

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.372.412.414

### ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ РЕЗОНАТОРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ФОРМУЛ ПРЯМОГО СИНТЕЗА ФИЛЬТРОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

© 2009 г. В. В. Тюрнев

Поступила в редакцию 15.12.2007 г.

На примере широкополосного фильтра на параллельных колебательных контурах с комбинированной связью исследовано влияние наклона кривых частотной зависимости коэффициентов связи на их значения на резонансной частоте в настроенном фильтре. Угол наклона кривых регулируется соотношением индуктивной и емкостной составляющих коэффициента связи. Дано сравнение реальных значений коэффициентов связи и значений, полученных по формулам прямого синтеза.

#### ВВЕДЕНИЕ

При синтезе узкополосных фильтров сверхвысоких частот (СВЧ) широко и успешно используются формулы для внешней добротности конечных резонаторов и коэффициентов связи смежных резонаторов, полученные Коном [1] и Маттеем [2] из фильтра-прототипа нижних частот. Однако с увеличением ширины полосы пропускания точность этих формул непрерывно убывает и становится неприемлемой. Это и не удивительно, так как при выводе формул, во-первых, использовались эквивалентные схемы и, во-вторых, частотная дисперсия иммитансов резонаторов аппроксимировалась линейной функцией.

Недавно, не прибегая к каким-либо приближениям, мы получили [3] более сложные формулы для внешней добротности и коэффициентов связи резонаторов. Однако точность и этих формул, как показали результаты синтеза широкополосного фильтра из каскадно соединенных чередующихся низкоомных и высокоомных полуволновых отрезков линии передачи, также убывает с увеличением ширины полосы пропускания фильтра. Было высказано предположение, что причиной погрешности является реально существующая частотная дисперсия связей резонаторов, не учитывавшаяся при выводе формул в [1–3].

Частотная зависимость коэффициентов связи для пары полуволновых микрополосковых резонаторов рассматривалась в работах [4–5]. Наиболее строго частотная дисперсия коэффициентов связи исследована для пары параллельных колебательных контуров с комбинированной (индуктивно-емкостной) связью [5]. Характер частотной зависимости коэффициента связи в такой паре контуров может плавно изменяться от чисто индуктивного типа до чисто емкостного типа.

В данной работе на примере цепочки параллельных колебательных контуров, охваченных

индуктивно-емкостной связью, исследуется влияние наклона кривой частотной зависимости коэффициентов связи на погрешность формул прямого синтеза широкополосных фильтров.

#### 1. ФОРМУЛЫ ПРЯМОГО СИНТЕЗА

Первоначально формулы для внешней добротности конечных резонаторов  $Q_e$  и коэффициентов связи смежных резонаторов  $k_{i,i+1}$ , используемые для прямого синтеза  $n$ -звенного полосно-пропускающего фильтра, записывали в виде [1]

$$Q_e^{-1} = \frac{w}{g_0 g_1}, \quad |k_{i,i+1}| = \frac{w}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad (1)$$

где нормированные параметры  $g_i$  для  $i$ -го элемента чебышевского фильтра-прототипа нижних частот определяются формулами [6–7]

$$g_0 = 1, \quad g_1 = 2a_1/\gamma, \quad g_i = \frac{4a_{i-1}a_i}{b_{i-1}g_{i-1}},$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } n \text{ нечетное} \\ \text{cth}^2(\beta/4), & \text{если } n \text{ четное,} \end{cases}$$

$$\beta = 2 \operatorname{arth} \sqrt{1 - 10^{R_p/10}}, \quad \gamma = \operatorname{sh}\left(\frac{\beta}{2n}\right), \quad (2)$$

$$a_i = \sin \frac{(2i-1)\pi}{2n},$$

$$b_i = \gamma^2 + \sin^2\left(\frac{i\pi}{n}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь отрицательная величина  $R_p$  задает в децибелах минимальную величину коэффициента затухания отраженной мощности  $|S_{11}|^2$  в полосе пропускания фильтра. Параметр  $w$ , характеризующий

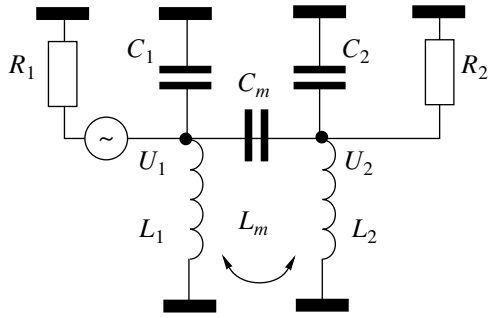


Рис. 1. Пара связанных колебательных контуров.

относительную ширину полосы пропускания, определяется формулой  $w = (\omega_2 - \omega_1) / \sqrt{\omega_2 \omega_1}$ , где  $\omega_1, \omega_2$  – нижняя и верхняя границы полосы пропускания по уровню  $R_p$ .

Формулы прямого синтеза фильтров (1) при более строгом рассмотрении проблемы принимают вид [3]

$$Q_e^{-1} = \frac{w}{g_0 g_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{4g_0 g_1}}}, \quad (3)$$

$$|k_{i,i+1}| = \frac{w}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \frac{\sqrt{1 + w^2 / (4g_i g_{i+1})}}{1 + w^2 / (2g_i g_{i+1})}.$$

Заметное различие формул (1) и (3) проявляется только в широкополосных фильтрах с  $w > 0.10$ .

## 2. ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ

Рассмотрим пару параллельных колебательных контуров, охваченных индуктивно-емкостной связью (рис. 1). Частотно-зависимые коэффициенты индуктивной и емкостной связи для такой пары контуров выражаются формулами [5]

$$K_L(\omega) = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \frac{2}{\sqrt{(1 + \omega^2 \omega_1^{-2})(1 + \omega^2 \omega_2^{-2})}}, \quad (4)$$

$$k_C(\omega) = \frac{-C_m}{\sqrt{(C_1 + C_m)(C_2 + C_m)}} \times \frac{2}{\sqrt{(1 + \omega_1^2 \omega^{-2})(1 + \omega_2^2 \omega^{-2})}}, \quad (5)$$

где резонансные частоты контуров с учетом влияния их связей принимают значения  $\omega_1 = [(L_1 - L_m^2/L_2)(C_1 + C_m)]^{-1/2}$ ,  $\omega_2 = [(L_2 - L_m^2/L_1)(C_2 + C_m)]^{-1/2}$ .

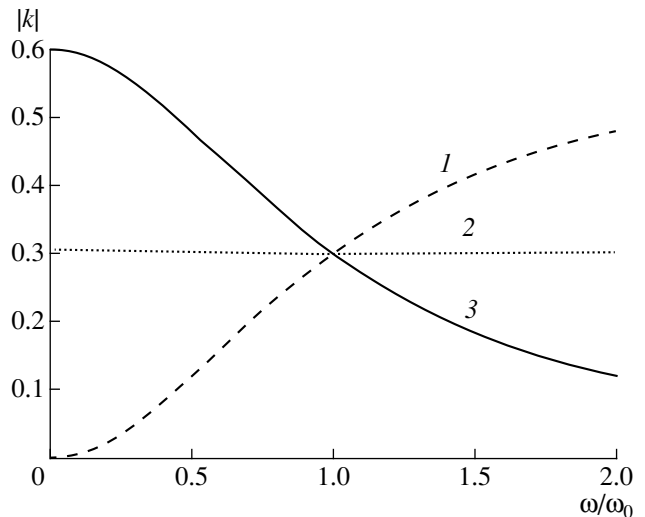


Рис. 2. Типы частотной дисперсии коэффициента связи контуров: 1 –  $k_L(\omega_0) = 0, k_C(\omega_0) = -0.3$ ; 2 –  $k_L(\omega_0) = k_C(\omega_0) = -0.1535$ ; 3 –  $k_L(\omega_0) = 0.3, k_C(\omega_0) = 0$ .

Суммарный частотно-зависимый коэффициент связи является алгебраической “суммой”, выражаемой формулой [8]

$$k(\omega) = \frac{k_L(\omega) + k_C(\omega)}{1 + k_L(\omega)k_C(\omega)}. \quad (6)$$

В настроенном фильтре резонансные частоты  $\omega_i$  всех колебательных контуров ( $i = 1, 2, 3 \dots n$ ) должны совпадать и равняться центральной частоте полосы пропускания  $\omega_0$ . В этом случае вид формул (4) и (5) упрощается

$$k_L(\omega) = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \frac{2}{(1 + \omega_0^{-2} \omega^2)}, \quad (7)$$

$$k_C(\omega) = \frac{-C_m}{\sqrt{(C_1 + C_m)(C_2 + C_m)}} \frac{2}{(1 + \omega_0^2 \omega^{-2})}. \quad (8)$$

На рис. 2 по формулам (6)–(8) построены три характерных типа частотной зависимости суммарного коэффициента связи контуров  $k(\omega)$  для случая  $|k(\omega_0)| = 0.30$ . Видно, что, регулируя соотношение величин индуктивной и емкостной связи, можно в широких пределах изменять угол наклона дисперсионной кривой коэффициента связи  $k(\omega)$ .

## 3. ФИЛЬТР НА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРАХ

Синтезируем широкополосный фильтр на параллельных колебательных контурах с комбинационной связью и проанализируем, как частотная дисперсия коэффициентов связи влияет на их

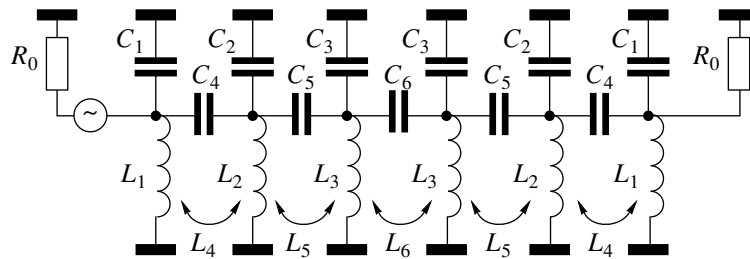


Рис. 3. Фильтр на параллельных колебательных контурах.

значения на резонансной частоте. Схема такого фильтра приведена на рис. 3.

Для определенности рассмотрим шестизвенный фильтр с относительной шириной полосы пропускания 40%, заданной по уровню затухания прошедшей мощности  $L_p = -3$  дБ. Минимальное затухание отраженной мощности в полосе пропускания зададим величиной  $R_p = -14$  дБ. В этом случае параметр  $w$ , присутствующий в формулах (1) и (3), принимает значение  $w = 0.3806$ . Ограничимся случаем, когда значения характеристических сопротивлений всех контуров совпадают, т.е.  $\sqrt{L_i/C_i} = \text{const}$  ( $i = 1 \dots 3$ ).

Синтез фильтра выполняем на компьютере с помощью специально созданной программы. В ней используем оригинальный метод оптимизации фильтров СВЧ, описанный в [9]. Тип частотной дисперсии коэффициентов связи задаем общим для всех контуров фильтра соотношением  $k_L : k_C$ , где  $k_L$  и  $k_C$  – значения коэффициентов индуктивной и емкостной связи контуров на их резонансной частоте, вычисляемые по формулам (7) и (8).

#### Коэффициенты связи

$k_L : k_C$	$Q_e^{-1}$	$k_{12}$	$k_{23}$	$k_{34}$
Формулы прямого синтеза Кона-Маттея (1)				
–	0.2882	0.2826	0.2189	0.2116
Уточненные формулы прямого синтеза (3)				
–	0.2912	0.2745	0.2151	0.2081
Метод оптимизации				
1) 0 : 1	0.3284	–0.2968	–0.2625	–0.2507
2) 1 : 1	0.3057	–0.2773	–0.2224	–0.2147
3) 1 : 0	0.2864	$\pm 0.2657$	$\pm 0.2017$	$\pm 0.1984$
2 : 1	0.3008	–0.2740	–0.2148	–0.2084

Примечание: 1–3 – кривые на рис. 2.

#### 4. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены результаты синтеза шестизвенного фильтра. В ней содержатся значения обратной величины внешней добротности  $Q_e$  для окончных контуров и коэффициентов связи  $k_{i,i+1}$  для смежных пар контуров на центральной частоте полосы пропускания фильтра.

Обратная величина внешней добротности вычислялась по формуле

$$Q_e^{-1} = \sqrt{L_1/C_1}/R_0, \quad (9)$$

то есть влияние на нее связей с соседним контуром не учитывалось, как и при выводе формул синтеза (1) и (3).

Видно, что реальные значения коэффициентов связи  $k_{i,i+1}$ , получаемые оптимизацией фильтра, существенно зависят от соотношения индуктивной и емкостной составляющих этих коэффициентов. Расчетные же значения этих коэффициентов, получаемые как по приближенным, так и уточненным формулам синтеза, находятся для рассмотренного случая в пределах диапазона возможной вариации реальных значений.

Расчетные значения  $k_{i,i+1}$ , полученные по уточненным формулам (3), наиболее точно описывают тип связей, когда индуктивная и емкостная составляющие коэффициента связи на резонансной частоте соотносятся как 2 : 1 (см. последнюю строку таблицы).

Наблюдается зависимость величины  $Q_e^{-1}$  от соотношения индуктивной и емкостной составляющих коэффициентов связи контуров, несмотря на то, что способ связи окончных контуров с внешним трактом СВЧ не меняется. Можно предположить, что это есть ложная зависимость, возникающая в результате использования упрощенной формулы (9), в которой игнорируются межконтурные связи. Однако расчет по уточненной формуле

$$Q_e^{-1} = \sqrt{\frac{L_1 - L_4^2/L_2}{C_1 + C_4}}/R_0 \quad (10)$$

не подтверждает такое предположение. В этом случае величина  $Q_e^{-1}$  в порядке нумерации строк принимает значения 0.2755, 0.2832, 0.2761, 0.2842.

Сопоставление пронумерованных графиков на рис. 2 со значениями коэффициентов  $k_{i,i+1}$  в пронумерованных строках таблицы позволяет сделать вывод, что чем больше наклон дисперсионной кривой, то есть  $dk_{i,i+1}/d\omega$ , тем больше должно быть значение коэффициента связи  $k_{i,i+1}$  на центральной частоте полосы пропускания фильтра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено влияние соотношения индуктивной и емкостной составляющих коэффициента связи пары параллельных колебательных контуров на частотную зависимость этого коэффициента. Показано, что увеличение доли емкостной составляющей приводит к увеличению наклона кривой частотной зависимости коэффициента связи.

На примере синтеза широкополосного шестизвенного фильтра на параллельных колебательных контурах с комбинированной связью исследована зависимость оптимальных (для частотной характеристики фильтра) значений коэффициентов связи контуров от соотношения их индуктивной и емкостной составляющих. Сравняются реальные значения коэффициентов связи в настроенном фильтре со значениями, получаемыми по формулам прямого синтеза. Показано, что увеличение доли емкостной составляющей в коэффициентах

связи требует увеличения этих коэффициентов. Это означает, что значения коэффициентов связи резонаторов фильтра СВЧ, вычисляемые по формулам прямого синтеза, следует умножать на некий поправочный коэффициент порядка единицы, который должен возрастать при увеличении наклона кривой частотной зависимости коэффициента связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (программа поддержки ведущих научных школ НШ-6612.2006.3).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cohn S.B.* // Proc. IRE. 1957. V. 45. P. 187.
2. *Мамтей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971.
3. *Тюрнев В.В.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 5. С. 584.
4. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* // Электрон. техника. Сер. СВЧ-техника. 1992. № 4. С. 23.
5. *Тюрнев В.В.* // РЭ. 2002. Т. 47. № 1. С. 5.
6. *Belevitch V.* // Wireless Engineer. 1952. V. 29. P. 106.
7. *Orchard H.J.* // Wireless Engineer. 1953. V. 30. P. 3.
8. *Тюрнев В.В., Беляев Б.А.* // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. № 4. С. 25.
9. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* // 16-я Междунар. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2006). Севастополь, 11–15 сент. 2006 г.: Материалы конф. Севастополь: Вебер, 2006. Т. 2. С. 517.