

# Схемотехнический базис сверхминиатюрных высокоизбирательных СВЧ-фильтров на основе Y-звеньев.

## Часть 2. Y-звенья с дополнительными связями

**Ключевые слова:** сверхминиатюрный, высокоизбирательный, СВЧ фильтр, Y-звено, полюс затухания, распределенно-сосредоточенный, схемотехника.

**Аристархов Г.М.,**  
д.т.н., профессор, зав. кафедрой  
"Электроники", МТУСИ,  
g.aristarkhov2010@yandex.ru

**Арсенин А.В.,**  
военнослужащий по контракту, г. Москва;  
el-dorado@yandex.ru

**Аринин О.В.,**  
аспирант МТУСИ,  
bishounen99@gmail.com

В первой части статьи [1] были рассмотрены частотные свойства сверхминиатюрных полосно-пропускающих канонических Y-звеньев, реализуемых в базе распределенно-сосредоточенных цепей. Исследуем возможность повышения частотной избирательности этих звеньев за счет введения дополнительной емкостной связи через конденсаторы  $C_2$  и  $C_{22}$  согласно схемам, представленным в табл. 1. Емкость конденсаторов  $C_2$  определяет степень возбуждения Y-звеньев, а  $C_{22}$  формирует еще один параллельный путь передачи энергии в эквивалентном четырехполюснике [2]. Введение этих емкостных элементов обуславливает повышение порядка парциальных двухполюсников  $Z_a$  уравновешенных схем замещения, что определяет возможность формирования в Y-звеньях дополнительных полюсов затухания (табл. 1, структуры 1.1-1.4).

Представляет интерес исследование механизмов формирования частотных характеристик Y-звеньев на примере одной из этих структур. В качестве такой структуры выберем Y-звено структуры 1.2, в котором возможно формирование трех полюсов рабочего затухания на конечных частотах. На рис. 1,а представлены частотные зависимости импедансов  $X_a$ ,  $X_b$  и рабочего затухания. На частотах  $f_{\infty i}$ , на которых выполняются условия баланса импедансов  $X_a(f_{\infty i}) = X_b(f_{\infty i})$ , формируются полюсы затухания, а в области частот, где  $X_a$  и  $X_b$  имеют различные знаки — полоса пропускания. Частоты  $f_{0i}$ , на которых формируются нули рабочего затухания, определяются согласно [1] из условия:

Исследованы новые схемотехнические решения канонических структур сверхминиатюрных Y-звеньев, которые в зависимости от выбора параметров элементов обеспечивают повышенную частотную избирательность за счет формирования нескольких полюсов затухания на конечных частотах. Исследованы частотные свойства этих звеньев и дана их классификация по типу реализуемых частотных характеристик. Во второй части статьи даны Y-звенья с дополнительными связями.

Таблица №1. Y-звенья с дополнительными связями

№	Структура Y-звена и схемы замещения	Частотные зависимости коэффициента передачи и КСВН	Параметр элемента
1			$l_1 = 0,008784 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,003314 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{oc} = Z_1 = Z_0 = 50\Omega)$ $C_1 = 29,6 \text{ пФ}$ $C_{11} = 15,31 \text{ пФ}$ $C_2 = 6,77 \text{ пФ}$ $C_{22} = 0,1 \text{ пФ}$
1.1			$l_1 = 0,00971 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,00354 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{oc} = Z_1 = Z_0 = 50\Omega)$ $C_1 = 31,62 \text{ пФ}$ $C_{11} = 7,08 \text{ пФ}$ $C_2 = 13,9 \text{ пФ}$ $C_{22} = 1,132 \text{ пФ}$
1.2			$l_1 = 0,0486 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,0208 \cdot \lambda$ $l_{ш} = 0,02554 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{oc} = Z_1 = Z_0 = Z_{ш} = 50\Omega)$ $C_{11} = 13,87 \text{ пФ}$ $C_0 = 8,57 \text{ пФ}$ $C_2 = 11,16 \text{ пФ}$ $C_{22} = 0,14 \text{ пФ}$
			$l_1 = 0,02926 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,00546 \cdot \lambda$ $l_{ш} = 0,02011 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{oc} = Z_1 = Z_0 = Z_{ш} = 50\Omega)$ $C_{11} = 21,7 \text{ пФ}$ $C_0 = 15,2 \text{ пФ}$ $C_2 = 75 \text{ пФ}$ $C_{22} = 0,8 \text{ пФ}$

Таблица №1. (Окончание)

1	2	3	4
1.3	<p> <math>C_a = C_1 + 2 \cdot C_{11}</math>  <math>L_0 = \frac{L_1 \cdot L_{ш}}{L_1 + L_{ш}}</math> </p>		$l_1 = 0,008246 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,004293 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{\infty} = Z_1 = Z_0 = 50\Omega)$ $C_1 = 14,57 \text{ пФ}$ $C_{11} = 24,86 \text{ пФ}$ $C_0 = 69,9 \text{ пФ}$ $C_2 = 38 \text{ пФ}$ $C_{22} = 0,821 \text{ пФ}$
1.4	<p> <math>L_a = \frac{L_1 \cdot L_{ш}}{L_1 + L_{ш}}</math> </p>		$l_1 = 0,0407 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,06485 \cdot \lambda$ $l_{ш} = 0,02393 \cdot \lambda$ $(Z_{\infty} = Z_{\infty} = Z_1 = Z_0 = Z_{ш} = 50\Omega)$ $C_1 = 14,73 \text{ пФ}$ $C_0 = 23,8 \text{ пФ}$ $C_2 = 75 \text{ пФ}$ $C_{22} = 0,958 \text{ пФ}$

$$1 + \hat{X}_a(f_{0i}) \cdot \hat{X}_b(f_{0i}) = 0 \quad (1)$$

Таким образом, чтобы выполнялось условие баланса импедансов на нескольких частотах  $f_{\infty i}$  одновременно, необходимо частотным зависимостям  $X_a$  и  $X_b$  придать определенный специфический характер. Очевидно, что необходимое поведение частотных зависимостей  $X_a$  и  $X_b$  будет меняться в зависимости от взаимного расположения полюсов и нулей рабочего затухания. Синтез Y-звеньев по всем наперед заданным полюсам и нулям не всегда может быть осуществим, так как могут быть нарушены условия физической реализуемости. Поэтому при синтезе этого Y-звена можно достаточно произвольно задаваться ограниченным числом полюсов затухания — двумя ближайшими к полюсе пропускания, а для третьего полюса затухания определяется частотная область его расположения, относительно полосы пропускания.

Наряду с механизмом формирования рабочего затухания важно знать частотное поведение группового времени запаздывания (ГВЗ) (рис. 1,б), которое определяется согласно [3] через нормированные относительно сопротивления нагрузки импедансы парциальных двухполюсников уравновешенной мостовой схемы замещения следующим образом:

$$\tau = \tau_a + \tau_b = \frac{1}{1 + \hat{X}_a^2} \cdot \frac{d\hat{X}_a}{df} + \frac{1}{1 + \hat{X}_b^2} \cdot \frac{d\hat{X}_b}{df} \quad (2)$$

Для рассматриваемой структуры ГВЗ имеет ярко выраженный седловидный характер со значительной неравномерностью в полосе пропускания вследствие формирования полюсов затухания вблизи полосы пропускания только в области нижних частот.

Заметим, что отличительной особенностью этих структур, имеющих три параллельных пути передачи энергии, от базовых Y-звеньев является возможность вырождения при определенном

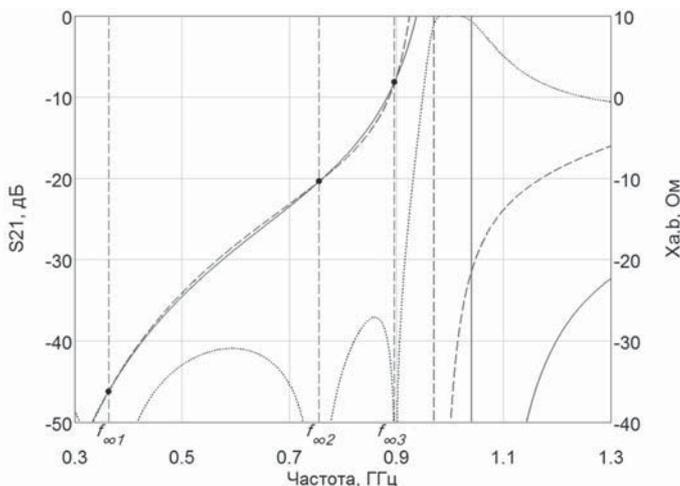


Рис.1а. Частотные зависимости импедансов  $X_a$ ,  $X_b$  и рабочего затухания

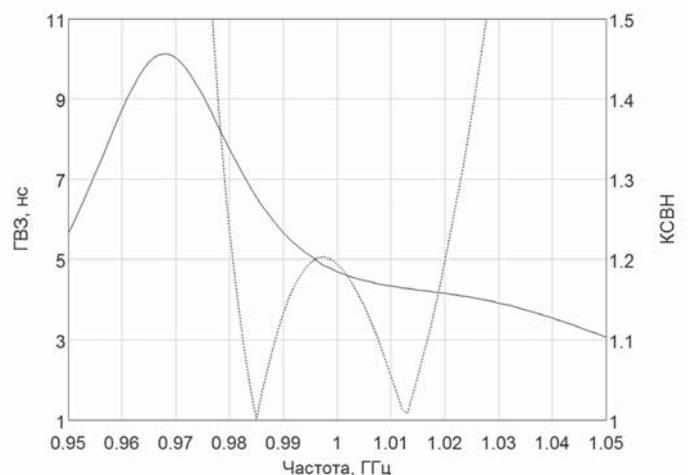


Рис.1б. Частотные зависимости группового времени запаздывания и КСВН

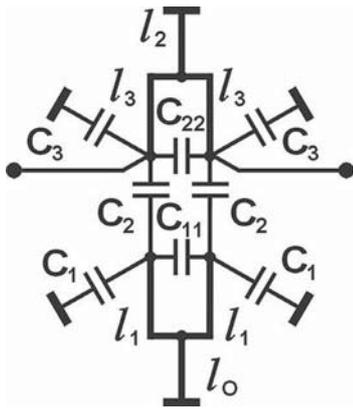


Рис. 2. Y-звено, параллельно охваченное дополнительным Y-звеном

соотношении параметров элементов полюсов затухания на конечных частотах. В этом случае цепь становится неминимально-фазовой.

Учитывая выше отмеченную особенность Y-звеньев с параллельными путями передачи энергии, проиллюстрируем возможность линеаризации в полосно-пропускающей структуре ее фазо-частотной характеристики. Для этого основное Y-звено параллельно охватим дополнительным Y-звеном согласно схеме, представленной на рис. 2. При этом все отрезки линий передач малы и их электрические длины равны  $l_0 = 0,002187 \cdot \lambda$ ,  $l_1 = 0,005602 \cdot \lambda$ ,  $l_2 = 0,001013 \cdot \lambda$ ,  $l_3 = 0,001298 \cdot \lambda$ , а значения емкостей  $C_1 = 13,72$ ;  $C_{11} = 3,429$ ;  $C_2 = 3,037$ ;  $C_{22} = 0,09801$ ;  $C_3 = 8,026$  соответственно.

АЧХ и ГВЗ этой схемы представлены на рис. 3 и 4.

**Заключение**

Рассмотренные канонические структуры Y-звеньев обеспечивают многообразие типов

реализуемых частотных характеристик и обладают необходимыми, а подчас и уникальными частотными свойствами при минимально возможных числе и геометрических размерах элементов, имеющих индуктивный характер. Так, в полосно-пропускающих звеньях, основу которых составляет всего лишь одно Y-сочленение сверхмалых размеров, можно сформировать, в отличие от звена Кауэра, до четырех полюсов затухания: один на нулевой и три на конечных частотах. Параллельное включение двух Y-звеньев обеспечивает линеаризацию ФЧХ такой полосно-пропускающей структуры, имеющей к тому же четыре нуля рабочего затухания.

Столь широкие функциональные и селективные возможности этих звеньев обусловлены тем, что в них топологически формируется несколько параллельных путей передачи энергии и в зависимости от значений параметров элементов они могут приобретать свойства как минимально, так и неминимально-фазовых цепей.

При практической реализации фильтров на основе этих звеньев выбор той или иной структуры Y-звеньев определяется их функциональным назначением, а при сходных частотных свойствах еще и требованиями, которые предъявляются к фильтру относительно его технологии изготовления и режима работы по постоянному току: передача постоянной составляющей входного сигнала, режима короткого замыкания или холостого хода.

Предложенные структуры расширяют схемотехническую базу цепей с распределенно-сосредоточенными параметрами и позволяют оптимально решать многие практические задачи в области создания сверхминиатюрных высокоизбирательных ВЧ и СВЧ фильтров, реализуемых в рамках любой из существующих технологий.

**Литература**

1. Аристархов Г.М., Арсенин А.В., Аринин О.В. Схемотехнический базис сверхминиатюрных высокоизбирательных СВЧ фильтров на основе Y-звеньев. Часть 1. Базовые Y-звенья // Т-Comm — Телекоммуникации и транспорт, 2012. — №4. — С. 42-45.
2. Аристархов Г.М., Арсенин А.В. Высокоизбирательные фильтры СВЧ на резонаторах сверхкороткой длины с дополнительными путями передачи энергии // Сборник трудов РНТОРЭС им. А.С.Попова. — М., 2008. — С. 117-122.
3. Аристархов Г.М., Алексеев А.Н. Связь рабочих параметров симметричных реактивных четырехполюсников // Радиотехника и электроника, 1990. Т.35. — №3. — С. 660-664.

**CIRCUITS BASIS OF ULTRA MINIATURE HIGH SELECTIVITY MICROWAVE FILTERS ON Y-SECTIONS PART 2. Y-SECTIONS WITH ADDITIONAL ROUTES**

G.M. Aristarkhov, doctor technical science (DFhil), professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, g.aristarkhov2010@yandex.ru;  
 A.V. Arsenin, military man, Moscow, el-dorado@yandex.ru;  
 O.V. Arinin, graduate student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, bishounen99@gmail.com

**Abstract**

Researched new base circuits of ultra miniature microwave filters on the Y sections. Subject to parameter elements, this circuits provide high selectivity at the expense of several transmission zeros. Researched Y-sections frequency response curves and represent adequate classification of the new base circuits appropriate their frequency characteristic. In the second part of the article Y-sections with additional routes are given. Keywords: ultra miniature, high selectivity, microwave filter, Y-section, transmission zero, distribution-lumped, base circuit.

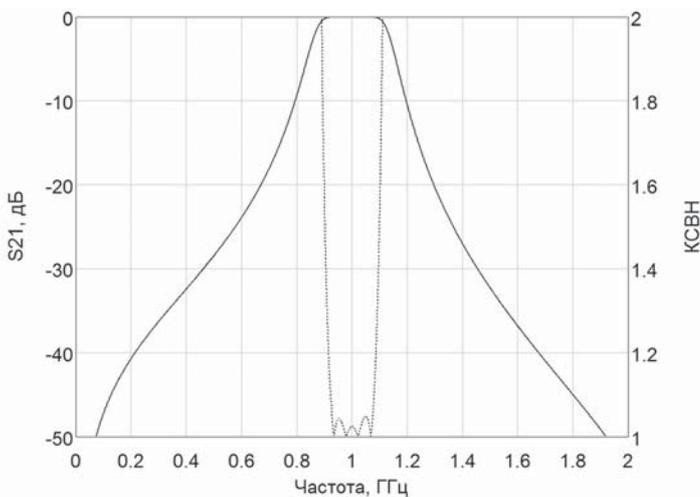


Рис. 3. Частотные зависимости рабочего затухания и КСВН Y-звена с линеаризованной фазо-частотной характеристикой

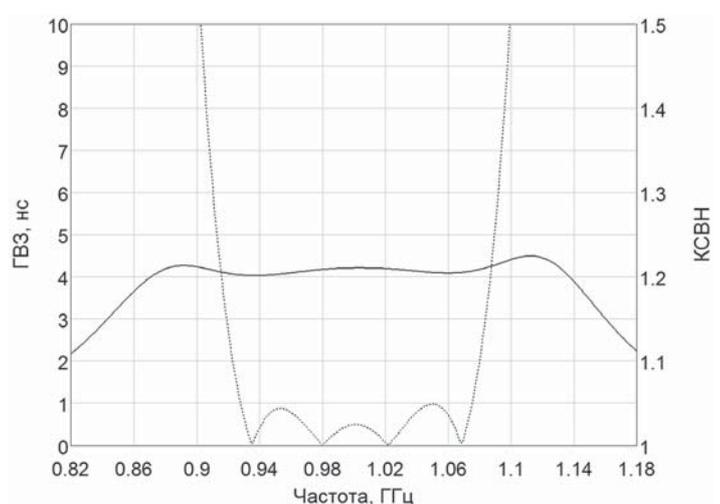


Рис. 4. Частотные зависимости ГВЗ и КСВН Y-звена с линеаризованной фазо-частотной характеристикой