

СПОСОБЫ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВАРАКТОРАМИ

© 2013 г. Ю. Н. Казанцев, Г. А. Крафтмахер, В. П. Мальцев

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

E-mail: mvp@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 05.03.2013 г.

Рассмотрены методы перестройки резонансной частоты элементов частотно-селективных поверхностей при помощи варакторов, включенных как в разрывы проводника внутри элементов, так и в промежутки между элементами. Представлены результаты приближенного расчета и измерения волновым методом резонансных частот элементов частотно-селективных поверхностей различной формы (“бабочки”, петли, “змейки”) с варакторами различных типов. Показано, что при включении варакторов внутри элемента максимальная относительная перестройка резонансной частоты (37%) достигается в случае элемента большой собственной емкости (формы “бабочка”) и варактора малой емкости (МА46Н120). Приведены результаты оценки эффективности способа расширения диапазона перестройки резонансной частоты элемента путем индуктивного шунтирования цепи варактора.

DOI: 10.7868/S0033849413090076

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия существенно развивается техника частотно-селективных поверхностей (ЧСП). Такая поверхность представляет собой би-периодическую решетку либо из металлических элементов на диэлектрической подложке (полосно-отражающая ЧСП), либо из отверстий в металлическом экране (полосно-пропускающая ЧСП).

Одним из применений ЧСП является частотная фильтрация сигналов в сетях беспроводной связи в условиях закрытых помещений с целью повышения спектральной эффективности этих сетей. Функциональные характеристики таких фильтров существенно повышаются при использовании ЧСП с перестройкой резонансной частоты. Наиболее перспективным из различных способов перестройки резонансной частоты ЧСП, по-видимому, является варакторный [1–10]. При этом способе электрически управляемая емкость (варактор) включена либо внутри самих элементов полосно-отражающей ЧСП [3–7, 10], либо между элементами [1, 2, 8, 9]. В первом случае варактор включен в разрыв проводника образующего элемент решетки (например, в разрыв линейного диполя или в разрыв петли). При этом резонансная частота элемента решетки при включении в него варактора несколько увеличивается, но остается сравнимой с резонансной частотой того же элемента с замкнутым накоротко разрывом. Во

втором случае благодаря сильной емкостной связи между элементами они резонируют как единый ансамбль. Причем резонансная частота ансамбля оказывается значительно меньше резонансной частоты отдельного элемента.

Так, в [1] описана ЧСП с элементами в виде квадратных петель, между которыми включены управляющие варакторы. В работе [2] рассмотрена ЧСП с крестообразными элементами, а варакторы соединяют концы соседних крестов. Относительная перестройка резонансной частоты (относительно средней) такой ЧСП составила $\pm 15\%$. Заметим, что период и размеры элементов таких ЧСП малы по сравнению с резонансной длиной волны. Это позволило целенаправленно создавать мелкопериодные управляемые ЧСП с малоразмерными элементами [8, 9]. При этом перестройка частоты оказалась достаточной для реализации двух рабочих режимов: полосного прохождения и полосного отражения падающей электромагнитной волны [9].

В случае включения управляющего варактора в разрыв проводника элемента ЧСП размеры элементов и период структуры сравнимы с половиной резонансной длины волны, а относительная величина перестройки частоты оказывается небольшой. Так, в [3, 4] предлагается включать варакторы в два симметричных разрыва квадратной петли, являющейся элементом ЧСП. Достигнутая в этом случае относительная величина пере-

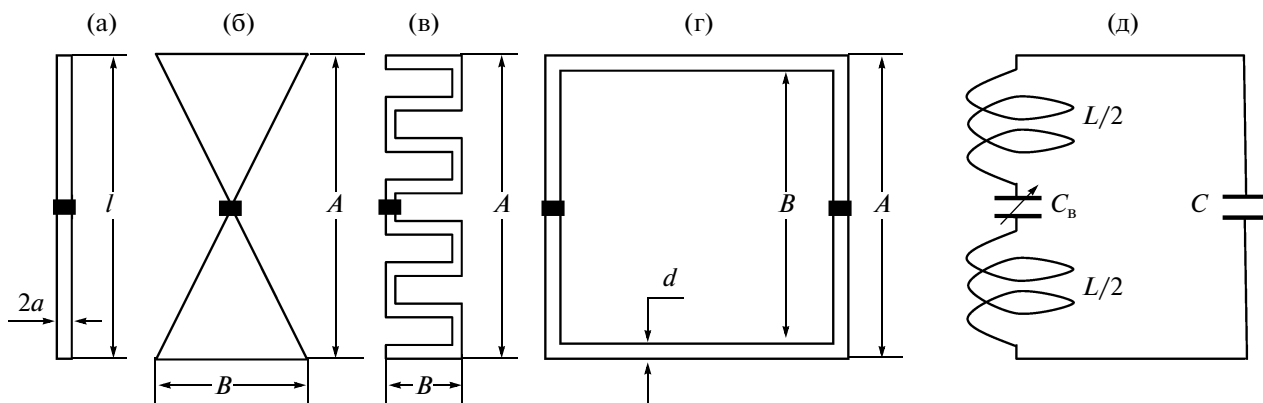


Рис. 1. Элементы ЧСП с варакторами внутри элементов: а – линейный диполь, б – диполь “бабочка”, в – диполь “змейка”, г – квадратная петля, д – эквивалентная схема элемента ЧСП.

стройки резонансной частоты не превышает 6%. Для увеличения диапазона перестройки было предложено включать в разрыв проводника вместо одного несколько последовательно соединенных варакторов [6]. Достигнутая величина перестройки составила около 20%. Приблизительно такая же перестройка имела место при включении в разрыв проводника варактора с очень малым значением минимальной емкости (порядка 0.1 пФ).

В данной работе рассмотрены другие возможности расширения диапазона перестройки резонансной частоты ЧСП: путем использования в ЧСП элементов наиболее рациональной формы и путем включения в элементы ЧСП дополнительного LC-контура.

1. ВЫБОР ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЧСП

А. Включение варакторов внутри элементов ЧСП

На рис. 1а–1г показаны элементы ЧСП типа диполей и петель, управляемые варакторами (черные прямоугольники), которые включены в разрывы проводников этих элементов. Эквивалентная схема диполя и половины петли с варакторами представлены на рис. 1д. Согласно эквивалентной схеме резонансная частота f_p элемента решетки определяется следующей формулой:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_{\text{в}}}}. \quad (1)$$

Из этой формулы следует, что диапазон перестройки резонансной частоты зависит как от интервала изменения емкости $C_{\text{в}}$ варактора, так и от величины эффективной емкости C элемента ЧСП. При этом желательно, чтобы величина C была по возможности большой, а емкость варактора $C_{\text{в}}$ изменялась в интервале меньших значений. Макси-

мальная величина перестройки резонансной частоты ЧСП определяется следующей формулой:

$$\Delta f = f_{p\text{макс}} - f_{p\text{мин}} = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{C}{C_{\text{вмин}}}} - \sqrt{1 + \frac{C}{C_{\text{вмакс}}}} \right), \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота элемента, в котором варактор замкнут накоротко:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Измерив f_0 , Δf и, используя справочные данные по $C_{\text{вмакс}}$ и $C_{\text{вмин}}$, несложно оценить по формуле (2) значение C для различных элементов. Как и следовало ожидать, большими значениями C характеризуются диполи типа “бабочка” (рис. 1б) и петли с широким проводником (рис. 1г). В качестве примера приведем результаты оценки C диполя типа “бабочка”, составленного из двух равнобедренных треугольников со сторонами, равными 11 мм. При этой оценке был использован варактор ВВ857 с $C_{\text{вмакс}} = 6.6$ пФ и $C_{\text{вмин}} = 0.52$ пФ. Измеренные в волноводе значения $f_{p\text{макс}}$, $f_{p\text{мин}}$ и f_0 составили соответственно 5.1 ГГц, 4.1 ГГц и 4 ГГц. Значение C , вычисленное по формуле (2), равно 0.26 пФ. Из соотношения (3) вычисляем $L = 6$ нГн. Несколько меньшую эффективную емкость (0.2 пФ) имеет элемент в форме квадратной петли (ширина проводника $d = 3$ мм) и с той же резонансной частотой $f_0 = 4$ ГГц.

Б. Включение варакторов между элементами ЧСП

На рис. 2а–2в показаны элементы ЧСП (диполь, петля, квадрат), между которыми включены управляющие варакторы. Эквивалентная схема одного периода структуры представлена на рис. 2г. На этой схеме C и L – собственные емкость и индуктивность элемента ЧСП, $C_{\text{св}}$ – емкость связи между элементами. Собственная резонансная ча-

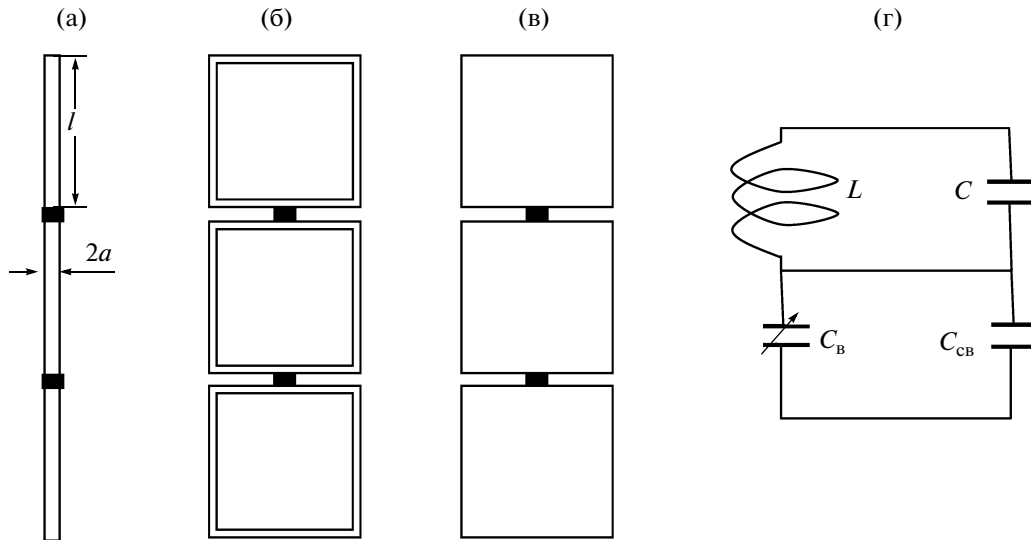


Рис. 2. Элементы ЧСП с варакторами между элементами: а – линейные диполи, б – квадратные петли, в – сплошные квадраты, г – эквивалентная схема.

стота f_0 отдельного элемента ЧСП при отсутствии соседних элементов равна

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Резонансная частота f_p последовательного ряда связанных элементов может быть определена из эквивалентной схемы, приведенной на рис. 2г. Для этого вычисляется импеданс Z для одного периода:

$$Z = -\frac{j}{2\pi f_p (C_B + C_{CB})} - \frac{j2\pi f_p L}{4\pi^2 f_p^2 LC - 1}, \quad (5)$$

который затем приравнивается нулю. Решив полученное уравнение, находим следующее выражение для резонансной частоты f_p рассматриваемой структуры:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_B + C_{CB} + C)}}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что перестройка частоты максимальна при условии

$$C_B \gg C + C_{CB}. \quad (7)$$

В этом случае имеет место неравенство

$$f_0 \gg f_p, \quad (8)$$

а размеры элемента ЧСП малы по сравнению с длиной волны $\lambda_p = c/f_p$, где c – скорость света.

В качестве примера приведем оценки параметров структуры диполей с размерами $l = 1$ см, $2a = 0.05$ см (рис. 2а), соединенных варакторами ВВ857 ($C_{B\max} = 6.6$ пФ и $C_{B\min} = 0.52$ пФ). В случае узких диполей емкостная связь C_{CB} мала. Будем

считать, что неравенство $C_B \gg C_{CB}$ выполняется. Собственная резонансная частота диполя равна

$$f_0 = \frac{c}{2l} = 15 \text{ ГГц.}$$

Собственная индуктивность диполя [11] приблизительно равна $L = 2l \ln \frac{l}{a} = 7.38$ см = 7.38 нГн, а собственная емкость диполя – $C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} = 1.53 \times 10^{-2}$ пФ. Максимальная и минимальная резонансные частоты структуры равны

$$\begin{aligned} f_{p\min} &\approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_{B\max} + C)L}} = 0.72 \text{ ГГц}, \\ f_{p\max} &\approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_{B\min} + C)L}} = 2.5 \text{ ГГц}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, в приведенном примере неравенства (7) и (8) выполняются во всем диапазоне изменения емкости варактора C_B .

При этих условиях величина перестройки частоты f_p определяется интервалом изменения C_B как $1/\sqrt{C_B}$ и может быть достаточно большой. Однако при этом число элементов и, соответственно, варакторов на единицу площади ЧСП также велико.

Отметим, что здесь в противоположность случаю включения варакторов в разрыв проводника элемента большую перестройку резонансной частоты f_p обеспечивают элементы с меньшей собственной емкостью C .

Параметры экспериментальных образцов

№ образца	Тип элемента	A , мм	B , мм	Тип варактора	$C_{вмин}$, пФ ($U_{упр} = 30 В$)	$C_{вмакс}$, пФ ($U_{упр} = 0 В$)	$f_{рмакс}$, ГГц ($U_{упр} = 30 В$)	$f_{рмин}$, ГГц ($U_{упр} = 0 В$)	$\frac{f_{рмакс} - f_{рмин}}{f_{рсред}}$, %
1	“Бабочка”	21	11	ВВ857	0.52	6.6	5.2	4.1	24
2	Петля	18	10	ВВ857	0.52	6.6	5.6	4.7	17
3	“Змейка”	20	4	ВВ857	0.52	6.6	5	4.5	11
4	“Бабочка”	21	11	SMY1234	1.3	9.6	4.7	4.3	09
5	“Бабочка”	28	14	МА46Н120	0.15	1	5.4	3.7	37

2. ОБРАЗЦЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЧСП. МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ

Были изготовлены и исследованы три серии элементов ЧСП типа “бабочка”, петля, “змейка”, с варакторами, включенными в разрывы проводников (рис. 1). В таблице приведены размеры образцов, марки и емкости варакторов, а также измеренные резонансные частоты и значения относительной перестройки.

Резонансную частоту элемента измеряли волновым методом по частотной зависимости коэффициента прохождения T при расположении элемента в центре поперечного сечения вол-

новода (кроме образца № 5). Управляющее напряжение $U_{упр}$ в интервале 0...30 В от источника В5-44 подавали на варактор при помощи тонких проводов через прорезь в узкой стенке волновода. Для обеспечения развязки по высокой частоте с источником питания в оба провода перед варактором впаивали резисторы с сопротивлением 100 кОм. Образец № 5 измеряли в середине разрыва волноводного тракта длиной 50 мм.

Частотные зависимости коэффициентов прохождения для образцов из таблицы при различных управляющих напряжениях приведены на рис. 3–7. Номера образцов соответствуют приведенным в таблице. Значения крайних резонанс-

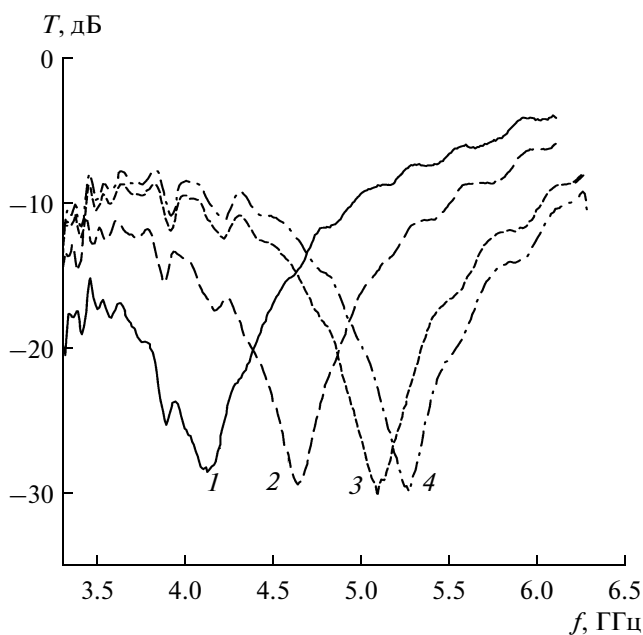


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 1, кривые 1–4 соответствуют $U_{упр} = 0, 10, 20, 30 В$.

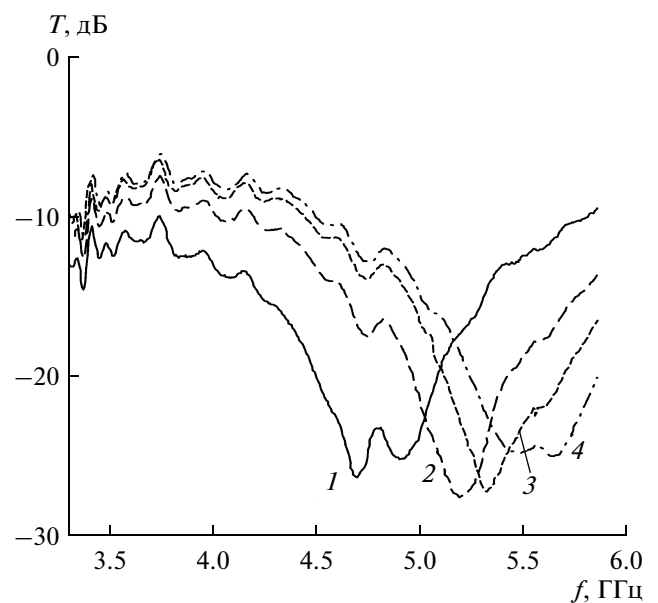


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 2, кривые 1–4 соответствуют $U_{упр} = 0, 10, 20, 30 В$.

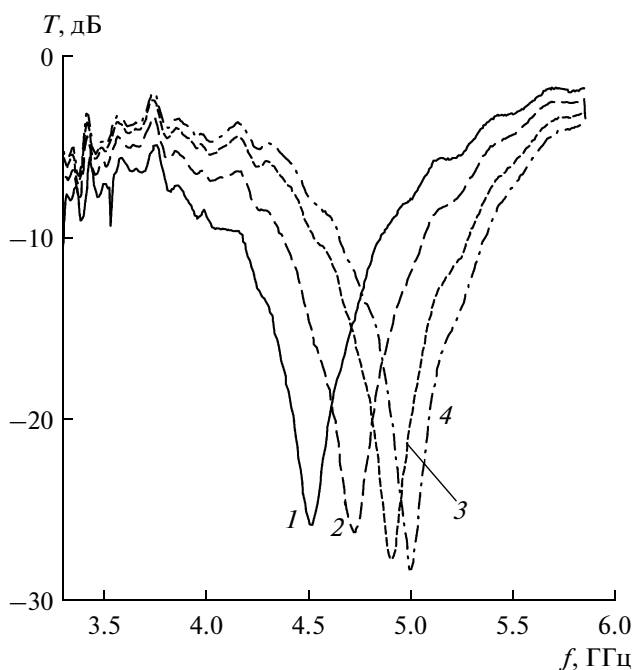


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 3, кривые 1–4 соответствуют $U_{упр} = 0, 10, 20, 30$ В.

ных частот $f_{р\max}$, $f_{р\min}$ и относительные величины перестройки приведены в таблице. Из полученных результатов следует, что форма элемента типа “бабочка” обеспечивает бóльшую относительную

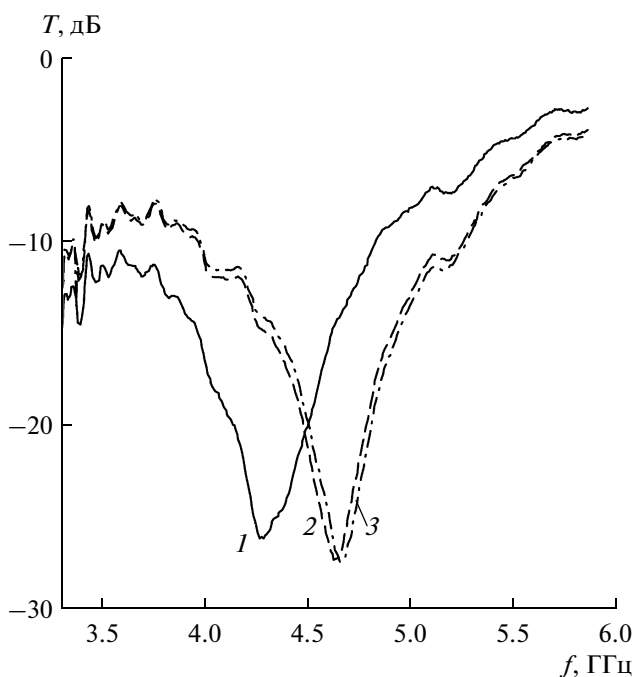


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 4, кривые 1–3 соответствуют $U_{упр} = 0, 10, 30$ В.

перестройку резонансной частоты по сравнению с другими формами, относительная перестройка резонансной частоты максимальна при использовании варактора марки МА46Н120 с малым значением емкости.

Экспериментальные результаты находятся в соответствии с теоретическими выводами, следующими из формулы (2), а именно: диапазон перестройки тем больше, чем больше собственная емкость элемента и чем меньше минимальная емкость варактора. Заметим, однако, что применение варакторов малой емкости имеет недостатки: стоимость таких варакторов относительно велика, а технология практического применения является более сложной. Поэтому поиск и исследование других путей увеличения диапазона перестройки представляется актуальным.

3. МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕМЕНТА ЧСП

Как было отмечено выше, при включении варактора внутри элемента (рис. 8а) диапазон перестройки резонансной частоты элемента тем больше, чем меньше минимальная емкость варактора и, соответственно, больше его емкостный импеданс. Естественным способом увеличения импеданса цепи варактора является шунтирование емкости варактора некоторой малой индуктивностью. Эквивалентная схема элемента с варактором

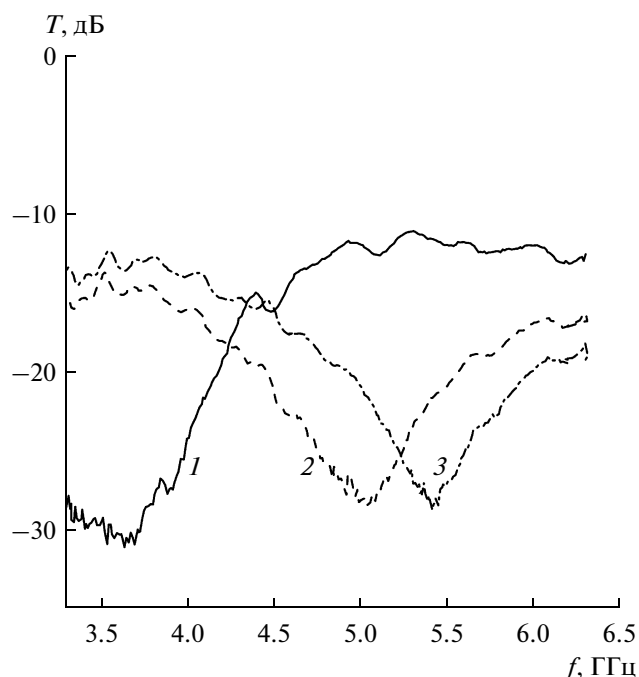


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 5, кривые 1–3 соответствуют $U_{упр} = 0, 10, 30$ В.

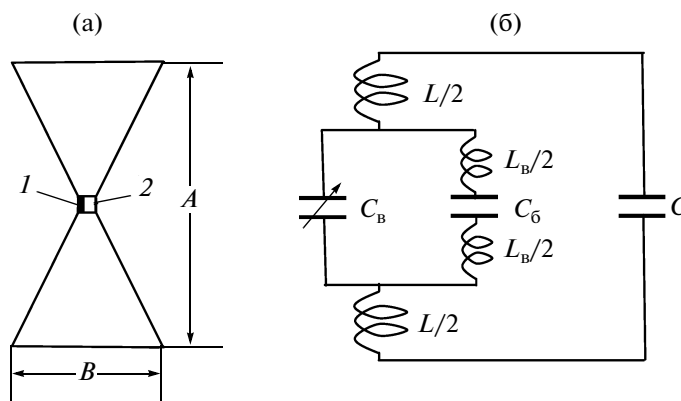


Рис. 8. Шунтирование цепи варактора: а – схема включения шунта (1 – варактор, 2 – блокирующий конденсатор), б – эквивалентная схема.

и шунтирующей его индуктивностью L_B приведена на рис. 8б. Здесь C_6 – большая дополнительная емкость, блокирующая короткое замыкание для постоянного напряжения, управляющего емкостью варактора. Приравнивая импеданс эквива-

лентной схемы нулю, получим уравнение для определения резонансной частоты f_p :

$$-\frac{j}{2\pi f_p C} + j2\pi f_p L + \frac{j2\pi f_p L_B}{1 - 4\pi^2 f_p^2 C_B L_B} = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{LC + L_B C_B + L_B C}{2LCL_B C_B} \pm \sqrt{\left(\frac{LC + L_B C_B + L_B C}{2LCL_B C_B}\right)^2 - \frac{1}{LCL_B C_B}}}. \quad (11)$$

В уравнении (10) большая емкость C_6 не была учтена, поскольку предполагалось, что ее импеданс мал по сравнению с импедансом индуктивности L_B .

Зависимость f_p от C_B , рассчитанная по формуле (11) для элемента № 1 из таблицы ($C = 0.26$ пФ, $L = 6$ нГн) при значениях $L_B = 0.5; 1; 1.5$ нГн представлена на рис. 9. Заметим, что каждому значению C_B соответствуют две резонансные частоты, одна из которых может перестраиваться в достаточно большом диапазоне. Приведенная зависимость позволяет оценить влияние шунтирующей индуктивности L_B на эффект увеличения диапазона перестройки резонансной частоты f_p . Величина этой индуктивности имеет порядок 1 нГн и даже меньше. Столь малая индуктивность практически реализуется как индуктивность контактных соединений варактора и блокирующего конденсатора, а также проводящих промежутков между контактами (рис. 8а).

На рис. 10 приведена частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 1, когда параллельно варактору подключен блокирующий конденсатор емкостью 18 пФ. Как и предполагалось выше, величина импеданса индуктивности $L_B = 1$ нГн на рабочей частоте 4 ГГц, равная 24 Ом, существенно превышает величину емкостного импеданса блокирующего конденсатора,

равную 2.2 Ом. При сравнении кривых на рис. 3 и рис. 10 видно, что во втором случае относительная величина перестройки резонансной частоты

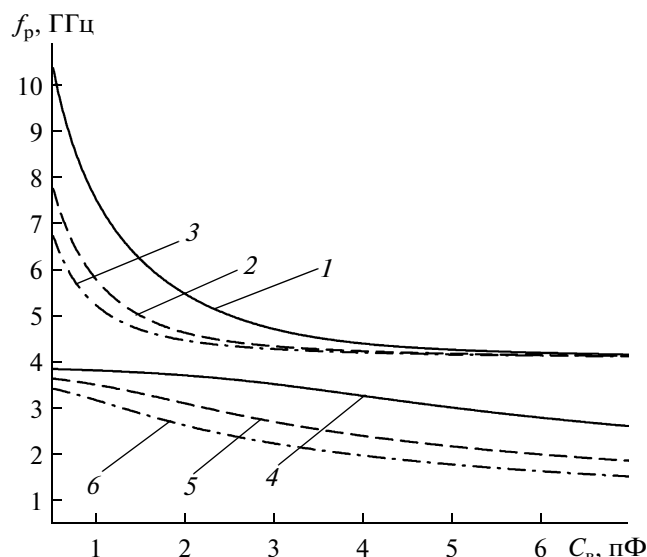


Рис. 9. Зависимость резонансной частоты от емкости варактора C_B для трех значений шунтирующей индуктивности L_B : кривые 1, 4 соответствуют $L_B = 0.5$ нГн, кривые 2, 5 – $L_B = 1$ нГн, кривые 3, 6 – $L_B = 1.5$ нГн.

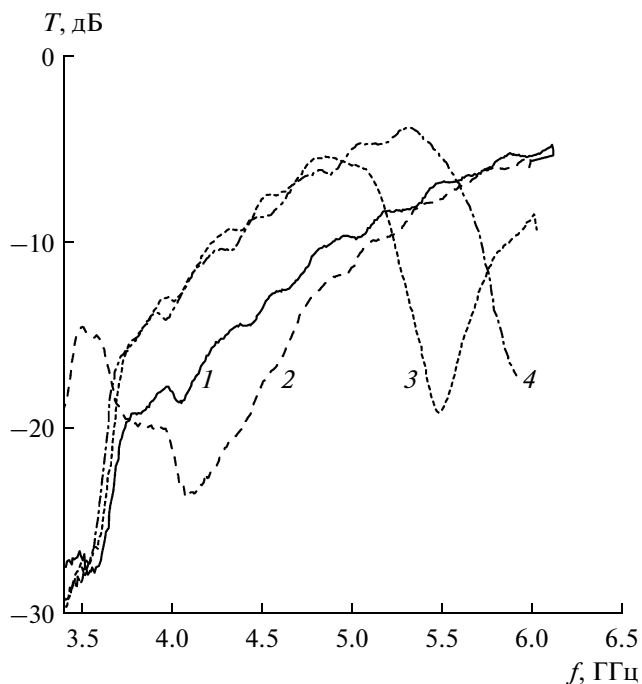


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента прохождения для образца № 1 с блокирующим конденсатором, кривые 1–4 соответствуют $U_{\text{упр}} = 0, 10, 20, 30$ В.

увеличилась приблизительно в два раза и составила 50%. Однако при этом глубина и ширина резонансных провалов на частотной кривой заметно уменьшаются с увеличением резонансной частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая оценка величины перестройки резонансной частоты ЧСП при помощи варакторов показала следующее. В случае включения варактора в разрыв проводника внутри элемента ЧСП более широкий диапазон перестройки достигается при большей собственной емкости эле-

мента и меньшей минимальной емкости варактора. В случае включения варактора между элементами ЧСП более широкий диапазон перестройки имеет место при меньших собственной емкости элемента и емкости связи между элементами.

Волноводным методом были измерены резонансные частоты управляемых элементов ЧСП различной формы (“бабочка”, петля, “змейка”) с варакторами, включенными в разрыв проводника внутри элемента ЧСП. Максимальная относительная перестройка резонансной частоты составила 37% и была получена с элементом типа “бабочка” и варактором малой емкости МА46Н120. Опробован способ расширения диапазона перестройки путем индуктивного шунтирования цепи варактора. При этом относительная перестройка резонансной частоты элемента ЧСП с варактором средней емкости ВВ857 была увеличена с 24% до 50%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang T.K., Langley R.J., Parker E.A. // IEEE Microwave and Guided Lett. 1993. V. 3. № 10. P. 387.
2. Shiroma W.A., Bundy S.C., Hollung S. et al. // IEEE Trans. 1995. V. MTT-43. № 12. P. 2904.
3. Mias C. // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 11. 850.
4. Mias C. // Electronics Letters. 2003. V. 39. № 14. P. 1060.
5. Mias C. // Microwave and Optical Technology Lett. 2004. V. 43. № 6. P. 508.
6. Mias C. // Microwave and Optical Technology Lett. 2005. V. 44. № 5. P. 412.
7. Mias C. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2005. V. 15. № 9. P. 570.
8. Bayatpur F., Sarabandi K. // IEEE Trans. 2009. V. AP-57. № 2. P. 590.
9. Bayatpur F., Sarabandi K. // IEEE Trans. 2009. V. MTT-57. № 6. P. 1433.
10. Sanz-Izquierdo B., Parker E.A., Robertson J.B., Batchelor J.C. // Electron. Lett. 2009. V. 45. № 22. P. 1107.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.