

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

## Часть 1. Базовые Y звенья

**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 последнее десятилетие большое внимание уделяется вопросам создания фильтров СВЧ на основе распределенно-сосредоточенных цепей, в которых часть элементов выполняется в виде отрезков линий передачи, а другая часть — в виде конденсаторных структур. Такое сочетание элементов обеспечивает возможность существенного уменьшения габаритов фильтров, что отвечает общей тенденции развития гибридных и монолитных ИС СВЧ, и ряду спектра паразитных полос пропускания. Этот подход всегда был в центре внимания разработчиков, но не всегда обеспечивал желаемый результат, как из-за значительных размеров резонаторов, так и вследствие несовершенства технологии изготовления тонкопленочных элементов и, прежде всего, конденсаторных структур с требуемыми электрофизическими свойствами. В настоящее время ситуация принципиально изменилась в связи с разработкой и ширококомасштабным внедрением высококачественных как дискретных, так и тонкопленочных конденсаторных структур, а также технологии создания многослойных плат на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (ЛТСС-технология). В рамках этой технологии многими фирмами серийно выпускаются сверхминиатюрные объемные модули СВЧ различного функционального назначения. Однако схемотехника фильтров в

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. В первой части статьи даны базовые Y звенья.

базисе распределенно-сосредоточенных структур, реализуемых, в том числе, и по технологии ЛТСС, не претерпела существенных изменений, и применяются в основном традиционные решения [1-3]. Это не позволяет в полной мере использовать весь запас потенциальных возможностей современных технологий, что обуславливает необходимость разработки новых базовых звеньев СВЧ фильтров.

Цель работы — поиск схемотехнических решений сверхминиатюрных канонических структур в базисе распределенно-сосредоточенных цепей, в которых повышение частотной избирательности достигалось бы не путем увеличения числа колебательных систем и, соответственно, индуктивных элементов, а исключительно за счет увеличения числа конденсаторных структур, как обладающих более низкими потерями по сравнению с потерями в индуктивных элементах и занимающих существенно меньшие габариты.

В [4-5] на основе прототипа звена Кауэра синтезировано полосно-пропускающее Y звено, реализующее один полюс затухания на конечной частоте вблизи полосы пропускания и обладающее минимально возможными геометрическими размерами эквивалентных индуктивных элементов. При этом электрическая длина отрезков линий передачи, образующих Y сочленение, на один-два порядка меньше четверти длины волны  $\lambda$  (табл. 1, структура 1.1). Реактивные парциальные двухполюсники уравновешенной мостовой схемы замещения симметричной структуры Y-звена с укорачивающими емкостями  $C_1$  при ее синфазном  $Z_b = j \cdot X_b$  и противофазном  $Z_a = j \cdot X_a$  возбуждении подобны и представляют собой параллельные контуры с резонансными частотами  $f_a$  и  $f_b$ . Полюс затухания на конечной частоте формируется вследствие организации в Y звене двух путей передачи энергии через емкостную  $C_{11}$  и гальваническую (эквивалентную магнитной) связи между его плечами. Условием формирования полюса рабочего затухания  $A_p$  на заданной

конечной частоте  $f_\infty$  [6] является согласно (1) условие баланса импедансов парциальных двухполюсников  $\hat{X}_a(f_\infty) = \hat{X}_b(f_\infty)$ , где  $\hat{X}_{a,b}$  — нормированные относительно сопротивления нагрузки  $\hat{X}_{a,b} = X_{a,b}/R_n$ .

$$A_p = 10 \cdot \lg |S_{21}|^{-2} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{\left(1 + \hat{X}_a \cdot \hat{X}_b\right)^2}{\left(\hat{X}_a - \hat{X}_b\right)^2} \right] \quad (1)$$

Характеристическая полоса пропускания этого звена  $\Delta f_c = |f_b - f_a|$ , а соответственно и рабочая, определяются степенью неуровненности электромагнитных связей  $k_L \neq k_C$  а расположение полюса затухания относительно полосы пропускания — тем, какая из этих связей является преобладающей, где

$$k_C = \frac{C_{11}}{C_1 + C_{11}}; \quad k_L = \frac{l_0}{l_1 + l_0} \quad (2)$$

При этом, чем выше значения коэффициентов связи, тем ближе располагается полюс затухания к полосе пропускания. В случае уравновешенных связей  $k_L = k_C$  полоса пропускания вырождается, а при отсутствии одной из них  $k_{LC} = 0$  звено реализует частотную характеристику полосно-пропускающего типа без полюса затухания на конечной частоте. С целью обеспечения корректного сравнения частотных свойств Y-звеньев различных типов электрические параметры элементов звеньев, представленных в табл. 1 и далее, приведены при условии реализации относительной ширины полосы пропускания, определяемой по уровню КСВН=1.2, равной 4%, и относительной отстройке ближайших к полосе пропускания полюсов затухания от центральной частоты полосы пропускания на 10%. Электрические длины отрезков линий передачи, образующих Y-звенно структуры 1.1 (табл.1), составляют соответственно  $l_1 = 0,00763 \lambda$  и  $l_0 = 0,0037 \lambda$ , а волновые сопротивления этих отрезков выбраны для определенности равными 50 Ом. Частотные зависимости рабочего затухания приво-

дятся в таблицах без учета потерь в отрезках линии передачи и конденсаторах.

При практической реализации Y-звеньев в СВЧ диапазоне может оказаться, что в зависимости от выбранной технологии изготовления геометрической длины отрезков линий передачи, образующих Y-сочленение, становятся чрезмерно короткими и сравнимыми с размерами контактных площадок и паразитными индуктивностями обкладок конденсаторов. В этом случае электрическая длина этих отрезков может быть в несколько раз увеличена при сохранении нулей и полюса рабочего затухания на тех же частотах, если согласование Y-звена осуществлять одним из известных способов, например, посредством включения дополнительных входных конденсаторов  $C_2$ . При этом повышается при прочих равных условиях избирательность Y-звеньев в области нижних частот за счет формирования дополнительного полюса затухания на нулевой частоте (табл. 1, структура 1.1).

Сформируем в Y-звене еще один полюс затухания на конечной частоте. Для этого необходимо повысить порядок цепи хотя бы одного из парциальных двухполюсников уравновешенной мостовой схемы замещения, например,  $Z_b$ . С этой целью в основание Y-звена последова-

тельно или параллельно шлейфу  $l_0$  включим дополнительный конденсатор с емкостью  $C_0$  (табл. 1, структуры 1.2 и 1.3). В этом случае парциальный двухполюсник  $Z_a$  остается прежним, а  $Z_b$  обладает одним полюсом и одним нулем на конечных частотах, что приводит к формированию дополнительного полюса рабочего затухания Y-звена на конечной частоте. При этом в Y-звене с последовательно включенным конденсатором в основании (табл. 1, структура 1.2) имеется возможность передачи постоянной составляющей входного сигнала, что важно для многих практических применений. Кроме того, эта схема не содержит короткозамкнутых отрезков линий передачи, что выгодно ее отличает от остальных, т.к. обеспечивается более высокая точность изготовления элементов, имеющих индуктивный характер, а так же возможность учета паразитных емкостей контактных площадок, в виде части емкостей заземленных конденсаторов  $C_1$  и  $C_0$ .

В обоих этих звеньях (табл. 1, структуры 1.2 и 1.3) при определенных соотношениях параметров элементов формируются два полюса затухания на конечных частотах или в области нижних, или верхних частот, или по одному

слева и справа относительно полосы пропускания. При этом расположение ближайшего к полюсе пропускания полюса затухания определяется в основном параметрами элементов Y-звена, а дополнительного полюса затухания — емкостью  $C_0$ . Здесь и далее с целью сравнения частотные зависимости рабочего затухания рассматриваемых звеньев представлены в таблицах на "фоне" рабочего затухания базового Y-звена структуры 1.1 (пунктирная линия) с соответствующим типом АЧХ.

Отличительной особенностью Y-звена с параллельной емкостью в основании (табл. 1, структура 1.3) является возможность реализации широких полос пропускания при близком расположении к ним полюсов затухания.

Рассмотрим частотные свойства еще одного типа Y-звеньев, в которых "укорачивающие" емкости  $C_1$  заменены на короткозамкнутые шлейфы  $l_{ш}$  сверхкороткой длины (табл. 1, структуры 1.4 и 1.5). В этом случае на нулевой частоте формируется полюс затухания и по два полюса затухания на конечных частотах. Как видим, Y-звенья с короткозамкнутыми шлейфами обеспечивают выигрыш по избирательности в области нижних частот.

Таблица №1. Базовые Y-звенья

№	Структура Y-звена и схемы замещения	Частотные зависимости коэффициента передачи и КСВН	Параметр элемента
1	2	3	4
1.1			$l_1 = 0,00763 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,0037 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 31,32 \text{ нФ}$ $C_{11} = 20,17 \text{ нФ}$ $k_C = 0,392$ $k_L = 0,327$
			$l_1 = 0,00686 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,005165 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 31,6 \text{ нФ}$ $C_{11} = 18,36 \text{ нФ}$ $k_C = 0,367$ $k_L = 0,430$
			$C_a = C_1 + 2 \cdot C_{11}$ $L_b = L_1 + 2 \cdot L_0$
1.2			$l_1 = 0,00763 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,037 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 1,21 \text{ нФ}$ $C_{11} = 2,23 \text{ нФ}$ $C_2 = 1,07 \text{ нФ}$
			$l_1 = 0,0686 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,05165 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 1,205 \text{ нФ}$ $C_{11} = 2,11 \text{ нФ}$ $C_2 = 1,04 \text{ нФ}$
			$C_a = C_1 + 2 \cdot C_{11}$ $L_b = L_1 + 2 \cdot L_0$

Таблица №1. (Продолжение)

1	2	3	4
1.3			$l_1 = 0,007827 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,00725 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 24,1 \text{ нФ}$ $C_{11} = 23,02 \text{ нФ}$ $C_0 = 322 \text{ нФ}$
			$l_1 = 0,01528 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,02201 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 25,56 \text{ нФ}$ $C_{11} = 4,66 \text{ нФ}$ $C_0 = 23,02 \text{ нФ}$
			$C_a = C_1 + 2 \cdot C_{11}$ $L_b = L_1 + 2 \cdot L_0$
1.4			$l_1 = 0,007491 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,00486 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 11,32 \text{ нФ}$ $C_{11} = 30,79 \text{ нФ}$ $C_0 = 69,66 \text{ нФ}$
			$l_1 = 0,00624 \cdot \lambda$ $l_0 = 0,0066 \cdot \lambda$ $(Z_a = Z_c = Z_i = Z_o = 50\Omega)$ $C_1 = 7,88 \text{ нФ}$ $C_{11} = 33,78 \text{ нФ}$ $C_0 = 64,12 \text{ нФ}$
			$C_a = C_1 + 2 \cdot C_{11}$

