

М.Е. Ильченко, А.П. Живков, А.Т. Орлов

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

ФИЛЬТРЫ НА БАЗЕ РЕЗОНАТОРОВ С БЛИЗКИМИ ПО ЧАСТОТЕ МОДАМИ КАК ЯЧЕЙКИ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Background. Many of the properties of metamaterials are similar to those found in the filter on mutually detuned frequency and unrelated resonators. The bridge filters are used as a low-frequency prototypes of such microwave filters. It is important to establish an analogy between metamaterials and filters on mutually detuned frequency and unrelated resonators for further development and design of new types of metamaterials.

Objective. A central objective is a model development of metamaterials based on band-exclusive microwave filters on mutually detuned resonators, and the low-frequency-based prototypes.

Methods. Characteristic equivalence test of metamaterials to microwave filters on mutually detuned resonators, their specific dependencies reveal (the modes in parallel channels, the locations of the attenuation poles above or below the bandwidth), manifested regardless of the types of resonators, the study of the possibility of the bridge filter prototypes using for metamaterials simulation.

Results. The analogy between metamaterials and microwave filters on mutually detuned resonator is specified, the possibility of bridge bandpass filter use as low-frequency prototypes is shown.

Conclusions. Microwave filters on mutually detuned resonators, and bridge band-pass filters as low-frequency prototypes, design techniques of which are well established, can be used for metamaterial modeling.

Keywords: metamaterials; dielectric resonators; stripline resonators; band-exclusive microwave filters.

Вступлення

В обзор [1] детально рассмотрены различные типы метаматериалов и устройств СВЧ на их основе. В работе [2] рассмотрены полосно-пропускающие фильтры, построенные на базе пар взаимно расстроенных по частоте резонаторов с разными типами колебаний. Схожесть по структуре микрополоскового кольца – единичной ячейки метаматериала, детально рассмотренного в [3], с парами микрополосковых резонаторов, образующих режекторные фильтры [4, 5], позволяет предположить, что подобная ячейка метаматериала аналогична по своим электромагнитным характеристикам паре микрополосковых резонаторов с колебаниями разных типов.

Большое внимание в [1] уделено метаматериалам на основе диэлектрических резонаторов (ДР). Аналогия между ними и обобщенными в [6] исследованиями ДР, в том числе сферическими и кубическими, позволяет говорить о применимости некоторых моделей фильтров на основе ДР [2] к метаматериалам.

Важно отметить, что кварцевые резонаторы и фильтры на их основе, также как и структуры, рассмотренные в [2], моделируются мостовыми фильтрами-прототипами [7, 8]. Поэтому вполне вероятно, что на их основе также можно будет создавать метаматериалы для более низких диапазонов частот.

Постановка задачи

Необходимо провести анализ фильтров с парами резонаторов с разными типами колебаний, не связанных между собой и расстроенных в общем случае по частоте, и пьезоэлектрических фильтров [2, 4–9], а также обосновать возможности:

- 1) использования их и их аналогов для построения метаматериалов;
- 2) использования моделей низкочастотных мостовых фильтров для анализа метаматериалов и устройств на их основе.

Результаты исследований

Полосковые резонаторы и фильтры. Обращает на себя внимание сходство полосковых структур, используемых в метаматериалах (рис. 1) [3], со структурами режекторных полосковых фильтров (рис. 2), описанных в [4, 5].

Фильтр на рис. 2, *a* образован резонаторами, длины которых при $n = 1$ кратны $n\lambda/2$ и $(n+1)\lambda/2$ (λ – длина волны на резонансной частоте фильтра), – соответственно “полуволновым” и “волновым” резонаторами, резонаторы фильтра на рис. 2, *b* – “полуволновой” и “волновой” (понятно, что они также могут иметь кратность n и $(n + 1)$).

Между тем, в [9] показано, что резонансные частоты этих резонаторов могут и не сов-

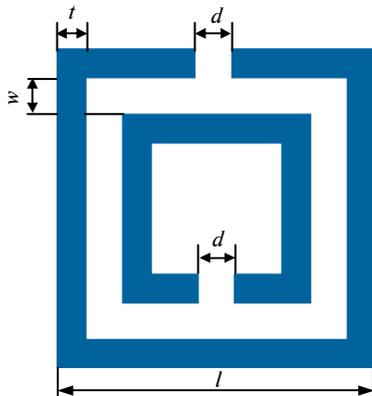


Рис. 1. Типичная ячейка метаматериала с размерами: $l = 3$ мм, $d = t = w = 0,3$ мм

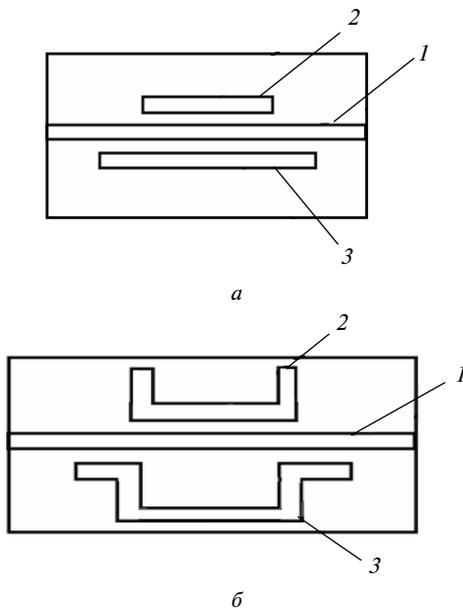
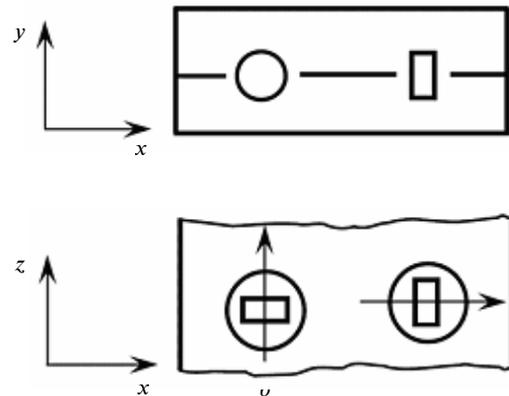


Рис. 2. Режекторные СВЧ-фильтры: *a* – описан в [4], *б* – описан в [5]; 1 – полосковая линия; 2 – полуволновой резонатор; 3 – волновой резонатор

падать, а быть близки к центральной частоте фильтра (это зависит от коэффициентов связи резонаторов с линией передачи). Если сравнить длины резонаторов на рис. 1 (для корректности – по линиям, проходящим посреди резонаторов), то получим следующий результат: длина меньшего (“внутреннего”) резонатора – 5,7 мм, а большего (“внешнего”) – 11,1 мм. Получается, что эти два резонатора (с учетом сказанного в [9] и погрешности, вносимой емкостной связью между ними) можно также считать “полуволновым” и “волновым”, а потому к ним применимы те же модели, что и к фильтрам [4, 5].

В статьях [2, 9] рассмотрен 8-полюсник (рис. 3) и получены результаты (формулы для

расчетов) для коэффициентов передачи диплексера, направленного ответвителя, полосового и режекторного фильтров, применимые, как указывается в упомянутых работах, к разным типам резонаторов (диэлектрическим, микро-



полосковым, волноводно-щелевым и т.д.).

Рис. 3. 8-полюсник, образованный двумя соединенными по широкой стенке прямоугольными волноводами. В отверстиях, выполненных в стенке между волноводами, расположены диэлектрические резонаторы: *a* – вид с торца, *б* – вид сверху

Комплексные амплитуды полей, переизлучаемых резонаторами в двух волноводах (рис. 3) в различных направлениях, рассчитываются исходя из соотношения

$$C_i^{\pm} = j\omega m h_i^{\pm} / 2, \quad (1)$$

где m – магнитный момент, обусловленный возбуждением соответствующего ДР, ω – круговая частота СВЧ-поля. В [2] показано, что

$$C_1^+ = K_{x1} / (1 + K_{x1} + K_{x2}) + K_{z1} / (1 + K_{z1} - K_{z2}); \quad (2)$$

$$C_1^- = K_{z1} / (1 + K_{z1} + K_{z2}) - K_{x1} / (1 + K_{x1} + K_{x2}); \quad (3)$$

$$C_2^+ = \sqrt{[K_{x1} K_{x2}]} / (1 + K_{x1} + K_{x2}) + \sqrt{[K_{z1} K_{z2}]} / (1 + K_{z1} + K_{z2}); \quad (4)$$

$$C_2^- = \sqrt{[K_{z1} K_{z2}]} / (1 + K_{z1} + K_{z2}) - \sqrt{[K_{x1} K_{x2}]} / (1 + K_{x1} + K_{x2}), \quad (5)$$

где $K_{qi} = j\omega M_q h_{qi}^{\pm} h_{qi}^{\mp} / 2$, M_q – параметр, определяемый типом колебаний ДР. Зная комплексные амплитуды полей излучения резонато-

ров (2)–(4), определяем коэффициенты прохождения и отражения в виде

$$T_{12} = 1 + C_1^+; T_{13} = C_2^+; T_{14} = C_2^-; \Gamma_{11} = C_1^- \quad (6)$$

Зависимости, получаемые с помощью формул (1)–(6) при разных коэффициентах связи резонаторов с линиями передачи и частотах резонаторов практически такие же, как, например, приведенные в обзоре [1] на рис. 19, 22 или 32 для полоскового режекторного фильтра [1] или волноводного режекторного фильтра на рис. 4 [10].

Как отмечено в [2], для фильтров на связанных резонаторах в качестве низкочастотных прототипов используются лестничные схемы, а для фильтров на взаимно расстроенных резонаторах – мостовые схемы замещения (рис. 5) [11, 12]. Причины тому следующие:

- как в мостовых фильтрах-прототипах, так и в фильтрах на взаимно расстроенных резонаторах передача энергии осуществляется по двум независимым каналам;
- резонаторы в мостовых фильтрах-прототипах (для полосковых фильтров) также рас-

строены по частоте, иначе сигналы в нагрузке “вычтутся” (то есть будут равны по амплитуде и противоположны по фазе), компенсируют друг друга, то есть никакой передачи сигнала с входа на выход не будет;

- при определенном соотношении реактивностей в плечах фильтров (как и при правильном выборе порядка чередования (следования) “магнитных” и “электрических” колебаний в фильтрах со взаимно расстроенными резонаторами) возможна реализация “полюсов затухания” [2], в противном случае “полюсов затухания” не будет.

- наконец, самое важное – мостовые фильтры относятся к так называемым *неминимальнофазовым* [13], для которых совершенно нормальной является ситуация, изложенная в [1] со следующей формулировкой: “отрицательность фазовой скорости означает, что при распространении волны набег фаз происходит в направлении от приемника к источнику, в то время как перенос энергии очевидным образом происходит от источника к приемнику”.

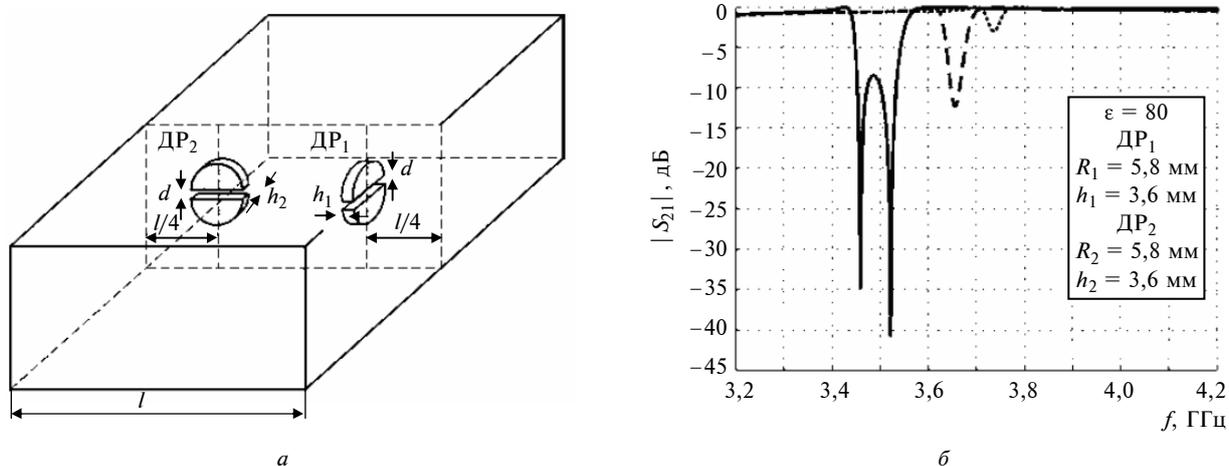


Рис. 4. Расположение ДР в точках круговой поляризации прямоугольного волновода (а) и зависимость $|S_{12}|$ фильтра на ДР с равными размерами от частоты (б): — — — $d = 0$ мкм; - - - $d = 10$ мкм; $d = 20$ мкм

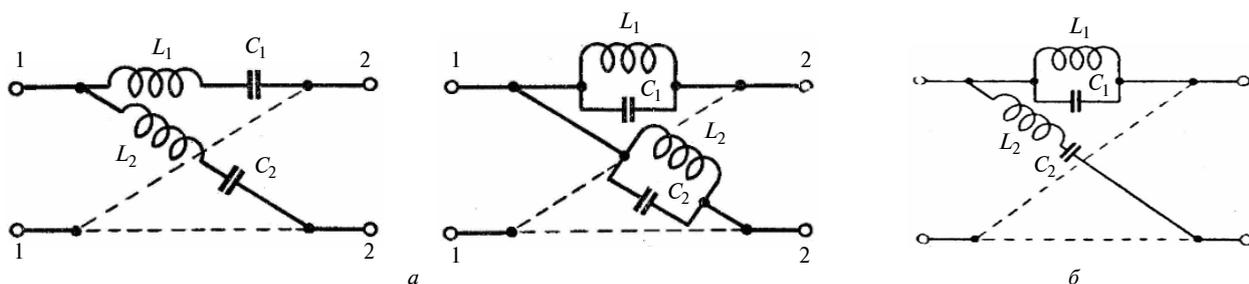


Рис 5. Мостовые схемы замещения: а – полосковых фильтров, б – режекторного фильтра

• В [11] утверждается, что “характеристическое сопротивление зависит только от количества и распределения резонансных частот в полосе не пропускания и частот среза, в то время как постоянная передачи, т.е. затухание и фазовый сдвиг зависят только от количества и распределения резонансных частот в полосе пропускания и частот среза”.

Важно отметить следующее: в ряде случаев, когда резонансные частоты фильтров в разных плечах далеки друг от друга, на резонансной частоте колебательного контура одного плеча второй колебательный контур ведет себя как емкость или индуктивность (резонаторы даже при отстройке от их собственной резонансной частоты вносят некую реактивность в линию передачи), и это превращает схемы замещения мостовых полосовых фильтров в схемы замещения фильтров нижних или верхних частот. Это ответ на вопрос: “Почему физически состоящие из двух резонаторов схемы описываются низкочастотными прототипами с четырьмя резонаторами?”

Сказанное свидетельствует о глубокой аналогии между мостовыми фильтрами, фильтрами СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах (колебаниях) и резонаторами (колебаниями), используемыми в метаматериалах. Важно отметить, что под колебаниями здесь имеются в виду колебания разного типа, возбуждаемые на близких частотах в одном и том же резонаторе. Это типично, например, для ДР, в том числе сферической и кубической формы.

Рассматриваемые фильтры на колебаниях, возбуждаемых в расстроенных по частоте и не связанных между собой резонаторах, могут быть построены на СВЧ-резонаторах самых разных типов – микрополосковых, диэлектрических, волноводно-щелевых [2].

Как только что отмечалось, отдельными, специфическими базовыми ячейками для создания новых типов метаматериалов могут послужить двухмодовые резонаторы кубической и сферической формы [1, 6]. Особо интересным представляется вариант размещения таких резонаторов в области круговой поляризации электромагнитного поля [14–16]. Рассмотрим одну из возможных моделей поведения такого резонатора, помещенного в область круговой поляризации прямоугольного волновода. ДР в виде сферы или куба в области круговой поляризации (рис. 6) возбуждается ортогональными полями H_x и H_z (сдвинутыми на 90° во времени), и в нем возбуждаются ортогональные ко-

лебания (сдвинутые на 90° в пространстве), поэтому общий сдвиг фаз между генерируемыми в направлении распространения электромагнитной волны колебаниями составляет 180° . Следовательно, в этом направлении в волноводе возбуждаемые колебания будут противофазны, и при соответствующей подстройке их фаз и амплитуд (это может быть достигнуто небольшим смещением резонатора из области круговой в область эллиптической поляризации или смещением половинок резонатора относительно друг друга [16]) может быть обеспечено [9] полное затухание (режекция) сигнала. Сказанное может быть концептуально объяснено мостовой схемой-прототипом (рис. 5, б) такого фильтра.

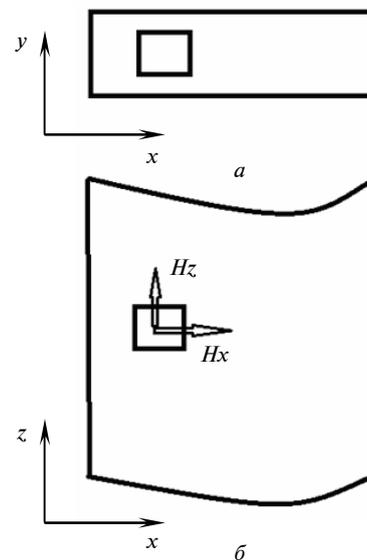


Рис. 6. ДР кубической формы в области круговой поляризации: а – вид с торца; б – вид сверху

В микрополосковом [15] (рис. 7) аналоге такого фильтра подстройка по частоте и амплитуде возбуждаемых ортогональных колебаний может быть реализована также небольшим смещением резонатора или коррекцией длины шлейфа.

Колебания, возбуждаемые в резонаторах, так или иначе связанных с метаматериалами, часто называют по-разному: четными и нечетными (в случае связанных колебаний), магнитными и электрическими (по аналогии с электрическим и магнитным диполями, при возбуждении “электрических” или “магнитных” мод в резонаторах (см. рис. 3)), синфазными и противофазными (для колебаний резонаторов, представленных на рис. 1, 2). На рис. 8 пред-

ставлены диаграммы направленности (ДН) электрического и магнитного диполей и их суммарная ДН в виде кардиоиды, что может быть хорошей моделью для пояснения поведения отдельных “ячеек” метаматериалов,

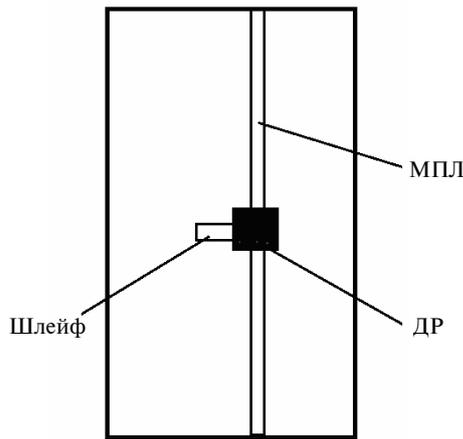


Рис. 7. Диэлектрический резонатор в области искусственно созданной круговой поляризации микрополосковой линии (МПЛ) передачи

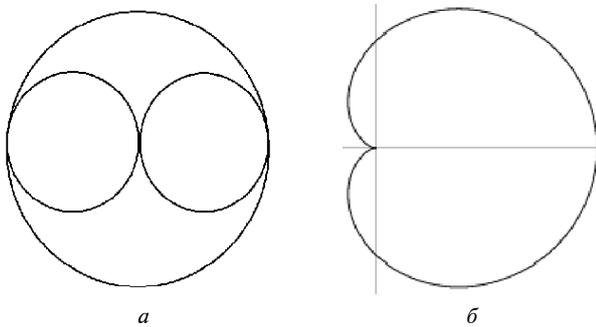


Рис. 8. Диаграммы направленности (ДН): *a* – электрического (круговая) и магнитного (“восьмерка”) диполей, *б* – суммарная ДН двух диполей в виде кардиоиды

К таким ячейкам, помимо рассмотренных выше, можно отнести также и ДР цилиндрической формы с размерами, при которых в них возбуждаются колебания разных типов с близкими частотами [17–19].

В [1] отмечается, что так называемые композитные линии передачи обладают свойствами метаматериалов и на их основе могут быть созданы, в частности, направленные ответвители. Поскольку в нашей статье речь идет в том числе и о метаматериалах на базе ДР с различными (электрическими и магнитными) типами колебаний, отметим лишь, что на основе таких ДР были предложены конструкции направленного фильтра и СВЧ-диплексера соответственно [20, 21].

Метаматериалы и пьезоэлектрические фильтры

Мостовые схемы являются наиболее используемыми для реализации пьезоэлектрических фильтров [11]. Это справедливо как для низкочастотного диапазона (кварцевые и пьезокерамические фильтры), так и для фильтров ВЧ и СВЧ (фильтры на тонкопленочных пьезоэлектрических резонаторах, англ. FBAR – Film Bulk Acoustic Resonators) [7, 8]. Кроме того, монокристаллические пьезоэлектрические фильтры ВЧ, основанные на эффекте “захвата акустической энергии”, и трансверсальные фильтры на ПАВ (на ПАВ-резонаторах с т.н. поперечной акустической связью) являются неминимальнофазовыми четырехполюсниками и описываются мостовыми эквивалентными схемами замещения. Современные широкополосные фильтры на ПАВ с малым вносимым затуханием также строятся на основе мостового соединения отдельных двухполюсных ПАВ-резонаторов. Это связано с тем, что максимально достижимая относительная ширина полосы пропускания пьезоэлектрических фильтров достаточно мала и ограничена коэффициентом электромеханической связи пьезоматериала резонаторов, квадрат которого определяет долю механической энергии, которая может быть преобразована в электрическую и обратно. Для резонаторов объемных акустических волн справедливо

$$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{33}^D \epsilon_{33}^S}, \quad (7)$$

где e_{33}^2 – пьезоэлектрическая постоянная, c_{33}^D – упругая деформация при постоянном электрическом поле, ϵ_{33}^S – “зажатая” диэлектрическая проницаемость. Эффективность энергетического преобразования обычно лежит в пределах $0 \leq k_t^2 < 1$. Для пьезокерамик на основе ЦТС (цирконат-титанат свинца) эта величина составляет 8,0–19,8 %, для тонких пленок AlN – 6,5–6,7 %, 5–6% для танталата лития и 0,01–0,016 % для кварца. Для ПАВ-резонаторов по сравнению с резонаторами ОАВ эта величина меньше.

Мостовые схемы позволяют получать в разы более широкую полосу пропускания и синтезировать амплитудно-частотную характеристику фильтра независимо от фазочастотной (последнее является общим свойством неми-

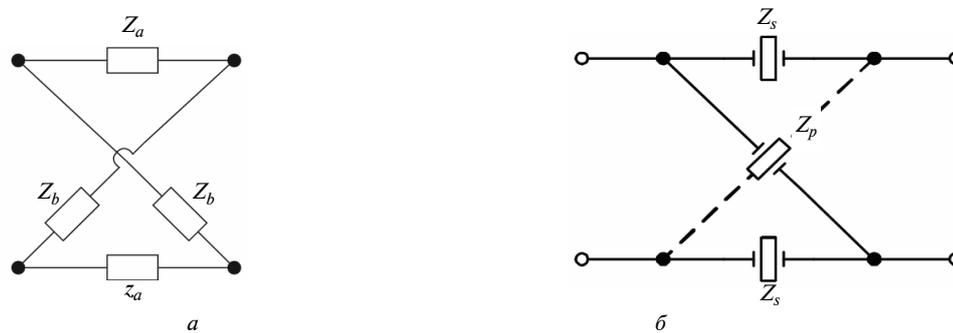


Рис. 9. Мостовая схема пьезоэлектрического фильтра: *a* – с обобщенными двухполюсниками; *б* – с пьезоэлектрическим резонатором в плечах

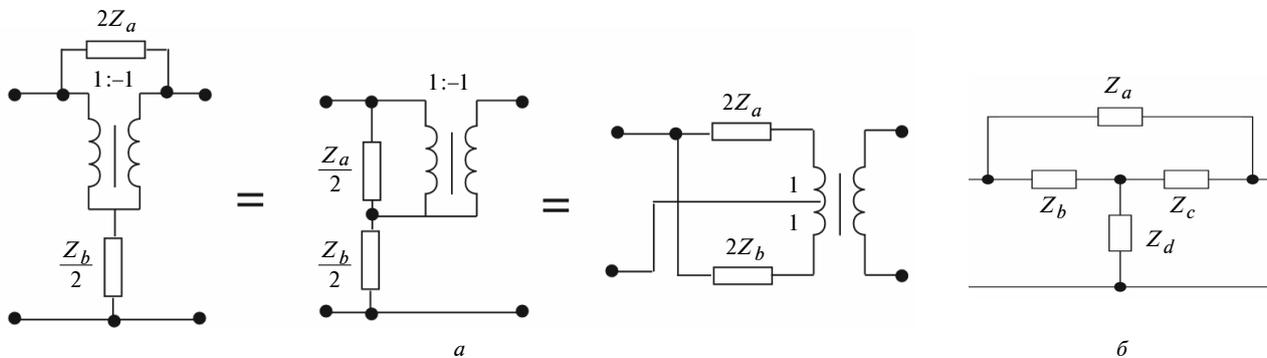


Рис. 10. Эквивалентные преобразования мостовой схемы: *a* – дифференциально-мостовая схема, *б* – перекрытый Т-мост

нимальнофазовых цепей). Мостовые пьезоэлектрические фильтры в интегральном исполнении (на ПАВ- и FBAR-резонаторах) реализуются в виде стандартного симметричного моста Уинстона, имеющего уравновешенные вход и выход (рис. 9, *a*), в этом случае Z_a и Z_b – взаимно расстроенные пьезоэлектрические резонаторы Z_s и Z_p (рис. 9, *б*).

Пьезоэлектрические фильтры на дискретных резонаторах чаще реализуются в виде перекрытых мостовых неуравновешенных схем, что позволяет уменьшить в два раза количество пьезорезонаторов. При этом дифференциально-мостовая (полумостовая) схема может быть реализована с использованием дифференциального трансформатора (рис. 10, *a*) либо дифференциального усилителя [11].

В общем случае перекрытые мостовые схемы могут быть представлены лестничными схемами со связями “через резонатор” (рис. 10, *б*). По аналогии 3D-метаматериал может быть представлен обобщенной мостовой многополюсной схемой с множественными связями между резонаторами (не только смежными) и описываться уравнениями обобщенных неминимальнофазовых многополюсников.

Выводы

Рассмотренные в работе разнообразные типы полосно-пропускающих и режекторных фильтров на взаимно расстроенных по частоте (не связанных между собой) резонаторах могут быть основой для создания различных вариантов метаматериалов и устройств на их основе. Оптимальной моделью для инженерного (с точки зрения схемотехники) анализа подобных устройств являются хорошо изученные низкочастотные прототипы – мостовые фильтры. Представление расположенных параллельно по отношению к прохождению электромагнитной волны резонаторов как “электрического” и “магнитного” диполей (излучателей) позволяет распространить предлагаемую методику анализа и проектирования фильтров на частоты вплоть до оптических.

Поскольку в работе установлено, что фильтры на базе резонаторов с близкими по частоте модами могут рассматриваться как ячейки метаматериалов, в дальнейшем предполагается изучить свойства метаматериалов с точки зрения резонансных колебательных систем (мод колебаний).

Список літератури

1. Вендик О.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журнал технической физики . – 2013. – 83, вып 1. – С. 3–27.
2. Ильченко М.Е., Живков А.П. Обобщенный подход к анализу и проектированию полосовых фильтров СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2015. – № 5 (103). – С. 7–14.
3. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике // Первая миля. – 2010. – № 3-4. – С. 44–60.
4. Режекторный СВЧ фильтр: А.с. 1529321 СССР, МКИ Н 01 Р1/20 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков, А.Г. Витюк. – Оpubл. 15.12.89, Бюл. № 46
5. Режекторный СВЧ фильтр: А.с. 1739408 СССР, МКИ Н 01 Р 1/203 / А.П. Живков, А.Г. Витюк, А.Г. Войтенко и др. – Оpubл. 07.06.92, Бюл. № 21.
6. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев, Л.Г. Гассанов и др.; под ред. М.Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
7. Orlov A.T. Thin film bulk wave acoustic resonators (FBAR) based filters // Proc. 14th Int. Conf. CriMico 2004, Sept. 13–17, 2004. – Crimea, 2004. – P. 424. Doi: 10.1109/CRMICO.2004.1832719.
8. Zazerin A.I., Orlov A.T., Bogdan O.V. Modified operational transconductance amplifier macromodel application in piezoelectric active filter design // Proc. 34th Int. Sci. Conf. ELNANO, April 15–18, 2014, Kyiv. – Kyiv, 2014. – P. 373–377.
9. Ильченко М.Е., Живков А.П. СВЧ устройства с использованием нескольких типов колебаний диэлектрических резонаторов // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. – 1989. – 32, № 5. – С. 56–59.
10. Працюк Б.Б., Прокопенко Ю.В., Поплавко Ю.М. Метод компенсации расстройки перестраивающегося фильтра на диэлектрических резонаторах // Электроника и связь. Тем. вып. Электроника и нанотехнологии. – 2009. – Ч. 2. – С. 19–22.
11. Босый Н.Д. Электрические фильтры. – К.: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1959.
12. Современная теория фильтров и их проектирование / Под. ред. Т. Темеша и С. Митра. – М.: Мир, 1977. – 560 с.
13. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
14. Сверхвысокочастотный фильтр: А.с. 1518836 СССР, МКИ Н 01 Р1/20 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков, Г.Н. Шеламов. – Оpubл. 30.10.89, Бюл. № 40.
15. Микрополосковый режекторный фильтр: А.с. 1513543 СССР, МКИ Н 01 Р1/20 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков, М.В. Неиленко. – Оpubл. 07.10.89, Бюл. № 37.
16. Працюк Б.Б., Прокопенко Ю.В. Перестройка диэлектрических резонаторов с вырожденными колебаниями // Электроника и связь. Тем. вып. Проблемы электроники. – 2008. – Ч. 1. – С. 44–47.
17. Резонансный диэлектрический излучатель СВЧ: А.с. 1429202 СССР, МКИ Н 01 Q15/24 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков, М.А. Старков. – Оpubл. 07.10.88, Бюл. № 37.
18. Резонансный диэлектрический излучатель СВЧ: А.с. 1538204 СССР, МКИ Н 01 Q15/24 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков, М.А. Старков. – Оpubл. 23.01.90, Бюл. № 3.
19. СВЧ фильтр: А.с. 1739408 СССР, МКИ Н 01 Р1/203 / А.П. Живков, М.А. Старков. – Оpubл. 30.09.90, Бюл. № 36.
20. Направленный фильтр: А.с. 1343469 СССР, МКИ Н 01 Р1/213 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков. – Оpubл. 7.10.87, Бюл. № 37.
21. СВЧ диплексер: А.с. 1578776 СССР, МКИ Н 01 Р1/213 / М.Е. Ильченко, А.П. Живков. – Оpubл. 15.07.90, Бюл. № 26.

References

1. O.B. Vendik and O.G. Vendik, “Metamaterials and their applications in microwave engineering (review)”, *Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki*, vol. 83, no. 1, pp. 3–27, 2013 (in Russian).
2. M.E. Ilchenko and A.P. Zhivkov, “Generalized approach to the analysis and design of microwave bandpass mutually detuned resonator filters”, *Naukovi Visti NTUU “KPI”*, vol. 103, no. 5, pp. 7–14, 2015 (in Russian).
3. V. Sliusar, “Metamaterials in antenna technology”, *Pervaja Milja*, no. 3-4, pp. 44–60, 2010 (in Russian).
4. M.E. Ilchenko *et al.*, “Band-exclusive microwave filter”, USSR Inventor’s Certificate 1529321, Dec. 15, 1989 (in Russian).
5. A.P. Zhivkov *et al.*, “Band-exclusive microwave filter”, USSR Inventor’s Certificate 1739408, Dec. 5, 1989 (in Russian).
6. M.E. Ilchenko *et al.*, *The Dielectric Resonators*. Moscow, USSR: Radio i Svjaz', 1989 (in Russian).
7. A.T. Orlov, “Thin film bulk wave acoustic resonators (FBAR) based filters”, in *Proc. 14th Int. Conf. CriMico 2004*, Sept. 13–17, 2004, Crimea, Ukraine, p. 424. Doi: 10.1109/CRMICO.2004.1832719
8. A.I. Zazerin *et al.*, “Modified operational transconductance amplifier macromodel application in piezoelectric active filter design”, in *Proc. 34th Int. Sci. Conf. ELNANO*, Kyiv, Ukraine, April 15–18, 2014, pp. 373–377.

9. M.E. Ilchenko and A.P. Zhivkov, "Microwave device with multiple modes of dielectric resonators", *Izvestija Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Radioelektronika*, vol. 32, no. 5, pp. 56–59, 1989 (in Russian).
10. B.B. Pratsiuk *et al.*, "Compensation method of tunable filter detuning with dielectric resonators", *Elektronika i Svjaz. Spec. is. Elektronika i Nanotehnologii*, no. 2, pp. 19–22, 2009 (in Russian).
11. N.D. Bosyj, *Electric Filters*. Kyiv, USSR: Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Tehnicheskoj Literatury, 1959 (in Russian).
12. G.C. Temes and S.K. Mitra, *Modern Filters Theory and Their Design*. Moscow, USSR: Mir, 1977 (in Russian).
13. L.A. Bessonov, *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuits*. Moscow, USSR: Vysshaja Shkola, 1996 (in Russian).
14. M.E. Ilchenko *et al.*, "Microwave filter", USSR Inventor's Certificate 1518836, June 1, 1989 (in Russian).
15. M.E. Ilchenko *et al.*, "Band-exclusive microwave filter", USSR Inventor's Certificate 1513543, June 8, 1989 (in Russian).
16. B.B. Protsiuk and Y.V. Prokopenko, "Restructuring of dielectric resonators with singular oscillations", *Jelektronika i Svjaz. Spec. is. Problemy Jelektroniki*, no. 1, pp. 44–47, 2008 (in Russian).
17. M.E. Ilchenko *et al.*, "The resonant dielectric microwave emitter", USSR Inventor's Certificate 1429202, April 6, 1987 (in Russian).
18. M.E. Ilchenko *et al.*, "The resonant dielectric microwave emitter", USSR Inventor's Certificate 1538204, Sept. 15, 1989 (in Russian).
19. A.P. Zhivkov *et al.*, "Microwave filter", USSR Inventor's Certificate 1596408, June 1, 1990 (in Russian).
20. M.E. Ilchenko *et al.*, "Directed filter", USSR Inventor's Certificate 1343469, June 8, 1987 (in Russian).
21. M.E. Ilchenko *et al.*, "Directed filter", USSR Inventor's Certificate 1578776, March 14, 1990 (in Russian).

М.Ю. Ильченко, О.П. Живков, А.Т. Орлов

ФИЛЬТРЫ НА БАЗЕ РЕЗОНАТОРОВ С БЛИЗКИМИ ЗА ЧАСТОТОЮ МОДАМИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Проблематика. Багато властивостей метаматеріалів подібні до тих, які мають фільтри на взаємно розстроєних за частотою і не пов'язаних між собою резонаторах. Як низькочастотні прототиби таких мікрохвильових фільтрів використовуються мостові фільтри. Для подальшої розробки і проектування нових типів метаматеріалів необхідно встановити аналогію між метаматеріалами і фільтрами на взаємно розстроєних за частотою і не пов'язаних між собою резонаторах.

Мета досліджень. Створення моделей метаматеріалів на основі режекторних фільтрів НВЧ на взаємно розстроєних резонаторах, а також на базі низькочастотних прототипів.

Методика реалізації. Перевірка еквівалентності характеристик метаматеріалів фільтрам СВЧ на взаємно розстроєних резонаторах; виявлення притаманних їм закономірностей (типів коливальних, розміщення полюсів загасання вище або нижче смуги пропускання), що проявляються незалежно від використовуваних типів резонаторів; вивчення можливості використання мостових фільтрів-прототипів для моделювання метаматеріалів.

Результати досліджень. Встановлено аналогію між метаматеріалами і фільтрами НВЧ на взаємно розстроєних резонаторах, показано можливість використання як низькочастотних прототипів мостових смужкових фільтрів.

Висновки. Для моделювання метаматеріалів можуть бути використані фільтри НВЧ на взаємно розстроєних резонаторах, а як низькочастотні прототиби – мостові смужкові фільтри, методики проектування яких добре опрацьовані

Ключові слова: метаматеріали; діелектричні резонатори; смужкові резонатори; режекторні фільтри НВЧ.

М.Е. Ильченко, А.П. Живков, А.Т. Орлов

ФИЛЬТРЫ НА БАЗЕ РЕЗОНАТОРОВ С БЛИЗКИМИ ПО ЧАСТОТЕ МОДАМИ КАК ЯЧЕЙКИ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Проблематика. Многие свойства метаматериалов похожи на те, что имеются у фильтров на взаимно расстроенных по частоте и не связанных между собой резонаторах. В качестве низкочастотных прототипов подобных микроволновых фильтров используются мостовые фильтры. Для дальнейшей разработки и проектирования новых типов метаматериалов необходимо установить аналогю между метаматериалами и фильтрами на взаимно расстроенных по частоте и не связанных между собой резонаторах.

Цель исследований. Создание моделей метаматериалов на основе режекторных фильтров СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах, а также на базе низкочастотных прототипов.

Методика реализации. Проверка эквивалентности характеристик метаматериалов фильтрам СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах; выявление присущих им закономерностей (типов колебаний в параллельных каналах, расположения полюсов затухания выше или ниже полосы пропускания), проявляющихся независимо от используемых типов резонаторов; изучение возможности использования мостовых фильтров-прототипов для моделирования метаматериалов.

Результаты исследований. Установлена аналогия между метаматериалами и фильтрами СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах, показана возможность использования в качестве низкочастотных прототипов мостовых полосовых фильтров.

Выводы. Для моделирования метаматериалов могут быть использованы фильтры СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах, а в качестве низкочастотных прототипов – мостовые полосовые фильтры, методики проектирования которых хорошо проработаны.

Ключевые слова: метаматериалы; диэлектрические резонаторы; полосковые резонаторы; режекторные фильтры СВЧ.