

*Замешаева Е.Ю., Холодняк Д.В., Воробьев Е.Н.,
Тургалиев В.М.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Частотная перестройка фильтров с двумя полосами пропускания на элементах с сосредоточенными параметрами при использовании конденсаторов с переменной емкостью

Анализируются возможности перестройки центральных частот двухполосных полосно-пропускающих фильтров на элементах с сосредоточенными параметрами, использующих двухчастотные инверторы сопротивления и проводимости с переменными конденсаторами. Показано, что перестройка центральных частот полос пропускания фильтра может осуществляться как по отдельности, так и совместно (однонаправлено или разнонаправлено). В зависимости от выбранного способа перестройки, обеспечивается различный диапазон изменения каждой из центральных частот, который ограничен допустимым уровнем коэффициента отражения в полосе пропускания.

Ключевые слова: инверторы сопротивления и проводимости, полосно-пропускающие фильтры, элементы с сосредоточенными параметрами, перестройка.

Интерес к созданию перестраиваемых полосно-пропускающих фильтров (ППФ) вызван необходимостью адаптации частотных характеристик фильтров к различным рабочим условиям в многополосных информационно-телекоммуникационных системах с динамическим перераспределением спектра рабочих частот. Использование перестраиваемых ППФ с двумя полосами пропускания позволяет снизить требования к управляющим элементам в части необходимого коэффициента перестройки.

Ключевыми элементами для создания ППФ с двумя полосами пропускания служат двухчастотные инверторы сопротивления и проводимости. Поведение инверторов сопротивления и проводимости в полосе частот оказывает существенное влияние на характеристики фильтров, в том числе на возможности их перестройки по частоте.

Для практических применений в нижней части СВЧ-диапазона представляют интерес малогабаритные двухчастотные инверторы сопротивления, выполненные на элементах с сосредоточенными параметрами. С целью повышения частотной избирательности ППФ, целесообразно использовать двухчастотные инверторы сопротивления, имеющие дополнительные нули передаточной характеристики между рабочими частотами [1]-[6].

В [3]-[6] исследовались возможности перестройки рабочих частот таких двухчастотных инверторов сопротивления и проводимости при использовании в их составе конденсаторов с переменной емкостью. Было показано, что изменение емкостей конденсаторов ведет к перестройке рабочих частот инвертора. Однако в то же время изменяется входной импеданс инвертора, что может негативно сказываться на характеристиках двухполосного ППФ, в составе которого используется инвертор, а именно приводит к изменению ширины полос пропускания фильтра и уровня коэффициента отражения в полосах пропускания. Таким образом, диапазон перестройки

рабочих частот инвертора, а, следовательно, и диапазон перестройки центральных частот полос пропускания ППФ, использующего такой инвертор, ограничен допустимым уровнем рассогласования по входу.

В данной работе детально исследуются возможности перестройки двухзвенных ППФ с двумя полосами пропускания, использующих двухчастотные инверторы сопротивления и проводимости с переменными конденсаторами в качестве управляющих элементов.

На рис. 1 показаны эквивалентные схемы двухзвенных ППФ с двумя полосами пропускания, в составе которых используются двухчастотные инверторы сопротивления и проводимости, выполненные по П-образной и Т-образной схемам. Данные схемы являются дуальными, поэтому частотные характеристики обоих фильтров идентичны.

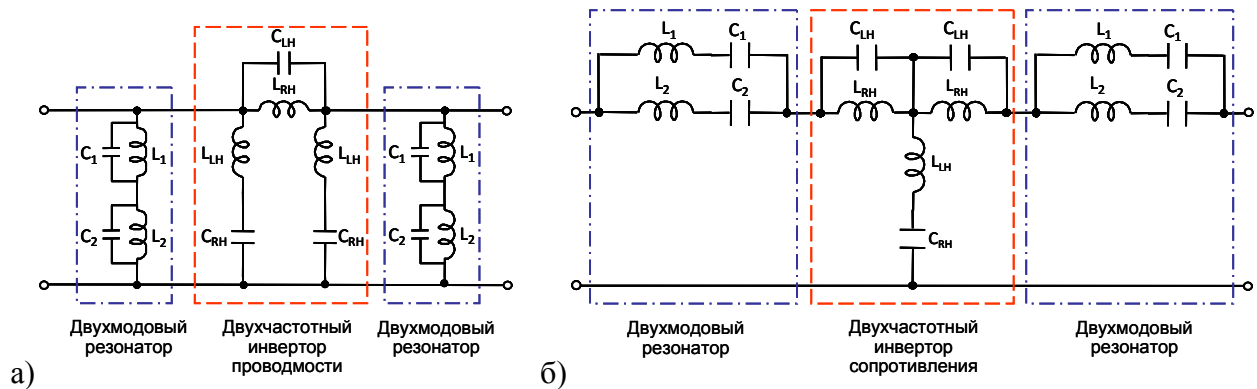


Рис. 1.

Для заданных рабочих частот f_1 и f_2 и коэффициентов инверсии $K_1(f_1)$ и $K_2(f_2)$ расчет параметров инверторов в начальном состоянии осуществляется по формулам:

$$C_{RH} = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 K_1 + \omega_1 K_2)}, \quad L_{RH} = \frac{K_1 K_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_1 K_1 + \omega_2 K_2)},$$

$$C_{LH} = \frac{\omega_2 K_1 + \omega_1 K_2}{K_1 K_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}, \quad L_{LH} = \frac{\omega_2 K_2 + \omega_1 K_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2},$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Определим коэффициенты перестройки емкостей в составе двухчастотного инвертора сопротивления и проводимости, как

$$p = \frac{C'_{LH}}{C_{LH}} \quad \text{и} \quad q = \frac{C'_{RH}}{C_{RH}},$$

где C_{LH} и C_{RH} – начальные значения емкостей (до перестройки), C'_{LH} и C'_{RH} – конечные значения емкостей (после перестройки).

Значения параметров p и q , необходимые для перестройки рабочих частот инвертора к новым значениям f'_1 и f'_2 , в случае $K_1(f_1) = K_2(f_2)$ определяются выражениями:

$$p = \frac{\frac{b^2}{a^2} A^2 + 1 - \frac{b}{a} A \sqrt{\frac{b^2}{a^2} A^2 + \frac{a^2}{b^2 A^2} + 6} - 4 \left(A + \frac{1}{A} \right)}{2b^2 A},$$

$$q = \frac{1 - \frac{a^2}{b^2 A^2} + \frac{a}{bA} \sqrt{\frac{b^2}{a^2} A^2 + \frac{a^2}{b^2 A^2} + 6 - 4 \left(A + \frac{1}{A} \right)}}{(A-1) \left(2 \frac{A-1}{A} + \frac{A}{A-1} - \frac{1}{A-1} \left(\frac{a^2}{b^2 A^2} - \frac{a}{bA} \sqrt{\frac{b^2}{a^2} A^2 + \frac{a^2}{b^2 A^2} + 6 - 4 \left(A + \frac{1}{A} \right)} \right) \right)},$$

где $a = f'_1/f_1$, $b = f'_2/f_2$, $A = f_2/f_1$.

Условия физической реализуемости требуют, чтобы значения емкостей после перестройки были вещественными и неотрицательными. Для этого коэффициенты перестройки рабочих частот инвертора a и b должны удовлетворять ограничению:

$$b > \frac{a}{A} \sqrt{-3 + 2 \left(A + \frac{1}{A} \right) + 2 \sqrt{\left(A + \frac{1}{A} \right)^2 - 3 \left(A + \frac{1}{A} \right) + 2}},$$

или

$$0 < b < \frac{a}{A} \sqrt{-3 + 2 \left(A + \frac{1}{A} \right) - 2 \sqrt{\left(A + \frac{1}{A} \right)^2 - 3 \left(A + \frac{1}{A} \right) + 2}}.$$

Область допустимых значений параметров a и b показана на рис. 2 штриховкой для случая $A = 1,5$. Относительное изменение емкостей схемы инвертора в зависимости от значений a и b представлено на рис. 3.

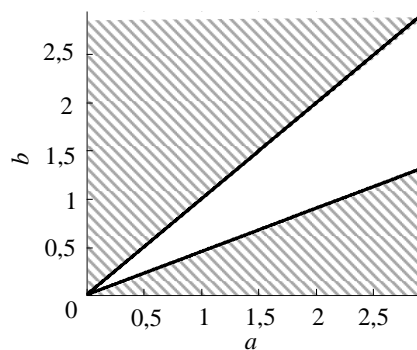


Рис. 2

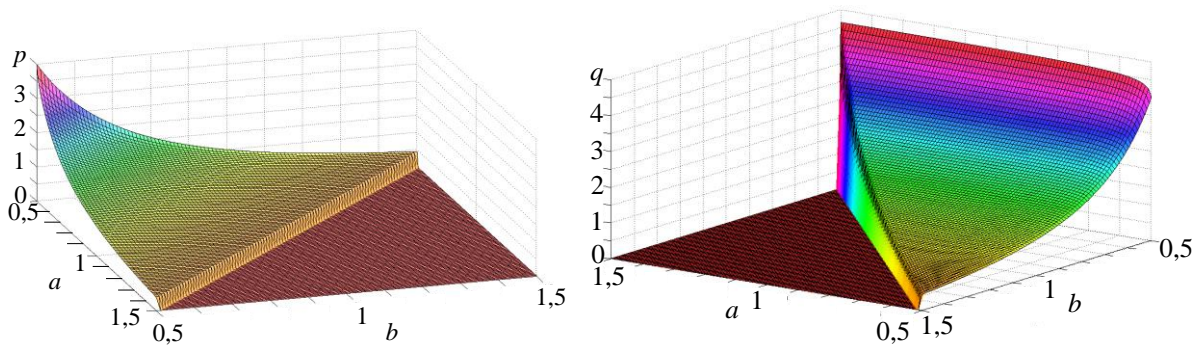


Рис. 3

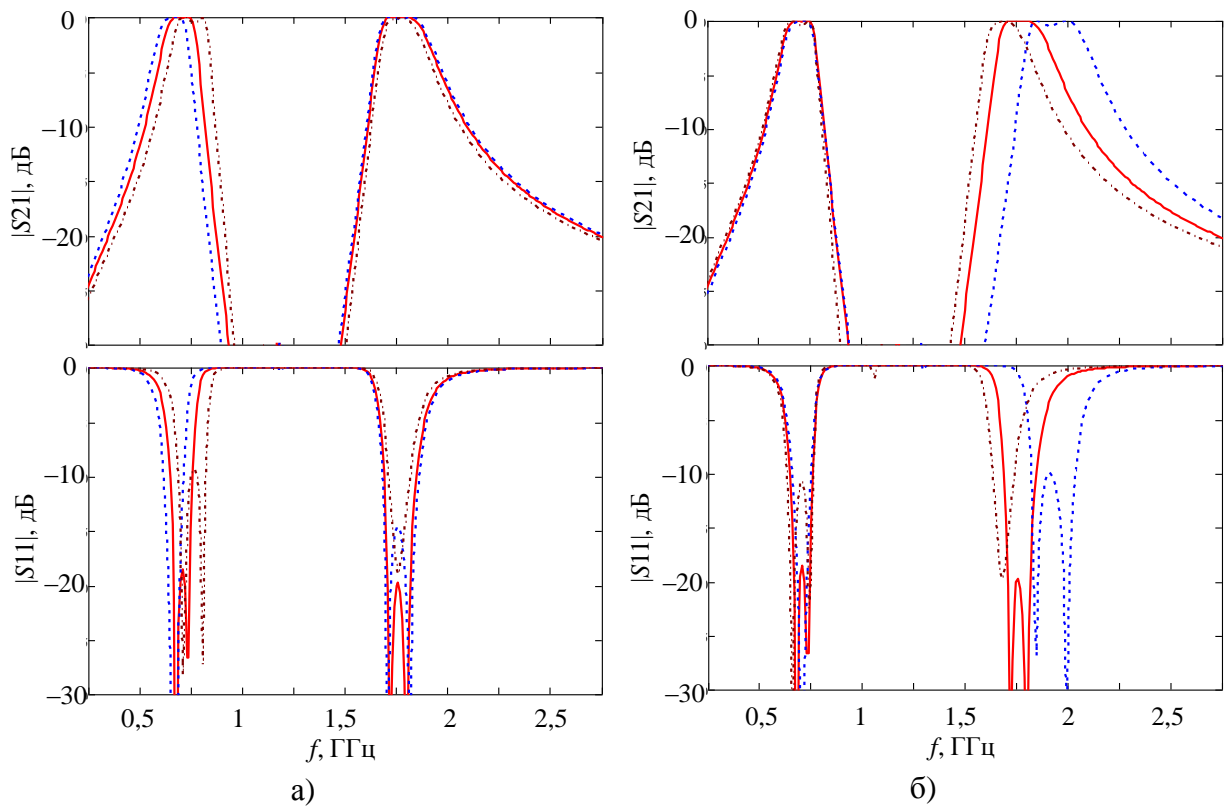
В случае перестройки только одной рабочей частоты при сохранении неизменной второй рабочей частоты инвертора ($f_1 = \text{var}$, $f_2 = \text{const}$) коэффициенты перестройки емкостей связаны соотношением

$$p = \frac{qA^2 - qA + q - 1}{qA^2 - A}. \quad (1)$$

При $f_1 = \text{const}$, $f_2 = \text{var}$ взаимосвязь коэффициентов p и q определяется выражением

$$p = \frac{qA^2 - qA + q - A^2}{q - A}. \quad (2)$$

С учетом найденных ограничений на перестройку емкостей двухчастотного инвертора сопротивления и проводимости были проанализированы возможности независимой и совместной перестройки центральных частот полос пропускания двухзвенного ППФ, имеющего в начальном состоянии параметры: $f_1 = 0,72$ ГГц, $f_2 = 1,75$ ГГц, $\Delta f_1 = 110$ МГц, $\Delta f_2 = 130$ МГц, $K_1(f_1) = K_2(f_2) = 55,24$ Ом. Соответствующие значения элементов схемы (рис. 1-б) составляют: $L_1 = 48,03$ нГн, $C_1 = 1,02$ пФ, $L_2 = 40,64$ нГн, $C_2 = 0,20$ пФ, $L_{RH} = 7,19$ нГн, $C_{RH} = 2,36$ пФ, $L_{LH} = 8,54$ нГн, $C_{LH} = 2,80$ пФ. Полученные амплитудно-частотные характеристики фильтра для различных вариантов перестройки центральных частот показаны на рис. 4. На графиках сплошными линиями показано начальное состояние фильтра: $f_1 = 0,72$ ГГц, $f_2 = 1,75$ ГГц. В таблице приведены диапазоны перестройки центральных частот двухполосного ППФ, соответствующие различным значениям допустимого коэффициента отражения в полосах пропускания.



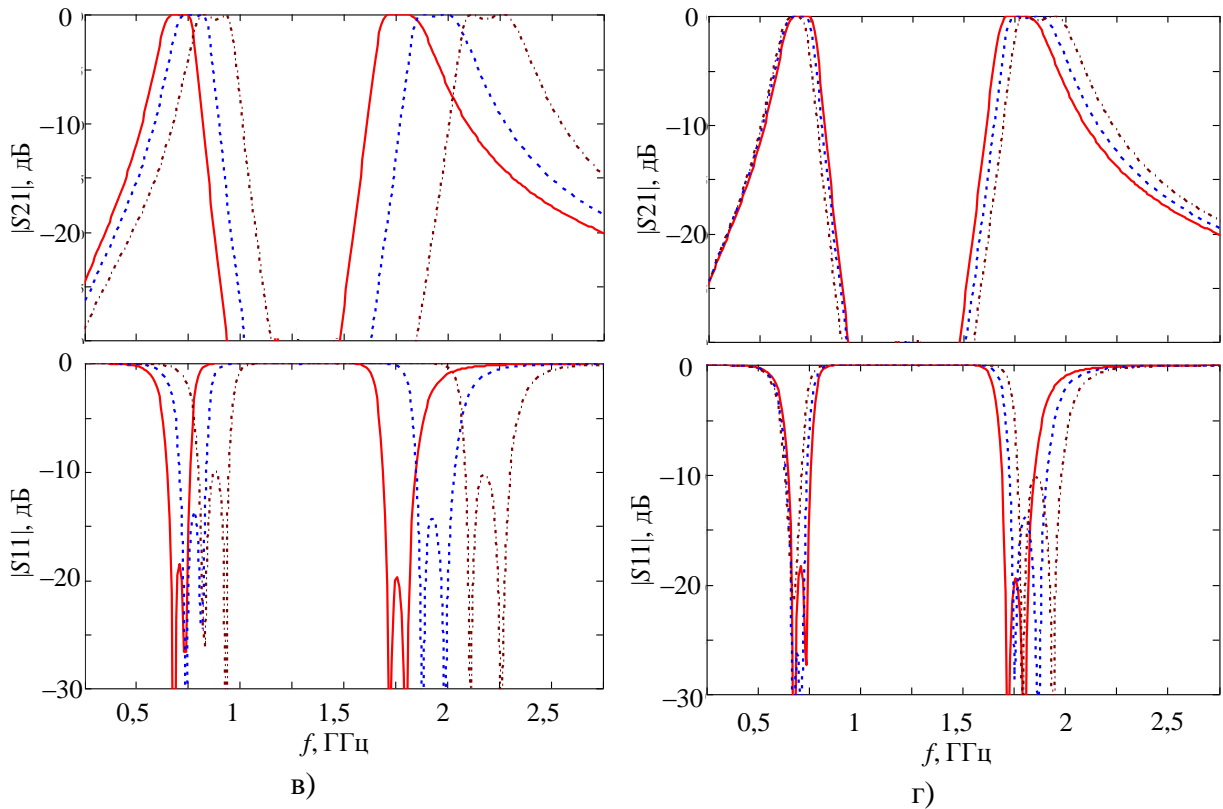


Рис. 4.

Таблица

	Перестройка рабочих частот	$ S_{11} \leq -15$ дБ		$ S_{11} \leq -10$ дБ	
		f_1'/f_1	f_2'/f_2	f_1'/f_1	f_2'/f_2
Рис. 4-а	$f_1 = \text{const}, f_2 = \text{var}$	1	0,98-1,03	1	0,94-1,08
Рис. 4-б	$f_1 = \text{var}, f_2 = \text{const}$	0,98-1,02	1	0,95-1,06	1
Рис. 4-в	$f_1'/f_1 > 1, f_2'/f_2 > 1, f_2'/f_1' = \text{const}$	1-1,1	1-1,1	1-1,24	1-1,24
Рис. 4-г	$f_1'/f_1 < 1, f_2'/f_2 > 1$	0,99-1	1-1,03	0,96-1	1-1,06

Перестройка центральных частот двухполосных ППФ, использующих рассматриваемые двухчастотные инверторы сопротивления и проводимости с переменными конденсаторами, может осуществляться как по отдельности, так и совместно (однаправлено или разнонаправлено). В зависимости от выбранного способа перестройки, обеспечивается различный диапазон изменения каждой из центральных частот, который ограничен допустимым уровнем коэффициента отражения в полосе пропускания. Наибольшая перестройка достигается при совместном однаправленном изменении центральных частот (рис. 4-в). При изменении только одной центральной частоты при неизменной другой достигается меньший диапазон перестройки, т. к. при этом коэффициенты p и q связаны однозначными зависимостями (1) и (2). Наиболее критичным является случай совместного разнонаправленного изменения центральных частот фильтра (рис. 4-г).

Библиографический список

1. Двухчастотный инвертор проводимости/сопротивления на основе одномерных метаматериалов, имеющий полосу запирания между рабочими частотами: пат. 2463690 Рос. Федерация: МПК H01P 5/00 / Д. В. Холодник, П. А. Туральчук, Е. Ю. Замешаева; заявитель и патентообладатель Корпорация "Самсунг Электроникс Ко., Лтд." (KR), ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский гос. электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)" (RU). –№ 2010101848; заявл. 21.01.10; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28. – 13 с.
2. Kholodnyak D. Dual-band immittance inverters on dual-composite right/left-handed transmission line (D-CRLH TL) / D. Kholodnyak, V. Turgaliev, E. Zameshaeva, // Proc. 9th German Microwave Conference Nuremberg, Germany. – 2015. – P. 60-63.
3. Замешаева Е. Ю. Перестраиваемые двухчастотные инверторы сопротивления на элементах с сосредоточенными параметрами, управляемые переменными конденсаторами / Е. Ю. Замешаева, В. М. Тургалиев, Е. Н. Воробьев, Д. В. Холодник, // Сб. трудов 4-й всероссийской конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ 2015", Санкт-Петербург. – 2015. – Т.1. – С.134-138.
4. Kholodnyak D. Tunability of dual-frequency immittance inverters on dual-composite right/left-handed transmission lines (D-CRLH TL) with variable capacitors / D. Kholodnyak, E. Zameshaeva, V. Turgaliev, E. Vorobev // Proc. 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Sendai, Japan. – 2015. – P. 64-66.
5. Kholodnyak D. Tunable dual-frequency immittance inverters on dual-composite right/left-handed transmission line / D. Kholodnyak, E. Zameshaeva, V. Turgaliev, E. Vorobev // Proc. 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil. – 2015.– P.1-5.
6. Kholodnyak D. Tunable Dual-Frequency Immittance Inverters on Dual-Composite Right/Left-Handed Transmission Lines (D-CRLH TL) with Variable Capacitors / D. Kholodnyak, E. Zameshaeva, V. Turgaliev, E. Vorobev // IEICE Transactions on Electronics, 2016, Vol.E99-C, No.10, pp.1113-1121.