

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

ЭЛЕМЕНТЫ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ ПЕРЕСТРОЙКИ  
РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

© 2017 г. Ю. Н. Казанцев\*, Г. А. Крафтмахер, В. П. Мальцев, И. П. Никитин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

\*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.2016 г.

Предложен метод расширения диапазона перестройки резонансной частоты элементов полосно-отражающих частотно-селективных поверхностей (ЧСП), управляемых варакторами, путем увеличения собственной емкости этих элементов. Рассчитаны частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения для ЧСП с двумя типами управляемых элементов с увеличенной собственной емкостью – модифицированными петлями и модифицированными диполями. Изготовлены образцы элементов, управляемые варакторами типа BB857 (Infineon), и измерены волноводным методом диапазоны перестройки резонансных частот. Максимальные относительные диапазоны перестройки составили 23 и 37% для модифицированных петель и диполей, соответственно, что существенно больше диапазонов перестройки обычных петель и диполей.

DOI: 10.7868/S0033849417110067

ВВЕДЕНИЕ

За последние 10–15 лет опубликован ряд работ, посвященных применению управляемых полосно-пропускающих и полосно-отражающих ЧСП и их элементов в различных СВЧ-устройствах: частотных фильтрах [1–3], антенных системах [4–6], радиопоглопителях [7, 8], невзаимных устройствах [9, 10] и т.п. Управление частотными полосами отражения (пропускания) ЧСП обычно осуществляется путем перестройки резонансных частот элементов ЧСП с помощью электрически управляемых емкостей-варакторов. В полосно-отражающих ЧСП, представляющих собой бипериодические решетки из электропроводящих элементов, варакторы включаются либо в разрывы проводников, образующих элементы [11–14], либо между соседними элементами [15, 16]. В полосно-пропускающих ЧСП, представляющих собой решетки из щелей и отверстий в металлическом экране, варакторы включаются между краями щелей [2, 4, 5, 17, 18]. Одной из основных характеристик управления полосами отражения и пропускания ЧСП является ширина диапазона перестройки резонансной частоты элемента ЧСП. Эта ширина зависит как от формы и размеров элемента ЧСП, так и от характеристик и мест включения варакторов. Представляют интерес элементы, используемые при создании сред с микроволновым искусственным магнетизмом [19, 20] и “левых” сред [21, 22]. Типовыми элементами в полосно-отражающих ЧСП являются электропроводящие ли-

нейные диполи, кресты и петли круглой или прямоугольной формы, а в полосно-пропускающих ЧСП – их щелевые аналоги.

В полосно-отражающих ЧСП при включении варактора в разрыв проводника, образующего элемент ЧСП, резонансная частота несколько увеличивается по сравнению с резонансной частотой при замкнутом накоротко разрыве. При этом размеры элементов ЧСП и период решетки сравнимы с половиной длины резонансной волны, а диапазон перестройки относительно невелик. Так, в работах [11, 12] показано, что при включении варакторов в два симметричных разрыва квадратной петли, являющейся элементом ЧСП, относительная величина перестройки составляет 6%. Включение в разрывы проводника не одного, а двух-трех последовательно соединенных варакторов, позволило увеличить перестройку до 20% [13].

В работе [14] было показано, что более широкий диапазон перестройки резонансной частоты достигается при большей собственной емкости элемента ЧСП и меньшей минимальной емкости варактора.

В полосно-отражающих ЧСП при включении варактора между элементами резонансная частота ЧСП сильно уменьшается, так что размеры элементов оказываются малыми по сравнению с резонансной длиной волны. Такие перестраиваемые структуры были рассмотрены в работах [16] (варакторы включены между концами крестооб-

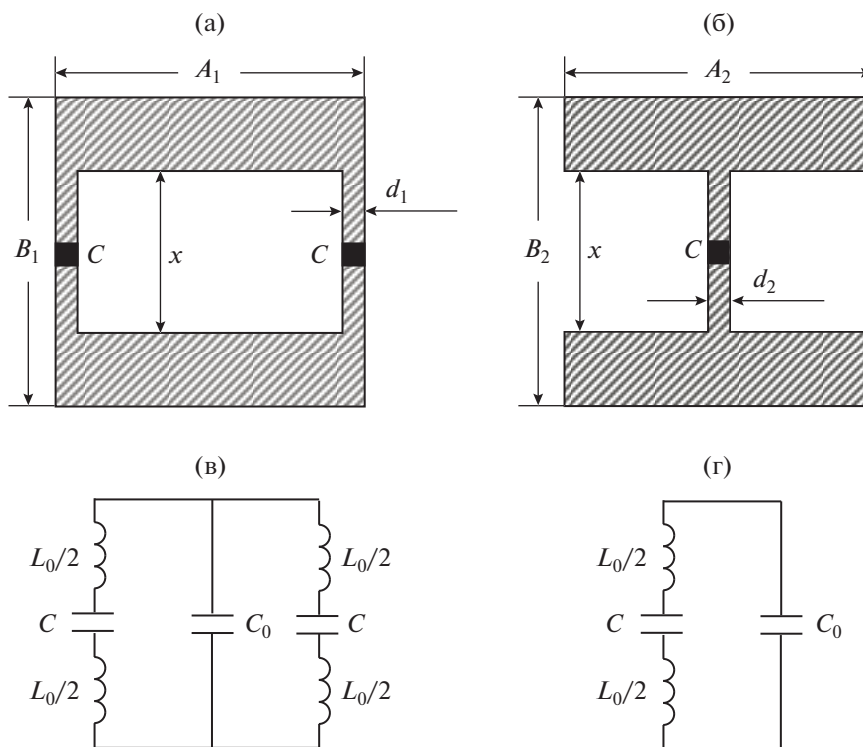


Рис. 1. Элементы полосно-отражающих ЧСП: модифицированная петля (а), модифицированный диполь (б) и их эквивалентные схемы (в, г) соответственно.

разных элементов) и [15] (варакторы включены между прямоугольными петлями). Относительная величина перестройки составила 15%.

Таким образом, согласно результатам цитируемых выше работ величина перестройки резонансной частоты ЧСП зависит от типа элемента ЧСП, интервала изменения емкости и места включения варактора. Так в полосно-отражающих ЧСП более широкая полоса перестройки достигается при использовании варакторов малой емкости (десятичные доли пикофарада).

Цена варакторов малой емкости, например МА46Н120 фирмы МАСОМ (емкость от 0.15 до 1.1 пФ), относительно велика, а технология их монтажа является достаточно сложной. Поэтому поиск, разработка и исследование элементов ЧСП, обеспечивающих необходимую перестройку резонансной частоты при использовании варакторов не только малой, но и средней емкости (единицы пикофарад) является весьма актуальной задачей. Целью данной работы является создание и исследование именно таких элементов. Поскольку резонансную частоту и потенциал ее перестройки определяют такие характеристики элемента ЧСП, как собственная емкость и индуктивность, то в качестве предмета исследования предложены элементы, в которых указанные характеристики локализованы в определенных частях этих элементов.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЧСП И ОЦЕНКА ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

Были рассмотрены элементы ЧСП с пространственной локализацией индуктивности и емкости. Так, на рис. 1а и 1б показаны элементы полосно-отражающих ЧСП в форме модифицированной петли (МП) и модифицированного диполя (МД) соответственно, в которых индуктивность локализована в основном в узких частях проводников, а емкость в широких частях. Управляющие варакторы включены в середины узких частей проводников.

На рис. 1в и 1г представлены соответствующие эквивалентные схемы элементов, где  $C_0$  и  $L_0$  – собственные емкость и индуктивность элемента, а  $C$  – емкость варактора. Согласно эквивалентным схемам резонансные частоты  $f_p$  элементов для МП и МД определяются соответственно формулами

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{L_0 C_0} \left(1 + \frac{C_0}{2C}\right)}, \tag{1}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{L_0 C_0} \left(1 + \frac{C_0}{C}\right)}. \tag{2}$$

Как следует из формул (1) и (2), диапазон перестройки резонансной частоты зависит как от ин-

**Таблица 1.** Расчетные характеристики перестройки резонансной частоты решеток из элементов типа МП и МД

$x$ , мм	$f_{\text{макс}}$ , ГГц	$f_{\text{мин}}$ , ГГц	$f_{\infty}$ , ГГц	$C_0$ , пФ	$\Delta$ , %
Модифицированная петля					
2.5	6.48	5.48	5.28	0.53	16.7
5	5.68	4.88	4.73	0.46	15.2
7	5.33	4.58	4.48	0.43	15.1
10	4.98	4.33	4.27	0.37	14.0
14	4.68	4.18	4.13	0.30	11.3
18	4.68	4.23	4.18	0.26	10.1
Модифицированный диполь					
2.5	5.88	4.33	4.13	0.53	30.4
5	4.98	3.78	3.58	0.49	27.4
7	4.53	3.48	3.38	0.42	26.5
10	4.13	3.23	3.13	0.39	24.5
14	3.83	3.08	3.03	0.31	21.7
18	3.78	3.18	3.12	0.24	20.1

тервала изменения емкости  $C$  варактора, так и от величины собственной емкости элемента. При этом для заданного интервала изменения емкости варакторов диапазон перестройки тем больше, чем больше собственная емкость элемента. Предварительные оценки собственных емкостей элементов были проведены экспериментально для двух базовых моделей: МП и МД.

Базовые элементы имели размеры  $A_1 = B_1 = A_2 = B_2 = 21$  мм,  $d_1 = d_2 = 1.5$  мм,  $x = 7$  мм и были выполнены на подложке из лавсана толщиной 0.1 мм. Резонансные частоты этих элементов  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$  были измерены для двух случаев: 1) для короткого замыкания в месте включения варакторов, и 2) для случая включения вместо варакторов фиксированной емкости  $C = 0.5$  пФ. Собственные емкости  $C_0$  для МП и МД были рассчитаны соответственно по формулам

$$C_0 = 2C \left( \frac{f_{p2}^2}{f_{p1}^2} - 1 \right), \quad (3)$$

$$C_0 = C \left( \frac{f_{p2}^2}{f_{p1}^2} - 1 \right). \quad (4)$$

Собственные емкости для МП и МД незначительно отличались друг от друга и имели величину около 0.5 пФ. Зная собственную емкость элемента и интервал изменения емкости варактора, с помощью формул (1) и (2) легко оценить диапазон перестройки резонансной частоты элемента ЧСП. Так, при использовании варакторов сред-

ней емкости ВВ857 с номинальным интервалом изменения емкости 0.52...6.6 пФ относительный диапазон перестройки  $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$  для МП и МД оценивается как 1.2 и 1.4 соответственно.

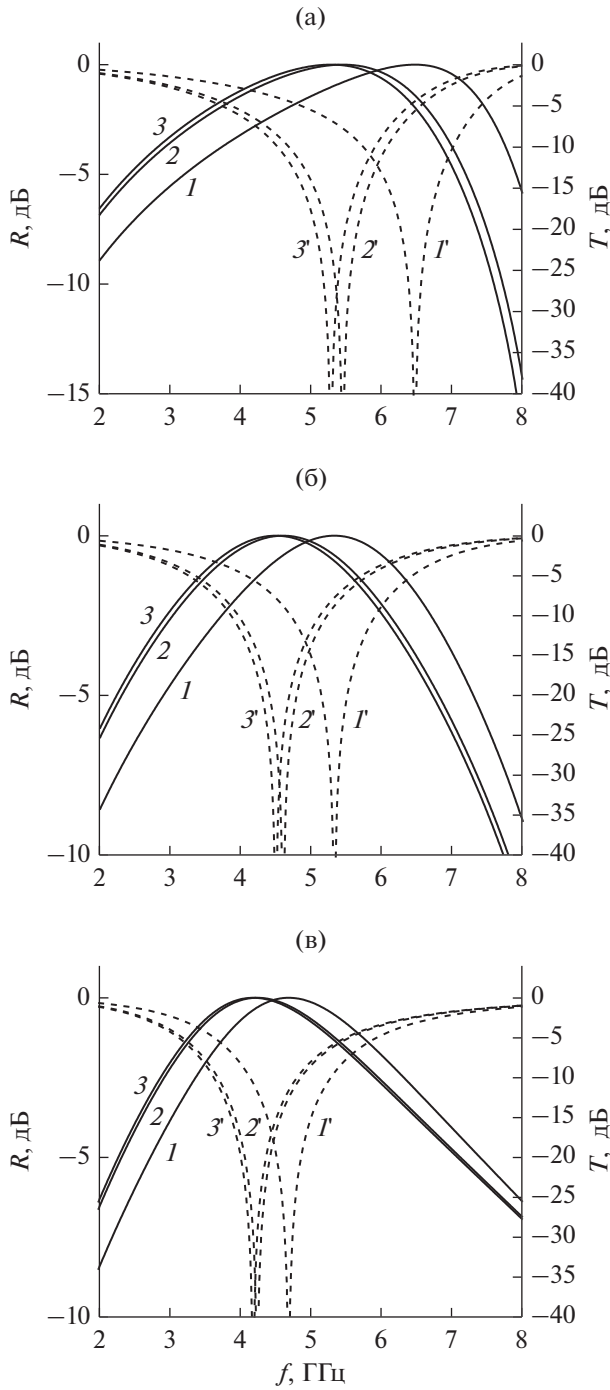
## 2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ

Были численно рассчитаны частотные зависимости коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$  через бипериодические решетки с периодом 24 мм из идеально проводящих элементов, изображенных на рис. 1а и 1б. Размеры  $A_1, B_1, A_2, B_2, d_1, d_2$  приняты такими же, как в базовых моделях, а диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon = 1$ . Размер  $x$  изменялся в интервале 2.5...18 мм. В разрывы элементов включены постоянные емкости  $C$ . По минимумам коэффициента прохождения (либо по максимумам отражения) определялись резонансные частоты решеток.

На рис. 2а–2в и рис. 3а–3в приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения для решеток из элементов типа МП и МД соответственно при трех размерах  $x = 2.5, 7$  и 18 мм и трех значениях величины емкости  $C = 0.52, 6.6$  пФ и  $C = \infty$ , включенных в разрывы элементов ЧСП. Значение  $C = \infty$  эквивалентно короткому замыканию разрыва. Отметим, что частотные зависимости для  $C = 6.6$  пФ и  $C = \infty$  мало отличаются друг от друга. Поэтому использование емкостей больше 6 пФ для перестройки резонансной частоты представляется неэффективным.

В табл. 1 приведены максимальные и минимальные значения резонансной частоты, соответствующие значениям емкости  $C = 0.52$  и 6.6 пФ соответственно, при шести значениях размера  $x$ . Кроме того, приведены относительные значения перестройки частоты  $\Delta(\%) = 200(f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}})/(f_{\text{макс}} + f_{\text{мин}})$  при изменении емкости в указанных пределах. Там же приведены значения резонансной частоты  $f_{\infty}$  при  $C = \infty$  и значения собственной емкости элементов  $C_0$ , рассчитанные по формулам (3), (4) и данным таблицы.

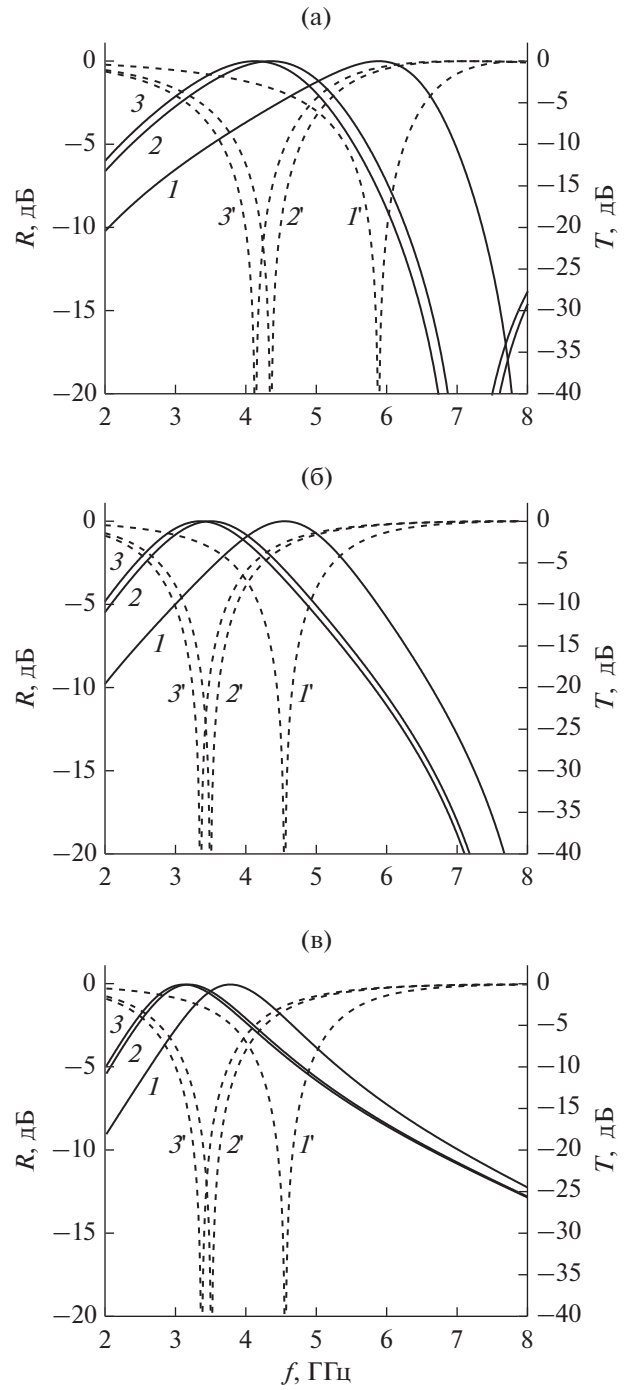
Из анализа данных табл. 1 следует, что максимальная перестройка резонансной частоты 16.7 и 30.4% соответственно для МП и МД достигается при минимальном значении  $x = 2.5$  мм, при котором собственная емкость элемента максимальна. Как и следовало ожидать, максимальная перестройка резонансной частоты для МД оказывается существенно больше, чем для МП. Следует отметить, что предварительные результаты по перестройке резонансной частоты, приведенные в разд. 1, не противоречат результатам численного расчета.



**Рис. 2.** Рассчитанные частотные зависимости коэффициентов отражения (сплошные кривые) и прохождения (штриховые кривые) для решеток из элементов типа модифицированная петля при  $x = 2.5$  (а), 7 (б) и 18 мм (в) и при  $C = 0.52$  (1, 1'), 6.6 пФ (2, 2') и  $C = \infty$  (3, 3').

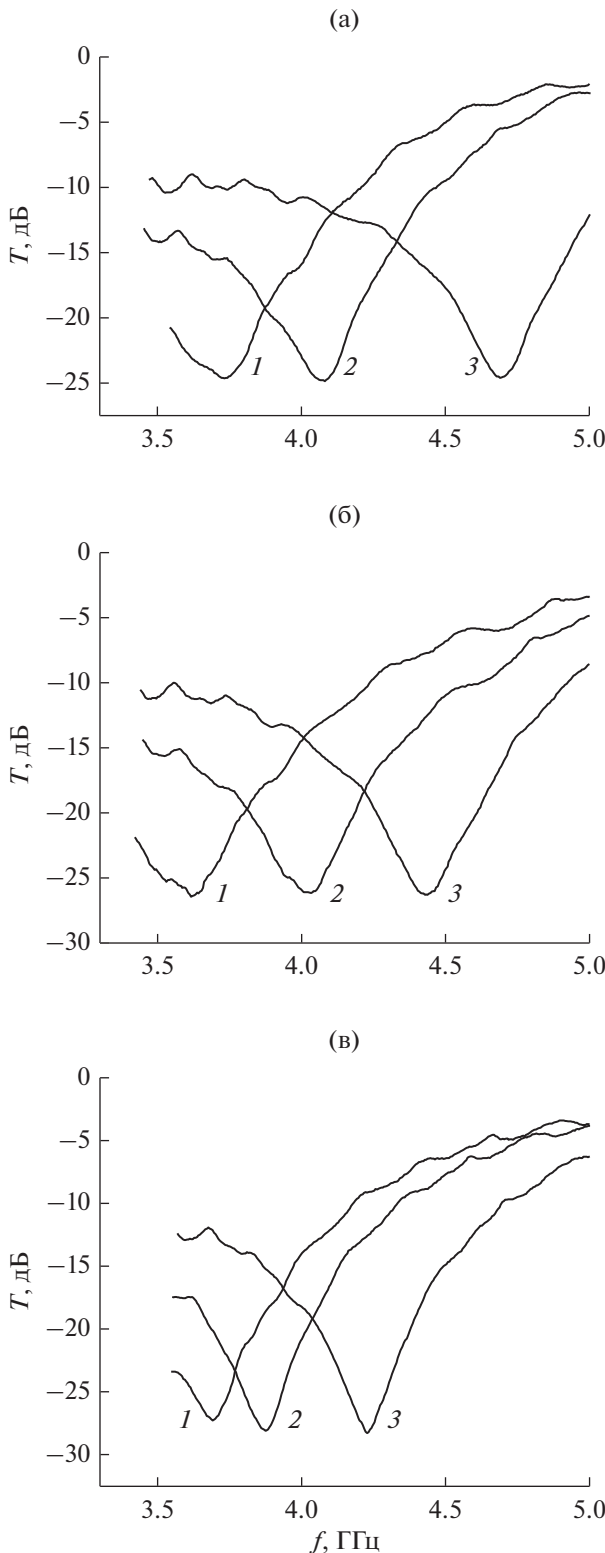
### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы элементов были выполнены из медной фольги толщиной 0.1 мм на подложке из гетинакса толщиной 1 мм. Для перестройки резонансной частоты элементов применялись варакторы



**Рис. 3.** Рассчитанные частотные зависимости коэффициентов отражения (сплошные кривые) и прохождения (штриховые кривые) для решеток из элементов типа модифицированный диполь при  $x = 2.5$  (а), 7 (б) и 18 мм (в) и при  $C = 0.52$  (1, 1'), 6.6 пФ (2, 2') и  $C = \infty$  (3, 3').

средней емкости ВВ857. Измерения коэффициентов прохождения элементов проводились в диапазоне частот 2.3...5.7 ГГц в волноводах сечением  $72 \times 36$  и  $48 \times 24$  мм с помощью панорамных измерителей КСВ серии Р-2.



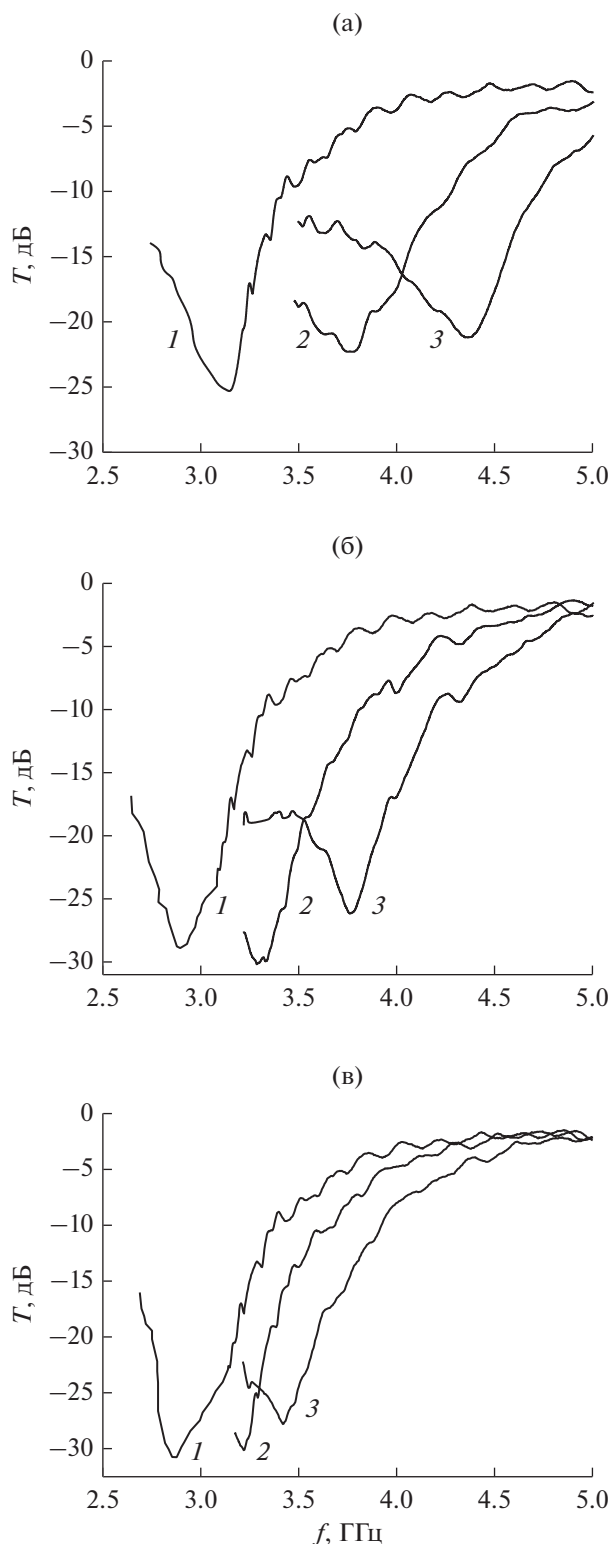
**Рис. 4.** Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов прохождения для элементов типа модифицированная петля, управляемых варакторами, при  $x = 2.5$  (а), 7 (б) и 14 мм (в) и при  $U_B = 0$  (1), 10 (2) и 29 В (3).

**Таблица 2.** Измеренные характеристики управления с помощью варакторов резонансной частотой элементов типа МП и МД

$x$ , мм	$f_{\text{макс}}$ , ГГц	$f_{\text{мин}}$ , ГГц	$\Delta$ , %
Модифицированная петля (МП)			
2.5	4.69	3.73	22.8
5	4.66	3.83	19.6
7	4.4	3.62	19.4
10	4.3	3.63	17.0
14	4.23	3.69	13.6
Модифицированный диполь (МД) $A_2 = B_2 = 21$ мм			
2.5	4.36	3.16	36.8
5	4.08	2.92	33.1
7	3.76	2.90	25.8
10	3.60	2.90	24.6
14	3.42	2.88	17.1
Модифицированный диполь (МД) $A_2 = B_2 = 16$ мм			
2.5	4.96	3.74	28.0
5	4.43	3.42	25.7

На рис. 4а–4в и рис. 5а–5в представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения  $T$  соответственно для элемента типа МП и МД с размерами  $A_1 = B_1 = A_2 = B_2 = 21$  мм,  $d_1 = d_2 = 1.5$  мм при нескольких размерах  $x$  и трех значениях напряжения на варакторах:  $U_B = 0$ ; 10 и 29 В.

В табл. 2 приведены минимальные и максимальные значения резонансной частоты, а также относительные величины перестройки при изменении напряжения на варакторах от 0 до 29 В при нескольких значениях размера  $x$  для одной модели МП и двух моделей МД. Как следует из данных табл. 2, с уменьшением размера  $x$  диапазон перестройки расширяется, что связано с увеличением собственной емкости элемента. При этом наибольшие относительные значения перестройки при  $x = 2.5$  мм для МП и МД составляет 22.8 и 36.8% соответственно. Отметим, что при одинаковых габаритных размерах  $A_1 = B_1 = A_2 = B_2$  диапазон перестройки у МД лежит в области более низких частот, чем у МП. Уменьшение габаритных размеров элемента МД до 16 мм приводит не только к уменьшению значений резонансной частоты, но и к уменьшению диапазона перестройки с 36.8 до 28%, что обусловлено уменьшением собственной емкости элемента по сравнению с минимальной емкостью варактора. Измеренные



**Рис. 5.** Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов прохождения для элементов типа модифицированный диполь, управляемых варакторами, при  $x = 2.5$  (а), 7 (б) и 18 мм (в) и при  $U_B = 0$  (1), 10 (2) и 29 В (3).

диапазоны перестройки, приведенные в табл. 2, несколько шире и лежат в области более низких частот, чем расчетные значения из табл. 1, что обусловлено большей собственной емкостью экспериментальных моделей, выполненных на диэлектрической подложке конечной толщины.

Отметим также, что при использовании варакторов малой емкости диапазон перестройки может быть еще больше. Так, для МД теоретическая оценка дает прогнозируемую величину перестройки до 60%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ увеличения диапазона перестройки резонансной частоты полосно-отражающих ЧСП с помощью элементов ЧСП с увеличенной собственной емкостью. Такими элементами являются элементы в форме модифицированной петли и модифицированного диполя. Показано, что ширина диапазона перестройки определяется отношением собственной емкости элемента к минимальной емкости управляющего варактора: чем больше это отношение, тем шире диапазон перестройки резонансной частоты. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что при использовании варакторов одного и того же типа диапазон перестройки для модифицированного диполя существенно превышает диапазон перестройки для модифицированной петли. Так, при использовании варакторов средней емкости ВВ857 максимальный диапазон перестройки для модифицированного диполя составляет 36.8%, а для модифицированной петли – 22.8%. Заметим, что в случае использования варакторов малой емкости типа МА46Н120 эти величины возрастут в полтора–два раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sanz-Izquierdo B., Ekpo L.T., Robertson J.B. et al.* // Electron. Lett. 2008. V. 44. № 21. P. 1268.
2. *Sanz-Izquierdo B., Parker E.A., Robertson J.B. et al.* // Electron. Lett. 2009. V. 45. № 22. P. 1107.
3. *Sanz-Izquierdo B., Parker E.A., Batchelor J.C.* // IEEE Trans. 2011. V. AP-59. № 7. P. 2728.
4. *Boccia L., Russo I., Amendola G. et al.* // Electron. Lett. 2009. V. 45. № 24. P. 1213.
5. *Russo I., Boccia L., Amendola G. et al.* // 2010 Proc. Fourth European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), 12–16 April 2010, Barcelona, Spain. P. 235.
6. *Durbin J.L., Saed M.A.* // Progress in electromagnetics research letters. 2012. V. 29. P. 43.
7. *Tennant A., Chambers B.* // IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett. 2004. V. 14. № 1. P. 46.
8. *Kong P., Yu X., Liu Z. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. № 24. P. 30217.

9. *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 20. С. 11.
10. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 11. С. 21.
11. *Mias C.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 11. P. 850.
12. *Mias C.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 14. P. 1060.
13. *Mias C.* // Microwave and Optical Technol. Lett. 2005. V. 44. № 5. P. 412.
14. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 9. С. 958.
15. *Chang T.K., Langley R.J., Parker E.A.* // IEEE Microw. Guided Wave Lett. 1993. V. 3. № 10. P. 387.
16. *Shiroma W.A., Bundy S.C., Hollung S. et al.* // IEEE Trans. 1995. V. MTT-43. № 12. P. 2904.
17. *Mias C., Tsakonas C.* // Microwave and Optical Technol. Lett. 2005. V. 45. № 1. P. 62.
18. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 9. С. 908.
19. *Костин М.В., Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А. и др.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 13. С. 22.
20. *Казанцев Ю.Н., Костин М.В., Крафтмахер Г.А.* // РЭ. 1994. Т. 39. № 10. С. 1652.
21. *Веселаго В.Г.* // Успехи физ. наук. 1967. Т. 92. № 3. С. 517.
22. *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 5. С. 518.