

Тюменцев А.И., Хроленко Т.С.
АО Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Полосовые перестраиваемые фильтры СВЧ

Рассмотрены вопросы построения схем полосовых перестраиваемых фильтров СВЧ диапазона с использованием варикапов. Приведены расчетные соотношения для элементов схемы. Показана возможность трансформации элементов схемы с целью достижения необходимых номиналов.

Ключевые слова: полосовые перестраиваемые фильтры, ЛТСС, трансформации элементов, трансформатор Нортон.

В малогабаритной аппаратуре связи для обеспечения работы в нескольких диапазонах частот используют полосовые перестраиваемые фильтры (ППФ). Особенностью проектирования ППФ для малогабаритных устройств является минимизация их габаритных размеров. В настоящее время в качестве управляющих компонентов в таких фильтрах используются различные типы конденсаторов переменной емкости: варикапы, сегнетоэлектрические вариконды, микроэлектромеханические переменные конденсаторы. Как показано в [1] для нижней части СВЧ диапазона наиболее целесообразно в качестве управляющих элементов, перестраиваемых СВЧ-фильтров использовать варикапы.

Количество схем пригодных для реализации полосовых перестраиваемых фильтров весьма ограничено ввиду не реализуемости элементов схемы. Однако, существует несколько путей решением этой проблемы. Одним из таких решений является применение трансформаторов Нортон, которое будет рассмотрено в данной работе.

Предварительные расчеты схем ППФ показали, что емкости конденсаторов в таких схемах получаются большими [2] и для замены варикапами необходимо уменьшить их значения до номинала порядка единиц-десятков пФ. Кроме того, для уменьшения массогабаритных показателей необходимо, чтобы схема ППФ обладала максимальным коэффициентом перестройки.

Как было показано в работе [3] для построения перестраиваемых фильтров с большим коэффициентом перестройки по частоте необходимо использовать схемы фильтров имеющие четный класс по характеристическому затуханию. Одна из таких схем приведена на рис. 1

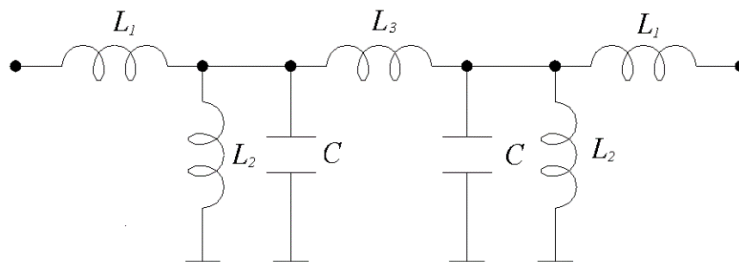


Рис. 1. Схема полосового фильтра второго класса по характеристическому затуханию

Поскольку схема симметрична, ей будет эквивалентен симметричный мостовой фильтр, сопротивления ветвей которого показаны на рис. 2а, а их частотные зависимости на рис. 2б.

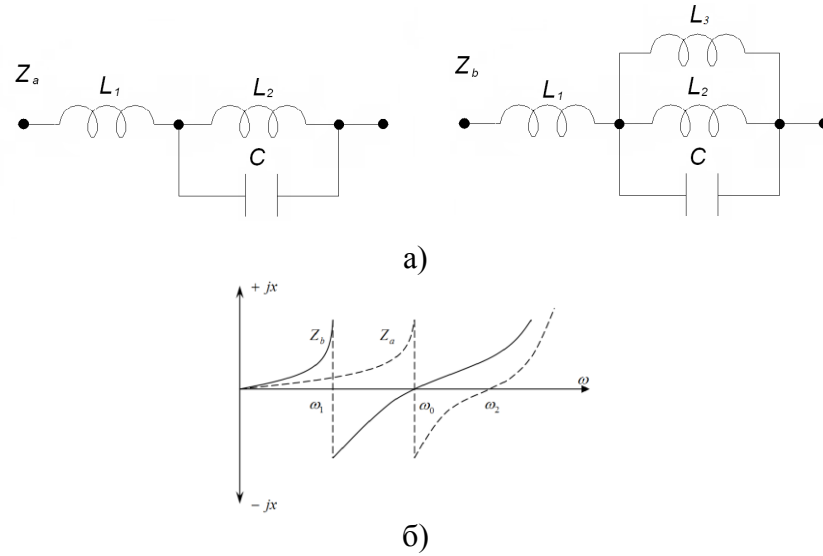


Рис. 2. Электрические схемы сопротивлений Z_a и Z_b (а) и частотные зависимости (б) мостового четырехполюсника

В соответствии с обозначениями (рис. 2) сопротивления ветвей Z_a и Z_b могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 Z_a &= \frac{p(L_1 + L_0) + p^3 L_1 L_0 C}{1 + p^2 L_0 C} = pL_1 \frac{\omega_2^2 - \omega^2}{\omega_{02}^2 - \omega^2}, \\
 Z_b &= \frac{p(L_1 + L_2) + p^3 L_1 L_2 C}{1 + p^2 L_2 C} = pL_1 \frac{\omega_{01}^2 - \omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2}, \\
 \omega_1^2 &= \frac{1}{L_2 C}, \quad \omega_2^2 = \frac{L_1 + L_0}{L_1 L_0 C}, \quad L_0 = \frac{L_2 L_3}{L_2 + L_3}, \quad \omega_{01} = \frac{1}{L_0 C}, \quad \omega_{02}^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Чтобы частота последовательного резонанса двухполюсника Z_a совпала с частотой параллельного резонанса двухполюсника Z_b ($\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$) необходимо выполнить следующее условие:

$$L_3 = L_1 \tag{2}$$

Для номинального характеристического сопротивления $Z_m = \sqrt{Z_a Z_b}$ при $\omega = \omega_0$ получим:

$$Z_m = \omega_0 L_1 \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega_1^2}} \tag{3}$$

Из соотношения (1), (2), (3) получим формулы для расчета элементов схемы:

$$L_1 = L_3 = \frac{Z_m}{\omega_0} \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_0^2}}, L_2 = L_1 \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{2\omega_0^2 - \omega_2^2}, C = \frac{1}{L_1 \omega_1^2}. \quad (4)$$

Номинал значения конденсатора может быть приведен к заданному, удобному для реализации, поскольку пара катушек индуктивности L_1 и L_2 позволяет при использовании преобразователей Нортона трансформировать величины C и L_3 в достаточно широких пределах. Введение идеального трансформатора с коэффициентом трансформации $n > 1$ после пары катушек индуктивности L_1 и L_2 позволяет уменьшить величину C и увеличить L_3 в N^2 раз [4].

При этом максимальный коэффициент трансформации определяется следующим образом:

$$N = 1 + \frac{L_1}{L_2} \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (5)$$

При необходимости получить меньшее значение индуктивности L_3 следует использовать промежуточное преобразование исходной схемы разделив катушку индуктивности L_2 на две параллельно соединенные индуктивности и одну из них подключить к входу индуктивности L_3 . Прделав аналогичное преобразование на выходе фильтра, получим П-образную секцию, состоящую из трех катушек индуктивности, которую с помощью преобразования преобразуем в Т-образную индуктивную секцию. Индуктивности последней будут иметь меньшие номиналы.

В результате всех проведенных преобразований получаем схему фильтра, представленную на рис.3.

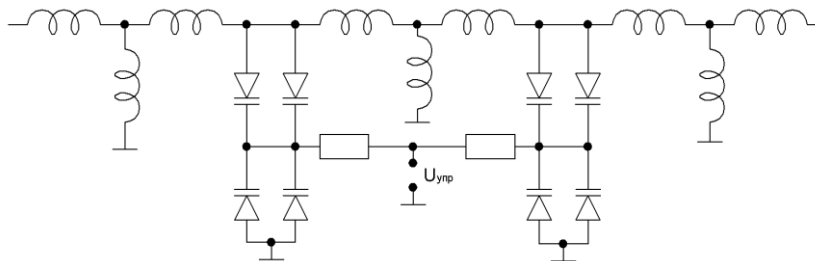


Рис. 3. Схема фильтра после преобразований

Полученная схема была взята за основу для реализации ППФ на рабочий диапазон частот от 700 до 1000 МГц. В ходе работы разработана топология фильтра, представленная на рис. 4. В качестве подложки использованы 20 слоев керамики DuPont Green Type 951PT. Габаритные размеры фильтра составили 10x5x2 мм.

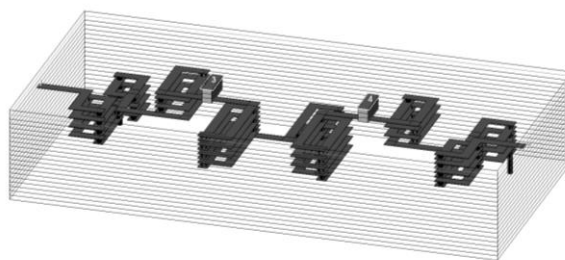


Рис. 4. Конструкция фильтра

Моделирование разработанной конструкции проведено в специализированном САПР, где в качестве управляющего элемента использован варикап SMV1235 фирмы Skyworks [5]. Как видно из полученных графиков (рис. 5), схема имеет достаточно большой диапазон перекрытия по частоте равный 2 (который в основном ограничен диапазоном перестройки варикапа) и малые вносимые потери (не более 3 дБ) во всем диапазоне рабочих частот.

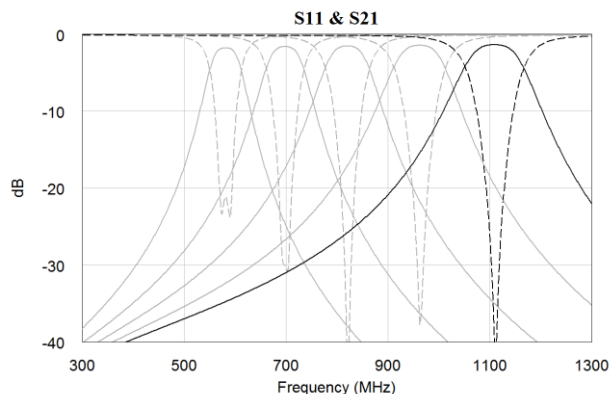


Рис. 5. Расчетная АЧХ фильтра

Таким образом в работе показана возможность трансформации схемы перестраиваемого ППФ для применения в малогабаритной аппаратуре связи с обеспечением достаточно большого коэффициент перекрытия (от 550 до 1100 МГц) и малых вносимых потерь во всем диапазоне частот (не более 3 дБ).

Библиографический список

1. Баскакова А.Э. Перестраиваемые фильтры СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами: Дис. кан. тех. наук – Сп-б.–2016. – 116 с.
2. Знаменский А.Е. Перестраиваемые электрические фильтры [текст]/ Знаменский А.Е., Попов Е.С. – М.: Связь, 1979. – 128 с.
3. Тюменцев А.И. Улучшение параметров полосовых LC-фильтров путем преобразования мостовых звеньев в неуровненные лестничные: Дис. кан. тех. наук – Омск.–2013. – 156 с.
4. Черне, Х.И. Индуктивные связи и трансформации в электрических фильтрах [текст] / Х.И. Черне. – М.: Связьиздат, 1962. – 316 с.
5. Skyworks Solutions, Inc. [Электронный ресурс] URL: <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/200058Q.pdf> (дата обращения:25.01.2017)