменением импеданса, а на примере двухрезонаторного фильтра обсуждена процедура быстрого расчета элементов топологии многорезонаторных фильтров на таких резонаторах. Результаты экспериментального исследования характеристик предложенных образцов резонатора и двухрезонаторного фильтра хорошо совпадают с результатами симуляции.

*Ключевые слова:* полосно-пропускающие фильтры; миллиметровый диапазон; гибридно-интегральные схемы СВЧ; резонаторы со ступенчатым изменением импеданса

DOI: [10.20535/RADAP.2020.80.5-13](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.5-13)

## Введение

Значительно возросший в последнее время интерес к разработке СВЧ фильтров обусловлен рядом новых требований к их характеристикам и технологии изготовления. В длинноволновой части сантиметрового диапазона длин волн – это существенно возросшие требования по избирательности и селективности в широком диапазоне частот, требования по числу и локализации основных полос пропускания, электрической конфигурации входа/выхода фильтра, требования минимизации занимаемой площади. В коротковолновой части сантиметрового и миллиметровом диапазонах основными вызовами являются требования улучшения селективных свойств как вблизи, так и вдали от полосы пропускания при условии сохранения малых потерь в быстро осваиваемых диапазонах частот до 120 ГГц. Характерно также, что сообщения по теме разработки фильтров миллиметрового диапазона часто появляются в рубрике «Гибридные и монолитные схемы СВЧ диапазона». Это говорит о насущной необходимости реализации этих фильтров в виде интегральных схем, что гарантировало бы точность и повторяемость характеристик без каких-либо операций по настройке образцов.

Одним из наиболее перспективных путей реализации современных требований к фильтрам коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн является продвижение волноводно-планарной технологии, сочетающей интегральную технологию изготовления критических элементов фильтров и высокую добротность волноводов резонаторов. Хотя эта технология была предложена достаточно давно [1] и с успехом используется до частот трехмиллиметрового диапазона длин волн [2] и выше, повсеместному применению таких фильтров препятствует их незначительное затухание в узкой полосе частот заграждения, составляющей величину порядка  $0.4f_0$ . Преодолению указанных недостатков в разное время было посвящено значительное количество работ [3–6]. При этом достигнутое расширение полосы частот заграждения либо составляло незначительную величину, либо сопровождалось существенным усложнением и удорожанием конструкций фильтров. В данной статье сообщается о разработке волноводно-планарных фильтров на волноводно-планарных резонаторах со ступенчатым изменением импеданса, в значительной степени лишенных указанных недостатков.

# 1 Волноводно-планарные резонаторы со ступенчатым изменением импеданса

Резонаторы со ступенчатым изменением импеданса (Step-impedance resonators, SIR) как элементы построения полосовых коаксиальных фильтров, были предложены в [7], [8] с целью уменьшения их размеров; в дальнейшем этот принцип был распространён на микрополосковые резонаторы [9]. Общие свойства основных типов SIR впервые систематически были рассмотрены в работе [10], где в терминах теории цепей были получены выражения для резонансных частот SIR и их зависимости от перепада сопротивлений в секциях резонаторов. Было показано, что увеличение длины низкоомной секции полуволнового резонатора по сравнению с высокоомной приводит к укорочению длины резонатора с заданной резонансной частотой и расширению полосы частот между основной и первой высшей модами его колебаний. Предложенная в данной работе топология «полуволнового» волноводно-планарного SIR изображена на рис. 1, а его упрощённая эквивалентная схема, в которой не учитывается реактивность области скачка волновых сопротивлений, – на рис. 2.

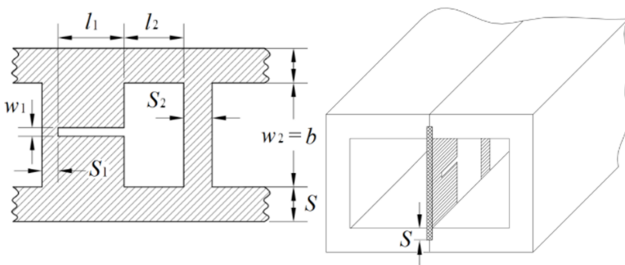


Рис. 1. Топология предложенного волноводно-планарного SIR

В дальнейшем с целью анализа топологии, как изолированного резонатора, предполагаем, что сопротивления  $Z_{H1,2}$  близки к чисто реактивным, создающим коэффициент отражения  $\Gamma_{1,2} \approx e^{j\varphi_{1,2}}$ .

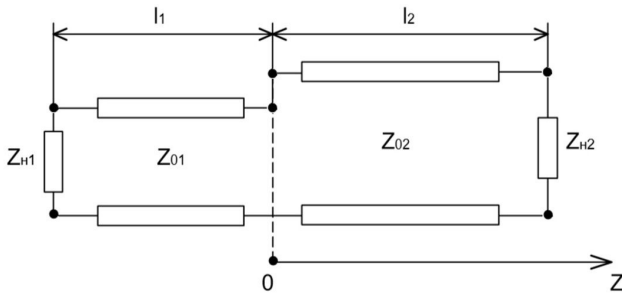


Рис. 2. Упрощённая эквивалентная схема SIR

При этом  $Z_{H1,2} = jZ_{01,02} \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi_{1,2}}{2} \right)$ , а уравнение для нахождения собственных частот резонатора

принимает вид:

$$Z_{01} \operatorname{ctg} \left( \Theta_1 - \frac{\varphi_1}{2} \right) + Z_{02} \operatorname{ctg} \left( \Theta_2 - \frac{\varphi_2}{2} \right) = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) позволяет найти отношение резонансных частот первого высшего и основного типов колебаний  $m = f_2/f_1$ . Если дисперсия фазовой скорости в секциях резонатора мала, а величины  $R_z = Z_{02}/Z_{01}$  и  $\varphi_{1,2}$  также слабо зависят от частоты, величина отношения частот  $m$  может быть найдена из уравнения:

$$m = \frac{\frac{\varphi_2}{2} - \arctan \left[ R_z \tan \left( m\Theta_1 - \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] + \pi n}{\Theta_2} = 0, \quad (2)$$

где целое "n" выбирается из условия, чтобы найденное значение "m" было минимальным, большим единицы. Результаты расчетов нормированной суммарной электрической длины резонатора  $(\Theta_1 + \Theta_2)/\pi$  и отношения частот "m" от нормированной длины низкоомной секции для трех значений отношения сопротивлений секций  $R_z$  даны на рисунках 3а, 3б, 3с. Расчеты выполнены для значений фаз  $\varphi_1 = 2.97$  рад,  $\varphi_2 = 2.61$  рад – типичных для сильноотражающих ( $|\Gamma| > 0.98$ ) полосок SIR (рис.1).

Видно, что при умеренном, вполне достижимом в волноводно-планарном SIR перепаде сопротивлений секций, возможно примерно 40%-е расширение полосы между двумя низшими резонансными частотами.

Описанные общие закономерности проявляются для предложенных волноводно-планарных SIR (рис. 1). Их частотные характеристики, рассчитанные в пакете программ электродинамического моделирования, изображены на рис. 4а, 5а, 6а. Все расчеты выполнены для структур на основе металлизированных подложек толщиной  $d=140$  мкм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon=2.2$ , помещаемых в волноводную камеру сечением  $a \times b = 11 \times 5.5$ . Слабая связь резонаторов обеспечивалась надлежащим выбором ширины полосок  $S_1=2$  мм и  $S_2=3$  мм (рис. 1), при которых на заданной частоте основного резонанса  $f_0=17$  ГГц коэффициент отражения был больше 0.98. Характеристики построены для трех значений ширины щели низкоомной части резонатора, указанных на рисунках, а различные характеристики на рисунках относятся к разным значениям длины низкоомной секции  $l_1$ , которая выступает здесь параметром. При этом длина высокоомной секции всякий раз подбиралась с тем, чтобы обеспечить заданную частоту  $f_0$  основного типа колебаний резонатора. Отметим также, что кривые, относящиеся к значению параметра  $l_1=0.01$  мм, являются характеристиками однородных резонаторов на индуктивных полосках и приводятся для сравнения с частотными характеристиками волноводно-планарных SIR.

Представленные результаты показывают, что рассмотренная ранее модель описывает реальное

поведение SIR лишь качественно: сокращение размеров резонатора и увеличение отношения  $f_2/f_1$  имеет место только при преобладании длины низкоомной секции резонатора. Оценку же величины этого преобладания упрощенная модель дает абсолютно неверно, поскольку во всех рассмотренных случаях (рисунки 3а, 3б, 3с,) максимальное значение отношения частот  $f_2/f_1$ , например, достигается при длине низкоомной части, лишь незначительно превышающей половину общей длины резонатора.

В реальности же указанное отношение частот монотонно растет вплоть до очень малых, по сравнению с общей длиной резонатора, размеров высокоомной секции.

Это видно из рисунков 4б, 5б, 6б, на которых представлены результаты расчетов зависимостей отношения частот и нормированной общей длины резонатора  $(l_1 + l_2)/\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве на частоте  $f_0$ ) от отношения длин высокоомной и низкоомной частей SIR.

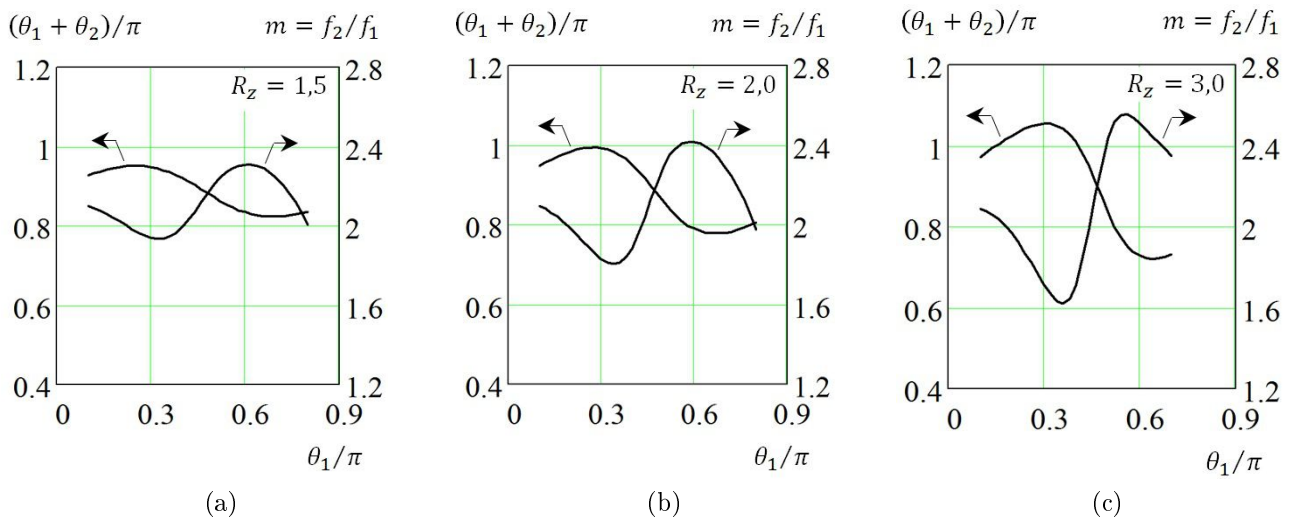
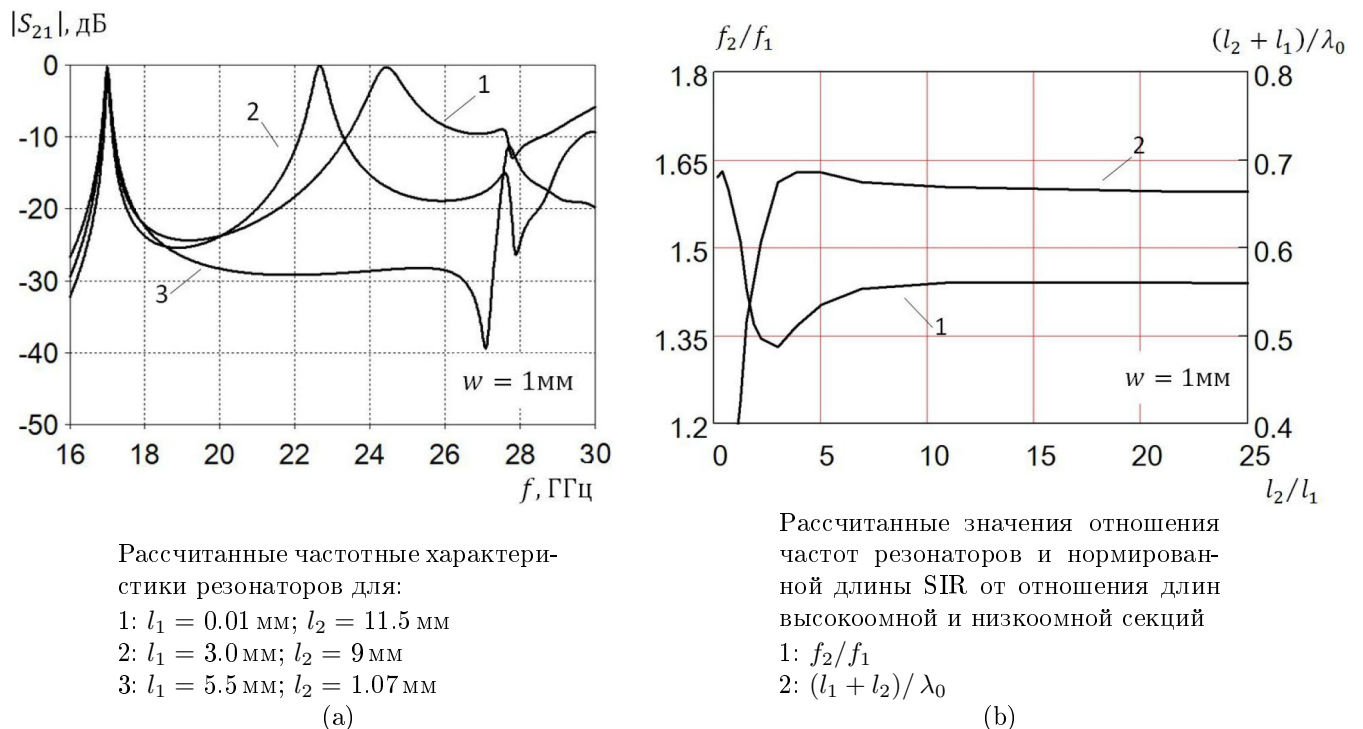


Рис. 3. Зависимости нормированной суммарной электрической длины резонатора и отношения частот  $f_2/f_1$  от нормированной длины низкоомной секции



Рассчитанные частотные характеристики резонаторов для:

- 1:  $l_1 = 0.01$  мм;  $l_2 = 11.5$  мм
- 2:  $l_1 = 3.0$  мм;  $l_2 = 9$  мм
- 3:  $l_1 = 5.5$  мм;  $l_2 = 1.07$  мм

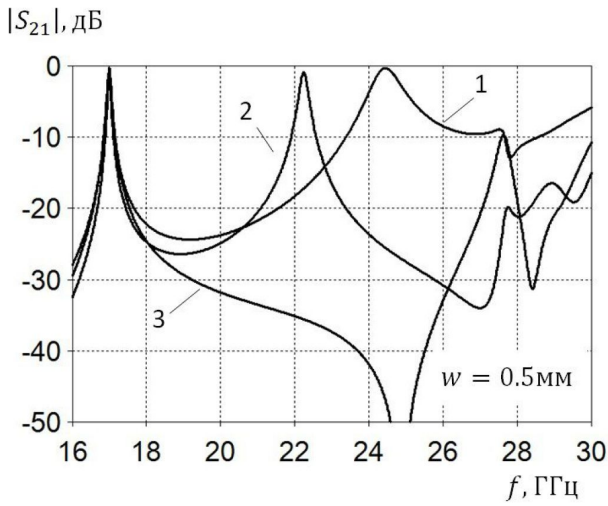
(а)

Рассчитанные значения отношения частот резонаторов и нормированной длины SIR от отношения длин высокоомной и низкоомной секций

- 1:  $f_2/f_1$
- 2:  $(l_1 + l_2)/\lambda_0$

(б)

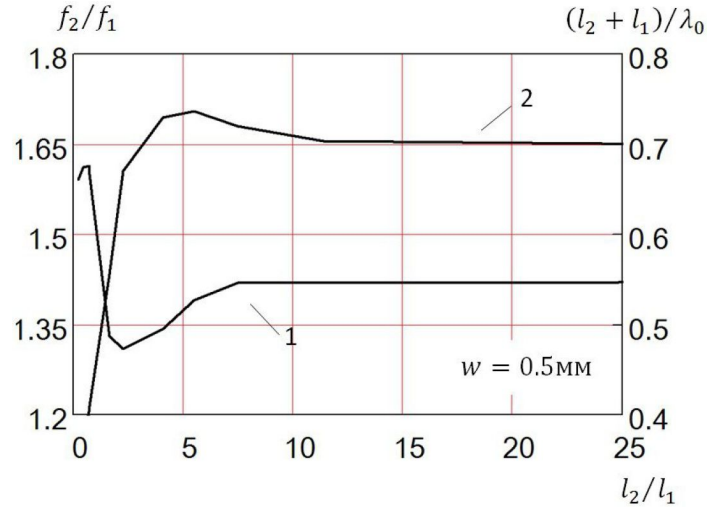
Рис. 4



Рассчитанные частотные характеристики резонаторов для:

- 1:  $l_1 = 0.01$  мм;  $l_2 = 11.5$  мм
- 2:  $l_1 = 3.5$  мм;  $l_2 = 7.7$  мм
- 3:  $l_1 = 4.8$  мм;  $l_2 = 1.1$  мм

(a)

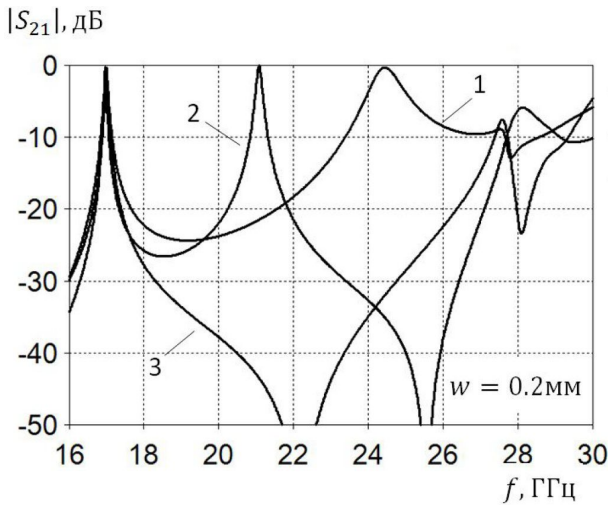


Рассчитанные значения отношения частот резонаторов и нормированной длины SIR от отношения длин высокоомной и низкоомной секций

- 1:  $f_2/f_1$
- 2:  $(l_1 + l_2)/\lambda_0$

(b)

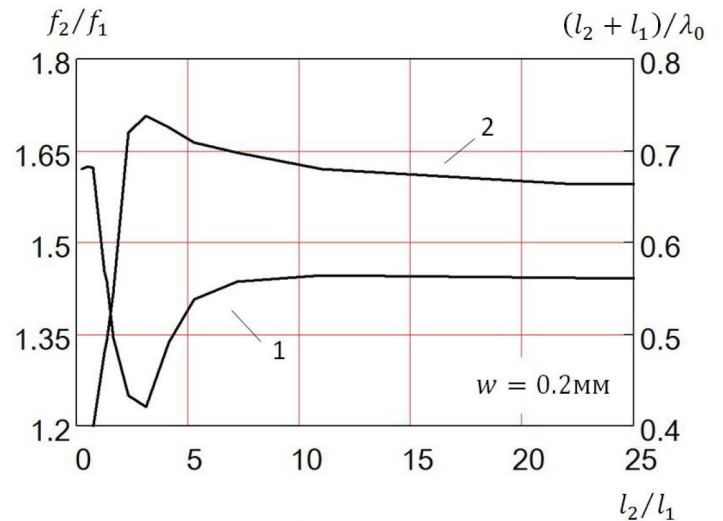
Рис. 5



Рассчитанные частотные характеристики резонаторов для:

- 1:  $l_1 = 0.01$  мм;  $l_2 = 11.5$  мм
- 2:  $l_1 = 3.2$  мм;  $l_2 = 9.4$  мм
- 3:  $l_1 = 4.3$  мм;  $l_2 = 1.16$  мм

(a)



Рассчитанные значения отношения частот резонаторов и нормированной длины SIR от отношения длин высокоомной и низкоомной секций

- 1:  $f_2/f_1$
- 2:  $(l_1 + l_2)/\lambda_0$

(b)

Рис. 6

Представленные результаты кроме того показывают две важные особенности волноводно-планарного SIR с оптимальными размерами низкоомной секции. Во-первых, в отличие от однородного резонатора, его АЧХ вблизи второго резонанса сильно искажена, а сам резонанс выражен слабо.

Во-вторых, при всех рассмотренных значениях ширины щели низкоомной части резонатора в полосе частот между первым и вторым типами колебаний имеется полюс характеристики затухания, частота которого зависит от ширины щели. Наличие полюса делает селективные свойства однородного резона-

тора и волноводно-планарного SIR вообще несопоставимыми, поскольку при надлежащем выборе ширины щели вносимые потери SIR на частоте второго резонанса однородного резонатора могут быть сделаны чрезвычайно большими.

Несмотря на отмеченное несоответствие результатов, полученных в рамках упрощенного представления SIR и его электродинамического моделирования, представляется целесообразным поставить задачу об уточнении модели резонатора в терминах теории цепей с целью установить возможность расчета SIR без привлечения его полной электродинамической модели. Это даст возможность существенно сократить время синтеза резонаторов и многорезонаторных фильтров путем использования предварительно рассчитанных таблиц параметров составляющих резонатор элементов. С этой целью резонатор представлялся в виде каскадного соединения четырехполюсников, как это показано на рис. 7. На рисунке матрицы  $\hat{S}^{(1)}, \hat{S}^{(3)}, \hat{S}^{(5)}$  – одноволновые матрицы рассеяния полосок и скачка ширины щели резонатора рассчитываются электродинамически, а матрицы  $\hat{S}^{(2)}$  и  $\hat{S}^{(4)}$  – матрицы рассеяния секций резонатора.

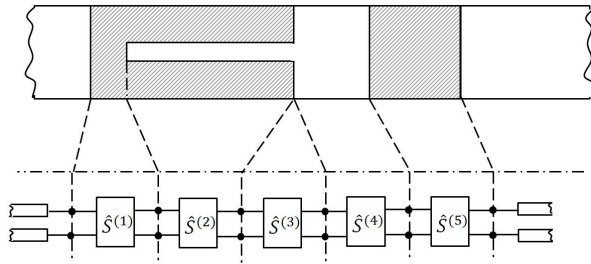


Рис. 7. Полная эквивалентная схема SIR

Частотная характеристика резонатора с выбранными размерами  $w$  и длин секций  $\hat{S}^{(2)}, \hat{S}^{(4)}$  находилась по предварительно вычисленным в среде электродинамического анализа значениям элементов матриц  $\hat{S}^{(1)}, \hat{S}^{(3)}, \hat{S}^{(5)}$  и программам расчета дисперсионных характеристик линий секций SIR. Для примера рассчитанная таким образом АЧХ резонатора с шириной щели  $w = 0.5$  мм и длинами секций  $l_1 = 4.8$  мм,  $l_2 = 1.1$  мм приведена на рис. 8 (кривая 1). Здесь же для сравнения (кривая 2) приведена характеристика резонатора, рассчитанная в среде электродинамического моделирования. Видно, что характеристики с графической точностью совпадают в области частот, примыкающей к резонансной частоте  $f_0$ . Этот важный факт говорит о возможности использовать теорию цепей для синтеза резонаторов. Различие АЧХ вдали от  $f_0$  объясняется взаимодействием области скачка ширины щели резонатора и полоски, проявляющимся именно в случае малой длины высокоомной части SIR. Такое взаимное влияние близко расположенных неоднородностей, очевидно, не может быть учтено в одноволновом приближении.

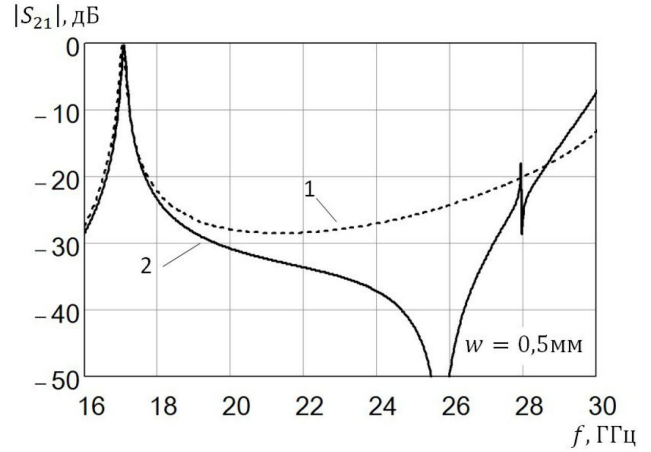


Рис. 8. Сравнение частотных характеристик SIR, рассчитанных в одноволновом приближении (1) и в результате электродинамического анализа SIR, как целого (2); ( $l_1 = 4.3$  мм,  $l_2 = 1.16$  мм)

## 2 Волноводно-планарные SIR-фильтры

Свойства резонаторов со ступенчатым изменением импеданса, как уже отмечалось, с успехом используются при построении фильтров. Различные модификации их топологии на основе микрополосковой линии позволили создать компактные полосовые фильтры с высокой селективностью в длинноволновой части сантиметрового диапазона длин волн [11], [16], сверхширокополосные фильтры сантиметрового диапазона [11], [14], резонаторы и фильтры с произвольным расположением основных полос пропускания [12], [15]. Предложенные и рассмотренные в данной работе волноводно-планарные SIR были использованы для реализации полосно-пропускающих фильтров коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн с расширенными полосами заграждения. В качестве примера здесь рассмотрена топология двухрезонаторного фильтра Чебышева, требования к характеристике которого представлены в таблице 1.

Табл. 1 Требования к характеристике двухрезонаторного фильтра Чебышева

Параметр	Значение
Нижняя граница полосы пропускания, $f_H$ , ГГц	17.10
Верхняя граница полосы пропускания, $f_B$ , ГГц	17.40
Уровень пульсаций в полосе пропускания, дБ	0.5
Затухание на частоте, $f_A$ , ГГц, не менее, дБ	10

Планарная структура фильтра должна быть выполнена на подложке толщиной  $d = 140$  мкм с

двухсторонней металлизацией  $\xi = 35$  мкм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.2$ , помещаемой в волноводную камеру сечением  $a \times b = 11 \times 5.5$  мм.

Синтез фильтра, топология которого показана на рис. 9, проводился по методике, основанной на использовании  $K$ -инверторов сопротивлений. При этом размеры элементов связи резонатора  $S_1, S_2$ , соответствующие требуемым коэффициентам инверсии, рассчитывались в пакете программ электродинамического моделирования; размер щели низкоомной секции и длина высокоомной части резонатора фиксировались ( $w_1 = 1$  мм,  $l_2 = 1$  мм), а длина низкоомной части  $l_1$  рассчитывалась, исходя из уточненной модели резонатора так, как это описано выше. В результате получено:  $S_1 = 3.8$  мм,  $S_2 = 2.18$  мм,  $l_1 = 5.4$  мм. Рассчитанная характеристика фильтра изображена на рис. 10 (тонкая сплошная линия). Полученные размеры уточнялись в стандартной программе оптимизации, причем оптимизации подвергались только размеры полосок. Найденные размеры равны  $S_1 = 3.27$  мм,  $S_2 = 1.49$  мм.

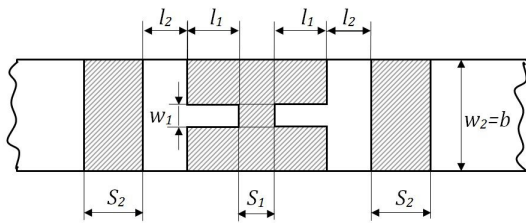


Рис. 9. Топология двухрезонаторного фильтра на SIR

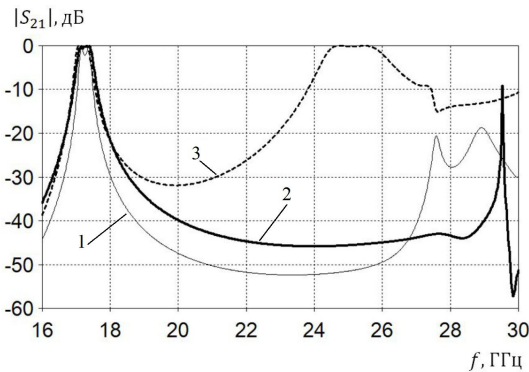


Рис. 10. Рассчитанные частотные характеристики двухрезонаторных фильтров: синтезированного по описанной методике (1); с оптимизированными размерами (2); на однородных резонаторах (3)

Итоговая характеристика фильтра изображена на рис. 10 сплошной жирной линией. Поскольку необходимый результат был достигнут исключительно за счет существенной коррекции длин полосок, обоснованным можно считать утверждение о том, что коррекция их размеров может быть выполнена аналитически путем изменения требований к параметрам инверторов, как это было сделано в [17].

В данной работе справедливость этого предположения не проверялась. На рис. 10 штриховой

линией также изображена характеристика фильтра на однородных резонаторах.

Как и следовало ожидать, избирательные свойства предложенного волноводно-планарного фильтра значительно превосходят таковые для стандартного фильтра с тем же числом резонаторов и требованиями к полосе пропускания: на частотах второй полосы прозрачности стандартного фильтра потери нового фильтра составляют порядка 45 дБ, а вторая полоса пропускания его вообще слабо выражена.

### 3 Экспериментальные результаты

Характеристики рассчитанных и изготовленных образцов резонатора и двухрезонаторного фильтра измерялись экспериментально (рис. 11, рис. 12, соответственно). Результаты измерений потерь показаны точками; на этих же рисунках для сравнения изображены результаты симуляции. Как видно, характеристики совпадают с необходимой для практики точности.

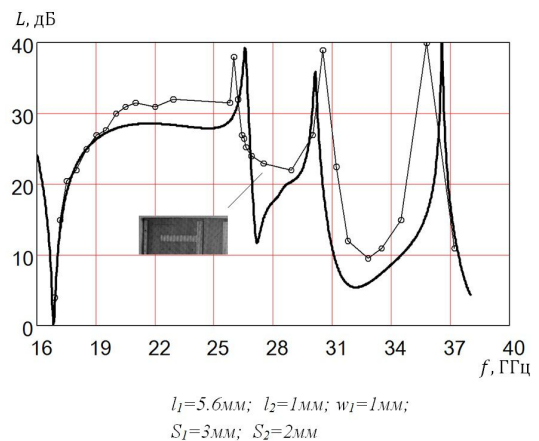


Рис. 11. Экспериментальная и рассчитанная амплитудно-частотная характеристика изготовленного SIR

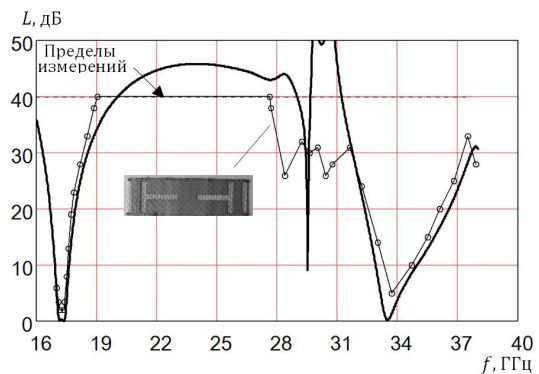


Рис. 12. Экспериментальная и рассчитанная амплитудно-частотная характеристика изготовленного двухрезонаторного фильтра на SIR

## Выводы

Предложенные волноводно-планарные резонаторы со ступенчатым изменением импеданса и полосно-пропускающие фильтры на их основе, сохраняя простоту и технологичность волноводно-планарных ГИС на однородных резонаторах, обладают значительно более широкими полосами заграждения и вносимым в них затуханием. Указанное улучшение характеристик фильтров обусловлено качественно новыми частотными характеристиками составляющих фильтр волноводно-планарных резонаторов. Эти характеристики демонстрируют помимо значительного (до 90%) расширения полосы частот между основными типами колебаний еще и возникновение полюса характеристики затухания в этой полосе. Волноводно-планарная технология предложенных фильтров позволяет использовать их на частотах миллиметрового диапазона длин волн.

## Перечень ссылок

1. Konishi Y. The design of a band pass filters with inductive strip-planar circuit mounted in waveguide. / Y.Konishi, K.Uenakada // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1974. –Vol. 22, Iss.10, pp. 869-873.
2. Dai C. Parallel coupled microstrip and E-plane metal insert waveguide band-pass filter at W-band. / C.Dai, L.Hao, S.Bo, H.Sun // *3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Conf.Proc.* – 2014. –pp.1231-1233.
3. Arndt F. PE-plane integrated Circuit Filters with Improved stop-band Attenuation. / F.Arndt, J.Bornemann, R.Vahldieck, D.Grauerholz // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1984. – Vol. 32, Iss. 10, pp. 1391-1394.
4. Budimir D. Optimized E-plane band pass filters with Improved Stop-band Performance. / D.Budimir // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1997. –Vol. 45, Iss. 2, pp. 212-220.
5. Омеляненко М.Ю. Волноводно-планарные фильтры на развернутых структурах. / М.Ю.Омеляненко, О.В. Туреева // *Радиоэлектроника*. – 1988. –Т.31, № 10. С. 56-60.
6. Kong K.S. Computer-aided Design of Evanescent Mode Waveguide Bandpass Filter with Nontouching E-plane Fins. / K.S.Kong, T.Itoh // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1989. –Vol. 37, Iss. 12, pp. 1998-2014.
7. Makimoto M. Compact bandpass filters using stepped impedance resonators. / M.Makimoto, S.Yamashita // *Proc. of the IEEE*. – 1979. –Vol. 67, Iss. 1, pp.16-19.
8. Sagawa M. Miniaturized Stepped Impedance Resonators with a Double Coaxial Structure and Their Application to Bandpass Filters. / M.Sagawa, M.Matsuo, M.Makimoto, K.Eguchi // *IEICE Transactions on Electronics*. – 1995. – Vol. E78-C, Iss.8, pp.1051-1057.
9. Yabuki H. Stripline dual-mode ring resonators and their application to microwave devices. / H.Yabuki, M.Sagawa,

M.Matsuo, M.Makimoto // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1996. –Vol. 44, Iss. 5, pp.723-729.

10. Sagawa M. Geometrical structures and fundamental characteristics of microwave stepped-impedance resonators. / M.Sagawa, M.Makimoto, S.Yamashita // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1997. –Vol. 45, Iss. 7, pp.1078-1085.
11. Chen Y.-M. A Compact Step-Impedance Comblne Filter With Symmetric Insertion-Loss Response and Wide Stopband Range. / Y.-M.Chen, S.-F.Chang, C.-C.Chang, T.-J.Hong, W.-C.Lo // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* – 2006. –pp.1209-1212.
12. Alaydrus M. Study of SIR for Designing Filters with Arbitrary Resonant Positions. / M.Alaydrus, D.W.Astuti, S.Attamimi // *2nd Int. Conference on Information and Communication Technology*. – 2014. –Vol.2, pp.80-83.
13. Mokhtaari M. Folded compact ultra-wideband stepped-impedance resonator filters. / M.Mokhtaari, J.Bornemann, S.Amari // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* – 2007. –pp.747-750.
14. Cai P. A Novel Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter Using a Microstrip Stepped-Impedance Four-Modes Resonator. / P.Cai, Z.Ma, X.Guan, Y.Kobayashi, T.Anada, G.Hagiwara // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* – 2007. –pp.751-754.
15. Bukuru D. Compact Quad-Band Bandpass Filter Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator and Multiple Coupling Circuits. / D.Bukuru, K.Song, F.Zhang, Y.Zhu, Fan M. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. –2017. –Vol. 65, Iss.3, pp.783-791.
16. Mao R.-J. Miniaturized Hexagonal Stepped-Impedance Resonators and Their Applications to Filters. / R.-J.Mao, X.-H.Tang, L.Wang, G.-H.Du // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. –Vol. 56, Iss.2, pp.440-448.
17. Омеляненко М.Ю. Синтез интегральных фильтров на основе частично заполненных волноводов. / М.Ю.Омеляненко, В.И.Цымбал // *Радиоэлектроника*. – 1984. –Т.27, № 5. С. 65-67.

## References

- [1] Konishi Y. and Uenakada K. (1974) The Design of a Bandpass Filter with Inductive Strip – Planar Circuit Mounted in Waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 22, Iss. 10, pp. 869-873. DOI: 10.1109/tmtt.1974.1128366
- [2] Dai C., Hao L., Bo S. and Sun H. (2014) Parallel coupled microstrip and E-plane metal insert waveguide band-pass filter at W-band. *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, pp.1231-1233. DOI: 10.1109/apcap.2014.6992739
- [3] Arndt F., Bornemann J., Vahldieck R. and Grauerholz D. (1984) E-Plane Integrated Circuit Filters with Improved Stopband Attenuation (Short Papers). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 32, Iss. 10, pp. 1391-1394. DOI: 10.1109/tmtt.1984.1132858
- [4] Budimir D. (1997) Optimized E-plane bandpass filters with improved stopband performance. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 2, pp. 212-220. DOI: 10.1109/22.557602

- [5] Omelyanenko M.Yu., Tureeva O.V. (1988) Wave-planar filters on deployed structures. *Radio Electronics*, Vol.31, № 10. P. 56-60.
- [6] Kong K. and Itoh T. (1989) Computer-aided design of evanescent mode waveguide bandpass filter with nontouching E-plane fins. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 37, Iss. 12, pp. 1998-2004. DOI: 10.1109/22.44114
- [7] Makimoto M. and Yamashita S. (1979) Compact bandpass filters using stepped impedance resonators. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, Iss. 1, pp. 16-19. DOI: 10.1109/proc.1979.11196
- [8] Sagawa M., Matsuo M., Makimoto M., Eguchi K. (1995) Miniaturized Stepped Impedance Resonators with a Double Coaxial Structure and Their Application to Bandpass Filters. *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E78-C, Iss.8, pp.1051-1057.
- [9] Yabuki H., Sagawa M., Matsuo M. and Makimoto M. (1996) Stripline dual-mode ring resonators and their application to microwave devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 44, Iss. 5, pp. 723-729. DOI: 10.1109/22.493926
- [10] Sagawa M., Makimoto M. and Yamashita S. (1997) Geometrical structures and fundamental characteristics of microwave stepped-impedance resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 45, Iss. 7, pp. 1078-1085. DOI: 10.1109/22.598444
- [11] Chen Y., Chang S., Chang C., Hong T. and Lo W. (2006) A Compact Step-Impedance Compline Filter With Symmetric Insertion-Loss Response and Wide Stopband Range. *2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp.1209-1212. DOI: 10.1109/mwsym.2006.249427
- [12] Alaydrus M., Astuti D.W. and Attamimi S. (2014) Study of SIR for designing filters with arbitrary resonant positions. *2014 2nd International Conference on Information and Communication Technology (ICOICT)*, pp. 80-83. DOI: 10.1109/icoict.2014.6914044
- [13] Mokhtaari M., Bornemann J. and Amari S. (2007) Folded Compact Ultra-Wideband Stepped-Impedance Resonator Filters. *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 747-750. DOI: 10.1109/mwsym.2007.380047
- [14] Cai P., Ma Z., Guan X., Kobayashi Y., Anada T. and Hagiwara G. (2007) A Novel Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter Using a Microstrip Stepped-Impedance Four-Modes Resonator. *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp.751-754. DOI: 10.1109/mwsym.2007.380048
- [15] Bukuru D., Song K., Zhang F., Zhu Y. and Fan M. (2017) Compact Quad-Band Bandpass Filter Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator and Multiple Coupling Circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, Iss. 3, pp. 783-791. DOI: 10.1109/tmtt.2016.2638814
- [16] Mao R., Tang X., Wang L. and Du G. (2008) Miniaturized Hexagonal Stepped-Impedance Resonators and Their Applications to Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, Iss. 2, pp. 440-448. DOI: 10.1109/tmtt.2007.914622
- [17] Omelyanenko M.Yu., Tsybmal V.I. (1984) Synthesis of integrated filters based on partially filled waveguides. *Радиоелектроніка*, Vol.27, № 5., P. 65-67.

## Хвильоводно-планарні смугові фільтри із широкою смугою загородження

Омеляненко М. Ю., Романенко Т. В.

**Вступ.** В роботі представлені результати розробки хвильоводно-планарних фільтрів із покращеними характеристиками селективності в смузі частот загородження фільтра. Значне розширення діапазону частот загородження і збільшення робочого загасання в ній досягнуто за рахунок використання у якості резонаторів фільтра резонаторів із ступінчатою зміною імпедансу (SIR), хвильоводно-планарна реалізація яких запропонована в роботі вперше. Успішне застосування згаданих резонаторів в конструкціях хвильоводно-планарних фільтрів стало можливим завдяки ретельному дослідженню в роботі властивостей хвильоводно-планарних SIR, яке виявило особливості їх топології і можливості їх ефективного розрахунку. В роботі запропонована топологія гібридно-інтегральних схем (ГІС) хвильоводно-планарних SIR-фільтрів і на прикладі дворезонаторного фільтра продемонстровано процедуру їх швидкого розрахунку. Виміряні характеристики розрахованих і виготовлених зразків резонатора і фільтра продемонстрували хорошу відповідність результатам симуляції.

**Розробка ГІС SIR-фільтрів.** Розробка заснована на дослідженні властивостей хвильоводно-планарних резонаторів із ступінчатою зміною імпедансу. Аналіз характеристик цих резонаторів проведений у три етапи. На першому дослідження характеристик проведено для моделі резонатора, побудованої в термінах теорії кіл без урахування дифракційних поправок, що відповідають за зміну ширини щілини в секціях SIR, але з врахуванням реактивностей, що формують резонатори. Виявлено, що отримані характеристики лише якісно співпадають з результатами другого етапу аналізу резонатора, на якому його топологія, як цілого, досліджувалась в пакеті програм електродинамічного моделювання. Зокрема, результати, отримані в термінах теорії кіл, не описують значну різницю в довжині секцій резонатора, необхідну для досягнення максимального розносу його резонансних частот і появу полюса характеристики загасання в смузі частот між ними. Водночас, вдосконалення цієї моделі, виконане на третьому етапі аналізу SIR, показало можливість розрахунку характеристик резонатора за цією моделлю, що необхідно для синтезу смуги пропускання багаторезонаторного фільтра. Крім того, порівняльний аналіз одномодової і точної характеристик резонатора надав можливість пояснення появи згаданого полюса загасання і виявлення факторів, що впливають на його положення на частотній вісі. Отримані при дослідженні хвильоводно-планарних SIR результати з успіхом були використані при розрахунку дворезонаторного SIR-фільтра із запропонованою топологією. В основу синтезу фільтра було положено методіку, засновану на використанні К-інверторів опорів. Цей підхід надав можливість швидкого отримання таких початкових значень розмірів елементів топології фільтра, що майже не потребували уточнення при їх оптимізації в середовищі електродинамічного моделювання. Результати симуляції характеристик розрахованого фільтра з достатньою для практики точністю співпадають із результатами вимірювань характеристик виготовлених зразків резонатора і фільтра.



**Висновок.** Запропонована топологія хвилеводно-планарних резонаторів із ступінчатою зміною імпедансу і фільтрів на їх основі забезпечує значне покращення селективних характеристик цього класу фільтрів – значне розширення смуги загородження і збільшення робочого загасання в ній. При цьому сама структура фільтра є гібридно-інтегральною схемою, що забезпечує високу точність її виготовлення і повторюваність характеристик фільтрів без будь-яких операцій по налаштуванню зразків. Крім того, хвилеводно-планарна технологія забезпечує можливість використання цих фільтрів в міліметровому діапазоні довжин хвиль без суттєвого погіршення характеристик порівняно з отриманими на більш низьких частотах.

*Ключові слова:* смугові фільтри; міліметровий діапазон; гібридно-інтегральні схеми НВЧ; резонатори із ступінчатою зміною імпедансу

## E-plane waveguide bandpass filters with wide stopband

*Omelianenko M. Yu., Romanenko T. V.*

**Introduction.** The results of the development of E-plane waveguide bandpass filters with improved selectivity in the stopband are presented. The significant expansion of the stopband and the increase of the attenuation in it was achieved by using of the stepped-impedance resonators (SIR), the planar implementation of which was proposed in this work for the first time. The successful application of the above mentioned resonators in the designs of E-plane waveguide filters was possible by careful study of the properties of SIRs, which revealed the features of their topology and the possibility of their effective calculation. The topology of hybrid integrated circuits (HIC) of E-plane waveguide SIR filters is proposed, and the procedure of their fast calculation is demonstrated by the example of a two-resonator filter. The measured characteristics of the calculated and fabricated samples of the resonator and filter have shown good agreement with the simulation results.

**The development of HIC SIR filters.** The development is based on the investigated properties of stepped-impedance resonators. The characteristics of these resonators are analyzed in three steps. First, the model of the resonator was constructed in terms of the circuit theory

without taking into account the diffraction corrections responsible for changing in slot width of the SIR sections, but taking into account the forming reactances. It is revealed that the obtained characteristics only qualitatively coincide with the results of the second stage of analysis of the resonator, on which its topology, as a whole, was treated with FDTD simulator. In particular, the results obtained in terms of circuit theory do not describe the significant difference in the section length of the resonator required to achieve the maximum spacing of its resonant frequencies and the appearance of a transmission zero in the frequency band between them. At the same time, the improvement of this model, performed in the third stage of the SIR analysis, showed the ability to calculate the characteristics of the resonator with this model, which is necessary for the synthesis of the multi-resonator filter. In addition, a comparative analysis of the single-mode and accurate characteristics of the resonator provided an opportunity to explain the appearance of the above mentioned attenuation pole and to identify the factors affecting its position on the frequency axis. The results obtained in the study of SIRs were successfully used in the calculation of a two-resonator SIR filter with the proposed topology. The synthesis of the filter based on the method using K-inverters. This approach made it possible to quickly obtain the initial values of the filter topology element sizes. These sizes almost did not require refinement when optimized by electrostatics simulator. The simulation results of the filter characteristics coincide with the measurement results for the fabricated samples of the resonator and filter with sufficient to practice accuracy.

**Summary.** The proposed topology of E-plane waveguide stepped-impedance resonators and filters based on them provides a significant improvement in the selective characteristics of this class of filters - a significant expansion of the stopband and increase the attenuation in it. The structure of the filter itself is a hybrid integrated circuit that provides high precision of its manufacture and repeatability of the characteristics of the filters without any operations on tuning the samples. In addition, E-plane waveguide technology enables these filters to be used in the millimeter waves range without significantly performance degradation.

*Key words:* bandpass filters; millimeter waves; microwave hybrid integrated circuits; stepped-impedance resonators