

**B.A. Belyaev<sup>1,2</sup>, S.A. Khodenkov<sup>1</sup>, E.V. Korolev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk

<sup>2</sup>Institute of Physics, Krasnoyarsk

## **INVESTIGATION OF NATURAL FREQUENCIES OF THE MULTIMODE MICROSTRIP RESONATOR AND FILTER ON ITS BASIS**

The natural frequencies of the multimode microstrip resonator «hairpin with stub» were investigated from its constructive data. Application in the resonator of the stub allows not only to observe on amplitude-frequency characteristic the poles of power attenuation, and also to considerably reduce frequencies of all its even modes of oscillations. At the same time frequencies of odd modes don't change. It allows to use in addition two resonances participating in formation of expanded bandwidth of the filter based on such resonator. High frequency-selective properties of such design are caused not only the poles of power attenuation located as near low-frequency, and high-frequency slopes of bandwidth, but also wide stop band.

**Б.А. Беляев<sup>1,2</sup>, С.А. Ходенков<sup>1</sup>, Е.В. Королев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет

имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск,

e-mail: hsa-sibsau@mail.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ МНОГОМОДОВОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО РЕЗОНАТОРА И ФИЛЬТРА НА ЕГО ОСНОВЕ**

Разработка новых и совершенствование уже имеющихся сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств частотной селекции – важная и актуальная задача радиотехники. Одно из ее решений – применение в них микрополосковых многомодовых резонаторов [1, 2], в том числе со шлейфами. Однако влияние шлейфа на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) микрополосковых устройств изучено слабо, в частности, общепринято [3], что он формирует полюса затухания мощности на определенных частотах.

Поэтому стоит отметить работу [4], в которой заявлено, что в фильтре на основе резонатора типа «шпилька со шлейфом» возбуждаются (благодаря шлейфу) две дополнительные моды колебаний, одна из которых участвует в формировании, наряду с основной, полосы пропускания (ПП), а вторая – в формировании полюса затухания на склоне ПП.

В настоящей работе представлены результаты систематического анализа такого микрополоскового резонатора. Проведенные исследования  
978-1-5090-1713-3/16/\$31.00 ©2016 IEEE

демонстрируют основные закономерности изменения собственных частот, а также частот полюсов затухания мощности от конструктивных параметров резонатора.

Параметрический синтез всех рассмотренных устройств проводился с помощью численного электродинамического анализа 3D моделей. Для объективного сравнения их характеристик использовались одинаковые подложки с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 80$  и толщиной  $h = 1$  мм (материал – керамика «ТБНС»).

Для последовательного анализа рассмотрим сначала резонатор типа «шпилька». Использование в исследованиях собственных частот слабой емкостной связи многомодового резонатора (см. рис. 1,а, 3,а) с 50  $\Omega$  трактом СВЧ позволяет несколько упростить обработку данных.

Изменения частот нижайших мод колебаний ( $n = I \dots VI$ ), сопровождающие увеличение размера прорези (длины отрезка полоскового проводника  $l_2$ ), нагляднее представить нормированными на частоту нижайшей моды (см. рис. 1,б).

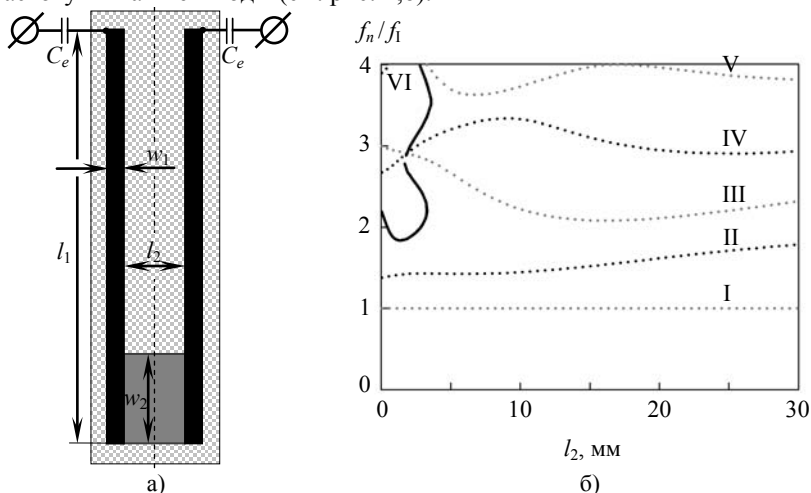


Рис. 1. Топология полосковых проводников многомодового резонатора (а) и нормированные частотные зависимости его нижайших мод колебаний, а также полюсов затухания (б). Точки серого цвета ( $n = I, III, V$ ) – данные для нечетных мод колебаний, точки черного цвета ( $n = II, IV, VI$ ) – данные для четных мод, линии – данные для полюсов затухания мощности

Диапазон размера прорези от тонкой щели [5] до  $l_2 \approx l_1 \approx 12$  мм позволяет реализовать устройства на основе двухмодового резонатора, кондуктивно подключенного к линиям передачи ( $C_e = \infty$ ). Как видно из АЧХ резонатора (см. рис. 2,а), за счет полюсов затухания мощности (см. рис. 1,б), частоты III моды колебаний могут быть значительно смещены в высокочастотную область.

Дальнейшее увеличение длины полоскового отрезка  $l_2$  до значения  $\approx 18$  мм позволяет оптимально подобрать частоты первых трех низжайших мод колебаний I-III (см. рис. 2, б), что позволяет создавать конструкции уже на трехмодовом резонаторе. Отметим, что значительное расширение отрезка  $l_2 > 25$  мм «расталкивает» частоты I и II моды.

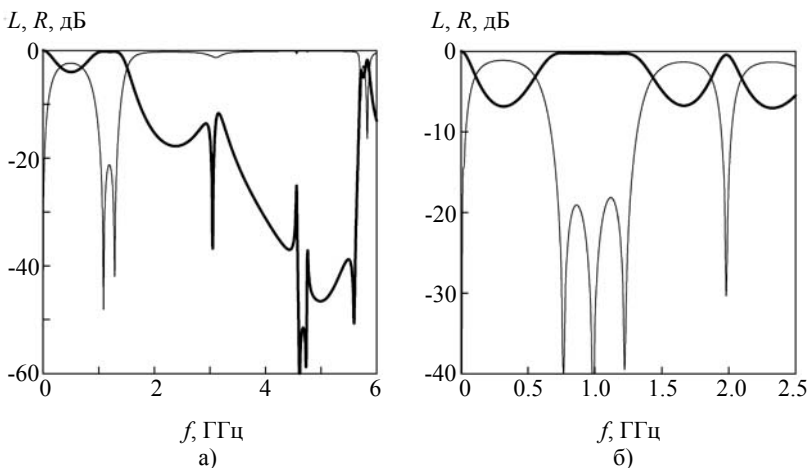


Рис. 2. АЧХ резонатора типа «шпилька»: а – с использованием в расчетах длины отрезка  $l_2 = 1,8$  мм; б – при ее десятикратном увеличении ( $l_2 = 18,0$  мм)

Приведем используемые при расчетах конструктивные параметры исследованного резонатора типа «шпилька»:  $l_1 \approx 12,25$  мм,  $w_1 = 0,50$  мм,  $w_2 = 2,65$  мм.

Перейдем непосредственно к исследованию резонатора типа «шпилька со шлейфом». Для этого разместим отрезок полоскового проводника длиной  $l_3$  и шириной  $w_3$  (шлейф) так, чтобы один из его концов (см. рис. 3,а) находился в узле электрического поля первой моды колебаний рассмотренного выше резонатора типа «шпилька». Зафиксируем ширину отрезка проводника  $w_3 = 1,20$  мм и будем монотонно увеличивать его длину  $l_3$  (см. рис. 3,б). На АЧХ в области высоких частот появляются полюса затухания мощности, частоты которых затем понижаются, кроме того, понижаются и частоты четных мод колебаний резонатора. При этом частоты всех нечетных мод колебаний остаются постоянными, т.к. для них в точке подключения шлейфа располагаются узлы электрического поля. Отметим, что при сближении частот четных и нечетных мод наблюдается один вырожденный резонанс, вблизи которого отсутствуют полюса затухания мощности.

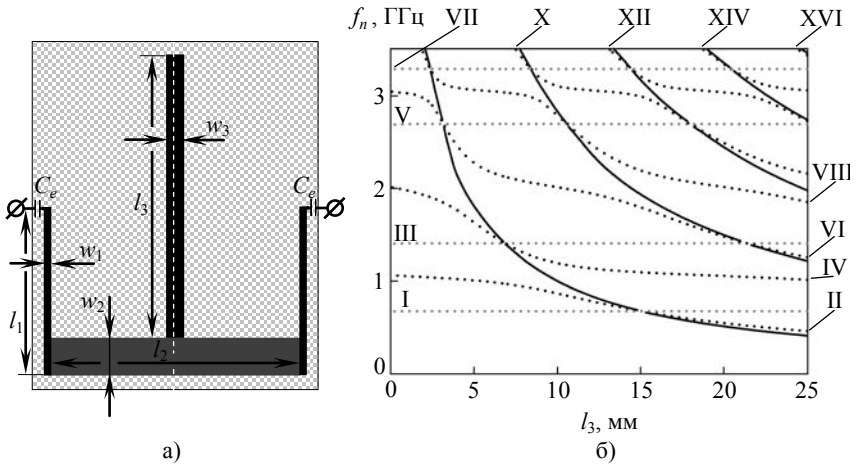


Рис. 3. Топология полосковых проводников резонатора типа «шпилька со шлейфом» (а) и его частотные зависимости нижайших мод колебаний и полюсов затухания мощности (б). Точки серого цвета ( $n = I, III, V, VII$ ) – данные для нечетных мод колебаний, точки черного цвета ( $n = II, IV, VI, VIII, X, XII, XIV, XVI$ ) – данные для четных мод колебаний, линии – данные для полюсов затухания

АЧХ резонатора при длине полоскового проводника  $l_3 = 20,30$  мм показана на рис. 4.

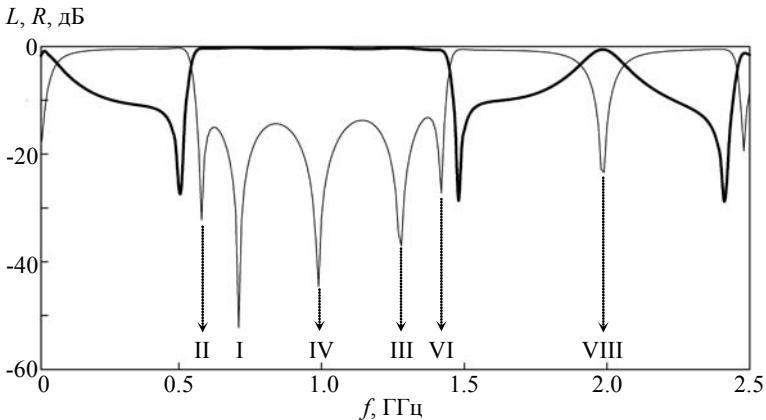


Рис. 4. АЧХ резонатора типа «шпилька со шлейфом» ( $C_e = \infty$ )  
Резонансы пронумерованы

Использование шлейфа приводит к тому, что моды резонатора перестраиваются по частотам в следующем порядке: II, I, IV, III, VI, VIII, X, V, XII, VII, XIV и т.д. При этом рядом с II и VI модами колебаний наблюдаются полюса затухания мощности, что по сути предварительно

определяет границы III полосо-пропускающего фильтра, реализованного с использованием такого резонатора.

Приведем пример создания широкополосного фильтра на резонаторе типа «шпилька со шлейфом». Для этого расположим на диэлектрической подложке параллельно многомодовому резонатору заземленные со стороны свободных концов, свернутые П-образно, тонкие проводники связи. Их геометрические размеры подобраны таким образом, чтобы частоты низайшего резонанса каждого крайнего резонатора попадали на частоты полосы пропускания фильтра. Это позволит повысить его порядок с пяти до семи.

Исследования показывают, что такую микрополосковую конструкцию можно значительно миниатюризировать, не снижая ее селективных свойств, расщепив и частично свернув полосковый проводник длинного шлейфа, как это показано на рис. 5.

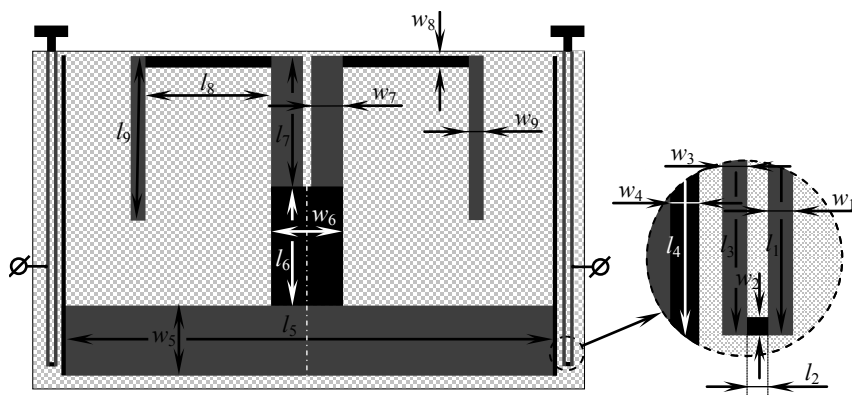


Рис. 5. Топология полосковых проводников широкополосного фильтра на основе пятимодового резонатора со шлейфом

Высокие частотно-селективные свойства фильтра (см. рис. 6) с относительной шириной полосы пропускания  $\Delta f/f_0 \approx 96\%$ , измеренной по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь  $L_{min} = 0,72$  дБ, обусловлены полюсами затухания мощности, расположенными как рядом с низкочастотным, так и высокочастотным склонами полосы пропускания, что сопровождается увеличением крутизны последних. Отметим также, что конструкция обладает расширенной высокочастотной полосой заграждения.

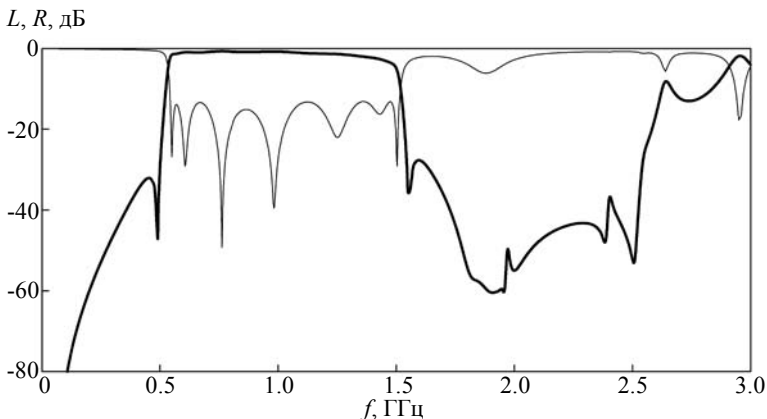


Рис. 6. АЧХ широкополосного фильтра на основе резонатора типа «шпилька со шлейфом»

Приведем конструктивные параметры синтезированного фильтра в мм:  $l_1 = l_3 = 11,85$ ,  $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0,05$ ,  $l_2 = 0,15$ ,  $l_4 = 12,25$ ,  $l_5 = 18,80$ ,  $w_5 = 2,65$ ,  $l_6 = 4,60$ ,  $w_6 = 2,30$ ,  $l_7 = l_8 = 4,95$ ,  $w_7 = 1,10$ ,  $w_8 = 0,35$ ,  $l_9 = 6,30$ ,  $w_9 = 0,60$ . Зазор между центральным резонатором и крайними одноמודовыми – 0,05 мм. Смещение пятимодового резонатора от верхнего края подложки – 0,05 мм.

Таким образом, значительно увеличивая размер прорези в резонаторе типа «шпилька», можно оптимально подобрать частоты трех его нижайших мод колебаний, это позволяет при проектировании полосно-пропускающих фильтров использовать его как трехмодовый резонатор.

Применение шлейфа в таком резонаторе приводит к появлению на его амплитудно-частотной характеристике полюсов затухания мощности. При этом увеличение длины полоскового проводника шлейфа сопровождается понижением их частот, а также частот четных мод колебаний резонатора. Частоты всех нечетных мод колебаний остаются постоянными. Это позволяет при создании полосно-пропускающих фильтров использовать его уже как пятимодовый резонатор. При этом разработанный широкополосный фильтр седьмого порядка на основе резонатора типа «шпилька со шлейфом» обладает высокими частотно-селективными свойствами: крутыми склонами полосы пропускания и расширенной высокочастотной полосой заграждения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, МК-9119.2016.8.

### Библиографический список

1. Investigation of Microstrip Structures of Wideband Bandpass Filters / В.А. Belyaev [et al.] // *Doklady Physics*. 2015. Vol. 60. № 3. P. 95–101.
2. Бальва Я.Ф. Исследование микрополосковых многомодовых резонаторов и конструирование полосно-пропускающих фильтров на их основе / Я.Ф. Бальва, Б.А. Беляев, С.А. Ходенков // *Известия вузов. Физика*. 2012. Т.55. № 8/3. С. 153-156.
3. А. с. 1563543. Полосно-пропускающий фильтр / Е.В. Анисимов, А.В. Калмыков, А.В. Конюшин и др. Опубл. 1990.
4. Александровский А.А. Синтез и селективные свойства микрополосковых фильтров на шпильковых резонаторах со шлейфными элементами / А.А. Александровский, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 4. С. 398-405.
5. Serzhantov A.M. Dual-mode split microstrip resonator for compact narrowband bandpass filters / A.M. Serzhantov, V.V. Tyurnev // *Progress in Electromagnetics Research C*. 2011. № 23. P. 151-160.