
**НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ**

УДК 621.372.8.049.75

**ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ОДНО- И ДВУХРЕЗОНАТОРНЫЕ
МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ**

© 2017 г. Г. М. Аристархов*, Н. В. Звездинов

*Московский технический университет связи и информатики,
Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 8а***E-mail: g.aristarkhov2010@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2016 г.

Выявлены новые селективные свойства базовой секции традиционных микрополосковых фильтров, схемотехническую основу которой составляет четырехпроводная система связанных четвертьволновых линий, содержащая один полуволновый шпилечный резонатор. Определены условия, при которых эта однорезонаторная секция приобретает свойства многорезонаторных цепей, так как в ней возможно формирование четырех нулей и шести полюсов рабочего затухания на конечных частотах. При этом структура не содержит короткозамыкающих на экран элементов, что определяет ее высокую технологичность. Показана возможность создания высокоизбирательных компактных микрополосковых фильтров на основе одно- и двухрезонаторных структур, т.е. на основе структур с минимальным числом резонаторов.

DOI: 10.7868/S0033849417080034

ВВЕДЕНИЕ

Повышение частотной избирательности, уменьшение габаритов и потерь в полосе пропускания, а также обеспечение высокой технологичности конструкций является основным направлением развития микрополосковых фильтров (МПФ). Однако добиться сочетания этих качеств очень сложно, так как создание фильтров с такими характеристиками на основе традиционных принципов построения подошло к границам предельных значений физических реализуемости. Одним из основных факторов, ограничивающих возможность создания высокоизбирательных МПФ, является сравнительно низкая собственная добротность микрополосковых резонаторов. Вследствие этого повышение избирательности МПФ за счет увеличения числа резонаторов больше некоторого значения не имеет смысла, так как это приводит к увеличению потерь в полосе пропускания и габаритов МПФ, а крутизна его частотной характеристики в переходной области не увеличивается [1].

Это обуславливает необходимость поиска таких компактных N -проводных многомодовых структур, в которых было бы возможным формирование значительного числа полюсов $P \geq N$ рабочего затухания на конечных частотах, обеспечивающих повышенную частотную избирательность МПФ при ограниченном числе резонаторов. Кроме того, для обеспечения высокой технологичности эти структуры не должны содержать короткозамкнутых на экран элементов.

В настоящее время известно несколько подходов к решению этой задачи в многорезонаторных структурах МПФ [2–7]. Во-первых, это использование эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в многосвязанных структурах с неоднородным магнитодиэлектриком [2, 3]. В работе [7] теоретически и экспериментально показано, что в компактных структурах МПФ на M сонаправленных полуволновых шпилечных резонаторах удается сформировать $M + 1$ полюсов рабочего затухания на конечных частотах за счет задания определенной степени неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках длины N -связанных четвертьволновых микрополосковых линий (МПЛ). Во-вторых, это формирование дополнительных электромагнитных связей между несмежными полуволновыми резонаторами [5]. Однако в таких матричных структурах формируется только $M - 2$ полюса рабочего затухания на конечных частотах. В-третьих, это применение в составе многосвязанных структур МПФ так называемых многомодовых резонаторов. Многомодовый резонатор это часть общей N -связанной структуры с определенными краевыми условиями на концах линий, условно выделенная как отдельный конструктивный элемент, выполненный в том или ином виде, например, в виде меандра или одноволнового кольца [6].

Такой принцип построения в сочетании с дополнительными короткозамкнутыми на экран

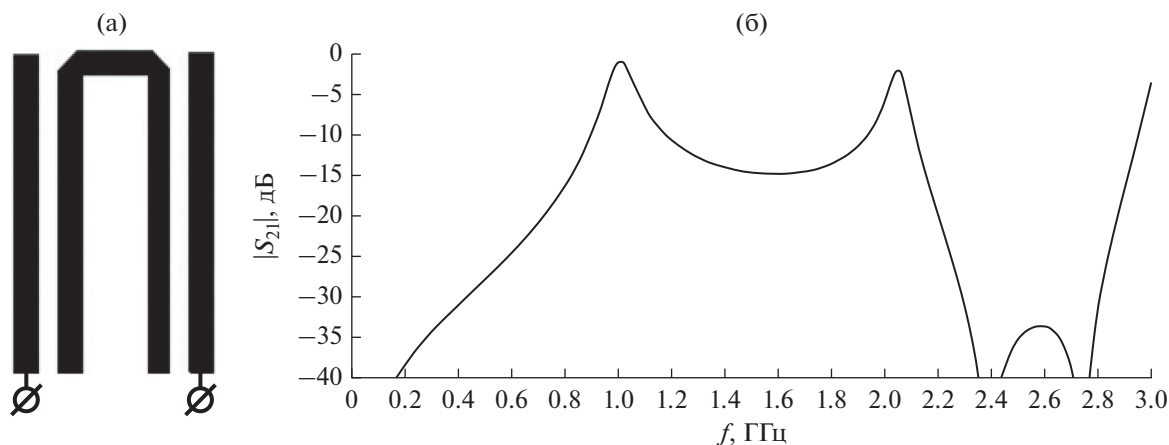


Рис. 1. Однорезонаторная секция со слабой электромагнитной связью между плечами резонатора; а – топология структуры, б – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

МПЛ открывает новые возможности в создании, в частности, сверхширокополосных фильтров с полюсами затухания на конечных частотах [6]. Число формируемых полюсов рабочего затухания в этих компактных восьмипроводных структурах равно пяти. Таким образом, число формируемых полюсов затухания в рассматриваемых структурах МПФ значительно меньше числа четвертьволновых МПЛ, образующих эти структуры.

Новые возможности в создании высокоизбирательных МПФ с существенно ограниченным числом резонаторов открываются за счет применения в их структурах двухрезонаторной секции, в которой непосредственно возможно формирование более шести полюсов рабочего затухания на конечных частотах [8], т.е. в этой четырехпроводной четвертьволновой структуре число полюсов рабочего затухания в три раза превышает количество полуволновых резонаторов $P \geq 3M = 1.5N$. Уникальные селективные свойства этой секции проявляются вследствие совместного рационального использования в ней совокупности волновых особенностей, свойственных системам связанных МПЛ, и схемотехнического приема “рокировки” полюсов затухания.

В данной работе этот подход к повышению частотной избирательности базовых ячеек МПФ развит применительно к четырехпроводной однорезонаторной структуре. Показано, что она также может приобретать свойства многорезонаторных цепей, но при иных условиях, что обусловлено схемотехническими особенностями ее реализации. Таким образом, целью работы является исследование возможности создания высокоизбирательных МПФ на основе одно- и двухрезонаторных структур, т.е. структур с предельно минимальным числом резонаторов.

1. ОДНОРЕЗОНАТОРНАЯ СТРУКТУРА С ПОЛЮСАМИ ЗАТУХАНИЯ НА КОНЕЧНЫХ ЧАСТОТАХ

Будем исследовать особенности механизмов формирования частотных характеристик в микрорезонаторных структурах, постепенно изменяя их топологию так, чтобы положительно проявился тот или иной используемый в структуре эффект. В качестве исходной выберем классическую симметричную двухзвенную структуру на параллельно связанных четвертьволновых МПЛ, в которой сформирован один полуволновый шпилечный резонатор (рис. 1а). Эта структура является базовой ячейкой широко применяемых на практике МПФ на шпилечных резонаторах. Как известно, ширина полосы пропускания этих структур однозначно определяется коэффициентом электромагнитной связи между МПЛ звеньев. Вследствие неравенства фазовых скоростей нормальных волн в связанных МПЛ, обусловленного неоднородностью среды (подложка-воздух), в МПФ этого типа формируются помимо основной полосы пропускания также и паразитные полосы (рис. 1б), что существенно ухудшает частотную избирательность этих структур в области верхних частот. В дальнейшем эта особенность частотной характеристики структуры будет эффективно использована для повышения порядка МПФ. При этом полюсы рабочего затухания, формируемые при фазовом синхронизме волн на второй гармонике, смещаются при неравенстве фазовых скоростей нормальных волн в частотную область между второй и третьей гармониками и расщепляются вследствие электромагнитного взаимодействия между плечами резонатора. Кроме того, электромагнитное взаимодействие между плечами резонатора дополнительно снижает уровень затухания в полосе заграждения (рис. 1б).

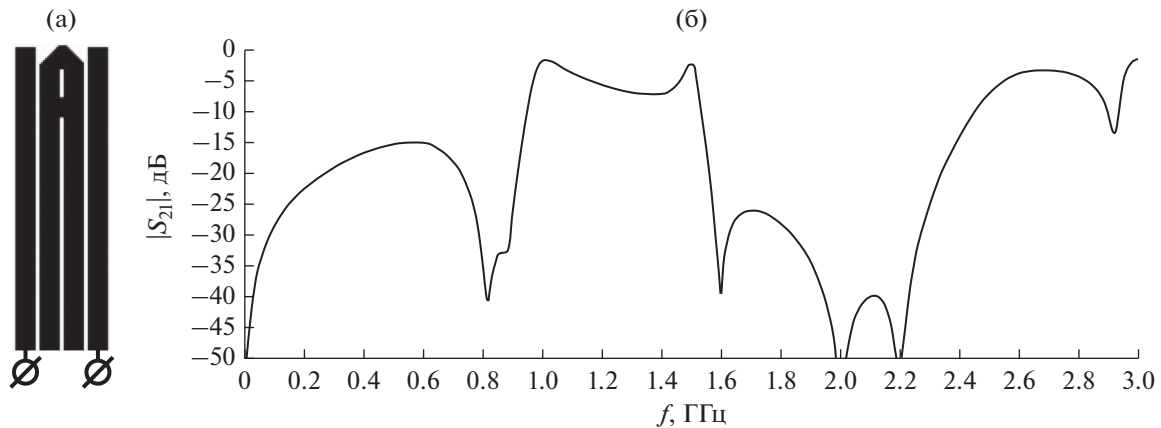


Рис. 2. Однорезонаторная секция с усиленным электромагнитным взаимодействием между плечами полуволнового резонатора; а – топология структуры, б – АЧХ.

Поэтому при синтезе МПФ высокого порядка на основе этих ячеек несанкционированная связь между плечами резонатора уменьшается ценой увеличения габаритов фильтра. Следовательно, рассматриваемая секция при традиционном ее применении обладает низкими селективными возможностями.

Будем преднамеренно усиливать электромагнитное взаимодействие между плечами полуволнового шпилечного резонатора, уменьшая расстояние S между ними до значения, легко реализуемого в рамках любой планарной технологии $S = 0.2$ мм. При этом, как показывают исследования, необходимо выполнить условие доминирующей магнитной связи между четвертьволновыми плечами полуволнового резонатора, реализация которого может быть достигнута, например, введением дополнительной перемычки, что, с учетом распределения плотности тока в связанных МПЛ, эквивалентно по действию усилению магнитной связи (рис. 2а). Изменение краевых условий на концах линий (перемычка) приводит к изменению спектра собственных значений многосвязанной структуры так, что выполняются условия формирования двух полюсов рабочего затухания в области нижних частот и двух дополнительных – в области верхних частот (рис. 2б). При этом, чем сильнее электромагнитное взаимодействие между плечами резонатора (т.е. между смежными МПЛ), тем выше степень расщепления полюсов рабочего затухания. При снижении этого электромагнитного взаимодействия дополнительные полюсы рабочего затухания совмещаются и вырождаются (рис. 1б). Кроме того, введение перемычки между плечами резонатора обуславливает смещение паразитной полосы пропускания к основной, а вместе с ней и полюсов рабочего затухания (рис. 2б), формируемых в области верхних частот.

Следующий этап повышения частотной избирательности структуры заключается в выполнении условия смыкания основной и паразитной полос пропускания, что достигается традиционным способом управления спектром резонансных частот резонаторов – применением нерегулярных отрезков МПЛ. Заметим, что в нашем случае эта задача существенно упрощается, так как основная и паразитная полосы пропускания уже значительно приближены друг к другу (рис. 2б). На рис. 3 представлены результаты численного электродинамического 3D-моделирования этой симметричной четырехпроводной структуры. Для определенности в качестве конструктивного основания использована диэлектрическая подложка толщиной $H = 0.508$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 10.0$ (Arlon AD1000). Расстояние от подложки до экрана составляет 5 мм. Минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ составляют $W = 0.4$ мм и $W = 3.9$ мм соответственно, а минимальное расстояние между ними $S = 0.2$ мм. Площадь подложки, занимаемая структурой МПФ, составляет 36.8×16.3 мм, т.е. $0.04\lambda^2$, где λ – длина квази T -волны на центральной частоте полосы пропускания МПФ. В этой структуре МПФ формируются четыре нуля и четыре полюса рабочего затухания на конечных частотах (рис. 3б). Здесь и далее на рисунках сплошными кривыми представлены частотные зависимости параметра $|S_{21}|$, штриховыми кривыми – $|S_{11}|$. Значительное расщепление полюсов рабочего затухания в области верхних частот с целью увеличения крутизны амплитудно-частотной характеристики МПФ и расширения полосы заграждения может быть достигнуто незначительным усилением электрической связи между смежными МПЛ звеньев путем

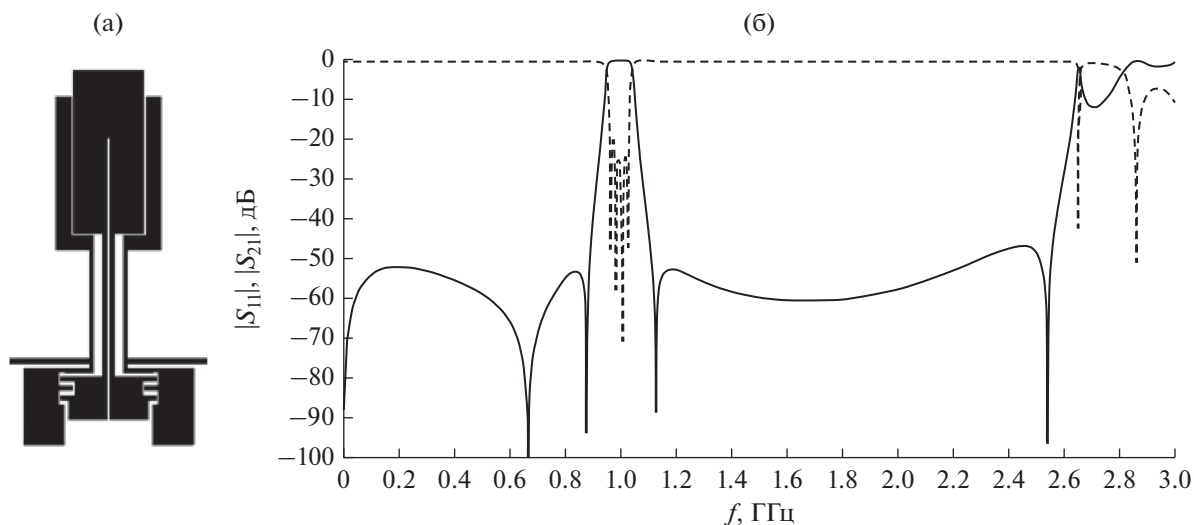


Рис. 3. Однорезонаторная структура МПФ с совмещенными полосами пропускания; а – топология структуры, б – частотные зависимости S -параметров.

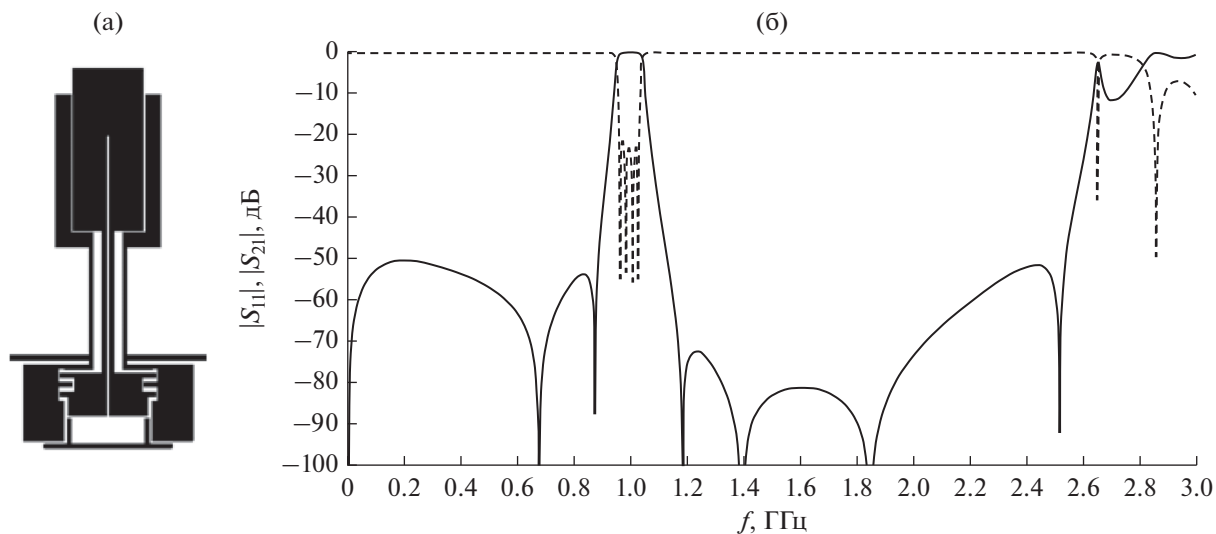


Рис. 4. Однорезонаторный МПФ с расщепленными полюсами затухания; а – топология структуры, б – частотные зависимости S -параметров.

введения “ресничек” на их концах (рис. 3а, нижний участок топологии).

Седловидная форма рабочего затухания в области верхних частот свидетельствует о наличии в этой области дополнительных вырожденных полюсов затухания. Формирование и расщепление этих полюсов достигается известным приемом – организацией параллельного пути передачи энергии между входом и выходом МПФ [9] за счет введения дополнительного отрезка МПЛ, обеспечивающего незначительную электрическую связь между входной и выходной линиями (рис. 4). Вся остальная топология структуры остается без изменений. Заметим, что чрезмерное усиление этой связи при-

водит к совмещению или перемежению вновь образованных полюсов рабочего затухания с уже существующими, что обуславливает их вырождение. Таким образом, в данной структуре МПФ, содержащей четыре связанных МПЛ с определенными краевыми условиями на их концах, формируется вследствие реализации определенной степени неуравновешенности электромагнитных связей на разных участках длины нерегулярных связанных МПЛ четыре нуля и шесть полюсов рабочего затухания на конечных частотах ($P = N + 2$). При этом структура не содержит короткозамкнутых на экран элементов, что определяет ее высокую технологичность. Важно отметить, что рассмотрен-

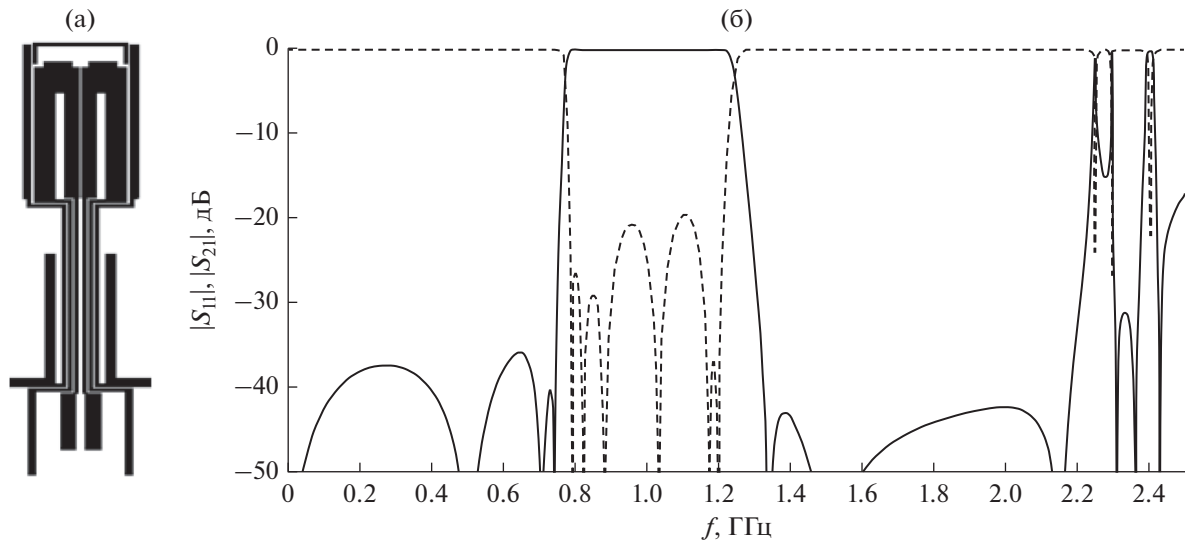


Рис. 5. Двухрезонаторный МПФ с расширенной полосой пропускания; а – топология структуры, б – частотные зависимости S -параметров.

ная однорезонаторная секция, обладающая столь уникальными селективными свойствами, может найти широкое применение в качестве МПФ при решении многих практических задач.

2. МПФ НА ОСНОВЕ ДВУХРЕЗОНАТОРНОЙ СТРУКТУРЫ

Как известно, повышение порядка фильтров традиционно достигается или путем каскадирования их базовых ячеек, или введением распределенного электромагнитного взаимодействия между ними, что обеспечивает более высокую компактность структуры. Дополним рассматриваемую структуру еще одним шпилечным резонатором, в результате чего МПФ будет представлять собой симметричную структуру на двух сонаправленных шпилечных резонаторах (рис. 5а). При оптимизации геометрических параметров структуры важно сохранить положительные свойства однорезонаторной секции, приобретаемые ею за счет совместного рационального использования отмеченных ранее физических эффектов и схемотехнических приемов.

На рис. 5б представлены результаты численного электродинамического 3D-моделирования МПФ с учетом потерь в структуре, выполненной на подложке толщиной $H = 1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9.8$. При этом в “плотно упакованной” структуре МПФ минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ составляют $W = 0.3$ мм и $W = 1.6$ мм соответственно, а минимальное расстояние между ними – $S = 0.15$ мм. Площадь подложки, занимаемая структурой МПФ, составляет 44.9×9.3 мм, т.е. $0.028\lambda^2$.

Как видно из рисунка, введение в структуру еще одного шпилечного резонатора обусловило формирование двух дополнительных нулей и дополнительного полюса рабочего затухания, расположенного вблизи полосы пропускания. При этом слабая дополнительная связь между несмежными МПЛ (верхняя часть топологии) способствует расщеплению полюсов рабочего затухания в области верхних частот. Необходимо отметить, что приобретенное новое качество структуры состоит не столько в том, какое достигнуто число формируемых нулей и полюсов рабочего затухания (что, безусловно, важно), а в том, какая крутизна рабочего затухания реализуется в его переходной области. В данном случае значение коэффициента прямоугольности рабочего затухания, определяемого по уровням минус 3 дБ и минус 35 дБ, составляет 1.3, что не достижимо в известных структурах при таком существенно ограниченном числе резонаторов. Кроме того, с увеличением числа резонаторов возможно значительное расширение полосы пропускания МПФ (рис. 5б) при тех же расстояниях между МПЛ, т.е. при тех же коэффициентах электромагнитной связи между ними. Это открывает новые возможности в решении еще одной проблемы – создания планарных широкополосных высокоизбирательных МПФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлен нереализованный ранее запас потенциальных селективных возможностей базовой ячейки МПФ, которые проявляются вследствие совместного рационального использования в ней совокупности волновых особенностей микрополосковых структур и схемотехнических способов

управления ими, что обуславливает формирование значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах. Это достигается, прежде всего, за счет совместного использования эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах связанных МПЛ, эффекта смыкания основной и паразитной полос пропускания вследствие применения в структуре неоднородных отрезков связанных МПЛ, а также формирования и расщепления полюсов рабочего затухания за счет реализации определенной степени неуравновешенности электромагнитных связей как между смежными, так и несмежными МПЛ на разных участках их длины. При этом однорезонаторная секция приобретает свойства многорезонаторных цепей, так как в ней возможно формирование четырех нулей и шести полюсов рабочего затухания. Приведенные в работе примеры реализации одно- и двухрезонаторных МПФ свидетельствуют о высоких селективных свойствах этих структур, что открывает принципиально новые возможности создания высокоизби-

рательных как узкополосных, так и широкополосных МПФ с минимальным числом резонаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мазепова О.И., Мещанов В.П., Прохорова Н.И.* Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. Фельдштейна А.Л. М.: Связь, 1979.
2. *Аристархов Г.М., Вершинин Ю.П.* // РЭ. 1983. Т. 28. № 9. С. 1714.
3. *Аристархов Г.М., Чернышев В.П.* // РЭ. 1987. Т. 32. № 6. С. 1168.
4. *Петров А.С.* // Зарубеж. радиоэлектрон. 1997. № 6. С. 40.
5. *Lancaster J.M., Hong J.-S.* // IEEE Trans. 1998. V. MTT-46. № 1. P. 118.
6. *Беляев Б.А., Ходенков С.А., Галеев Р.Г., Шабанов В.Ф.* // ДАН. 2015. Т. 461. № 1. С. 27.
7. *Аристархов Г.М., Звездинов Н.В., Чернышев В.П.* // Радиотехника. 2014. № 10. С. 22.
8. *Аристархов Г.М., Звездинов Н.В.* // Антенны. 2016. № 2. С. 76.
9. *Родз Дж. Д.* Теория электрических фильтров. М.: Сов. радио, 1980.