

# Влияние сопротивления потерь и собственной ёмкости катушек индуктивности на диапазон перестройки LC-фильтров на связанных контурах

И.В. Забегайло, Т.С. Тимошенко, А.Н. Яковлев

Омский научно-исследовательский институт приборостроения

**Аннотация:** Проведена оценка влияния сопротивления потерь и собственной емкости катушек индуктивности на диапазон перестройки LC-фильтров, выполненных на колебательных контурах. Установлено, что в схемах на параллельных контурах основным фактором, ограничивающим диапазон перестройки, является сопротивление потерь катушки индуктивности, в схемах на последовательных контурах – ее собственная емкость. Представлены рекомендации по расширению диапазона перестройки LC-фильтров. Приведены расчеты, подтверждающие корректность полученных результатов.

**Ключевые слова:** перестраиваемый фильтр, колебательный контур, катушка индуктивности, сопротивление потерь, собственная емкость.

## 1. Введение

Для защиты входных каскадов радиоприемных устройств, работающих в сложной помеховой обстановке, широкое применение находят перестраиваемые LC-фильтры, перестройка которых осуществляется за счет изменения значений элементов их схем, чаще всего конденсаторов. Такие фильтры наиболее технологичны в производстве и обладают меньшими массогабаритными параметрами по сравнению со своими аналогами.

Несмотря на то, что вопросам проектирования перестраиваемых LC-фильтров и улучшению их основных технических характеристик уделено большое внимание [1-4], вопросы, связанные с исследованием возможностей расширения диапазона перестройки, остаются открытыми. В одной из работ [5], была рассмотрена возможность расширения диапазона перестройки фильтра, выполненного на колебательных контурах с емкостной связью, при условии идеальности элементов. Однако влияние реальных параметров элементов, в первую очередь катушек индуктивности приводит к отлнчаю расчетных значений от реальных.

Рассмотрим влияние реальных параметров катушек индуктивности на диапазон перестройки полосовых LC-фильтров, выполненных на колебательных контурах с емкостной связью.

## 2. Эквивалентная катушка индуктивности

Одним из элементов LC-фильтров, имеющих наибольшее отличие от идеального, является катушка индуктивности. На рисунке 1 приведена эквивалентная схема, позволяющая учесть влияние собственной ёмкости  $C_p$  и сопротивления потерь  $r$  [6].

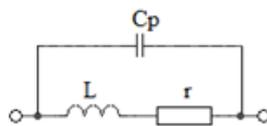


Рисунок 1. Эквивалентная схема катушки индуктивности

С учетом обозначений двухполюсника сопротивление эквивалентной схемы катушки индуктивности может быть записано в виде выражения (1):

$$Z = \frac{j\omega L + r}{1 + j\omega C_p r - \omega^2 L C_p} = \frac{j\omega L + r}{1 + j\frac{\omega r}{\omega_p^2} - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2} \quad (1)$$

Где  $\omega_p$ - частота резонанса катушки индуктивности.

Тогда выражение для добротности катушки индуктивности, которое одновременно позволяет учесть влияние потерь и собственной емкости запишется как:

$$Q = \frac{\omega(L - \omega^2 L C_p - C_p r^2)}{r} = \frac{\omega L \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2 - \left(\frac{r}{L\omega_p}\right)^2\right)}{r} \quad (2)$$

Для дальнейшего анализа влияния параметров катушек индуктивности на диапазон перестройки полосовых LC-фильтров, будет использована приведенная модель катушки индуктивности. Критерием оценки будет считаться отличие модулей коэффициентов передачи фильтра с идеализованными и реальными элементами.

### 3. Перестраиваемые LC-фильтры на параллельных и последовательных контурах

Рассмотрим влияние сопротивления потерь и собственной емкости катушек индуктивности на модуль передаточной функции при перестройке LC-фильтров, изображенных на рисунке 2 а) и б).



**Рисунок 2.** Схемы LC-фильтров а)- на параллельных контурах, б)- на последовательных контурах.

Как отмечалось в работе [7], модуль передаточной функции от входа к выходу фильтров, нагруженных на сопротивление нагрузки  $R$ , можно выразить через коэффициенты ABCD-матрицы:

$$T = \frac{2}{A + \frac{B}{R} + C \cdot R + D} \quad (3)$$

Тогда с учетом эквивалентной модели катушки индуктивности и обозначением элементов схем, коэффициенты ABCD-матрицы рассматриваемых LC-фильтров на параллельных и последовательных контурах можно представить в виде выражений (4) и (5) соответственно.

$$A = D = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{r + j\omega(C_1 + C_p)(r^2 + \omega^2 L^2) - j\omega L}{j\omega C_2(r^2 + \omega^2 L^2)} \quad (4)$$

$$B = Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$C = \frac{2}{Z_1} + \frac{Z_2}{Z_1^2} = \frac{(1 - \omega^2 L(C_1 + C_p) + j\omega r(C_1 + C_p))(1 - \omega^2 L(C_1 + 2C_2 + C_p) + j\omega r(C_1 + 2C_2 + C_p))}{j\omega C_2(r + j\omega L)^2}$$

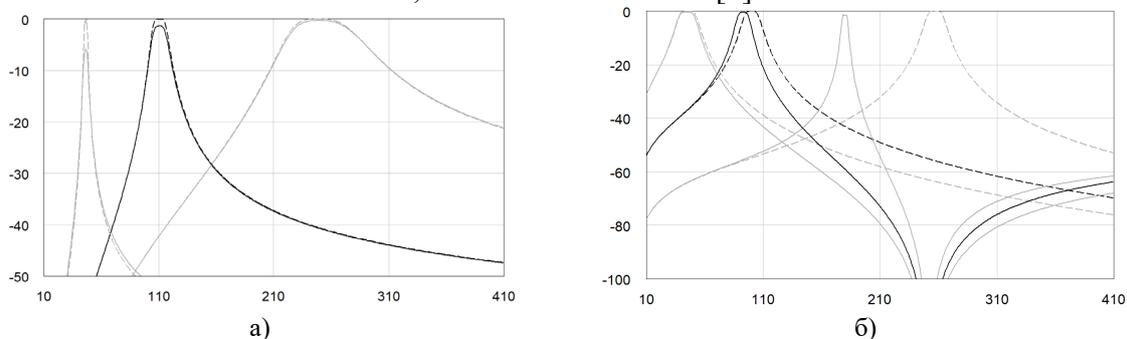
$$A = D = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{C_2(1 + \omega(C_1 + C_p)(jr - \omega L))}{C_1(1 + j\omega r C_p - \omega^2 L C_p)}$$

$$B = 2Z_1 + \frac{Z_1^2}{Z_2} = \frac{(1 + \omega(C_1 + C_p)(jr - \omega L))((2C_1 + C_2)(1 - \omega^2 L C_p) - \omega^2 L C_1 C_2 + j\omega R(C_1 C_2 + 2C_1 C_p + C_2 C_p))}{j\omega C_1^2(1 + j\omega r C_p - \omega^2 L C_p)^2} \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{Z_2} = j\omega C_2$$

На основе известных методик [8, 9] были определены значения элементов схем LC-фильтров, приведенных на рисунках 2 а) и б), с относительной шириной полосы пропускания 10% и частотой настройки 150 МГц.

Используя выражения (4) и (5), оценим влияние параметров катушек индуктивности на модуль передаточной функции фильтров при их перестройке по частоте. При этом будем полагать, что для обеспечения согласования на частоте настройки  $\omega_n$  перестройка по частоте в  $K$  раз осуществляется с помощью контурной емкости  $C_1$  и емкости связи  $C_2$ , как было показано в [5].



**Рисунок 3.** Зависимость модуля передаточной функции при перестройке LC-фильтров а) - на параллельных контурах, б) - на последовательных контурах.

На рисунке 3 пунктирной линией приведены расчетные АЧХ рассматриваемых LC-фильтров при перестройке от 50 до 250 МГц без учета влияния параметров катушки индуктивности. Сплошной линией отображены расчетные АЧХ с учетом катушек индуктивности с сопротивлением потерь 0,05 Ом и собственной емкостью 0,5 пФ для фильтра на параллельных контурах, сопротивлением потерь 2,0 Ом и собственную емкость 0,5 пФ для фильтра на последовательных контурах.

Из представленных на рисунке 3 а) графиков, следует, что в схеме на параллельных контурах параметры катушки индуктивности оказывают существенное влияние на уровень вносимого затухания фильтра при его перестройке. Используя выражение для добротности катушки индуктивности (2), можно определить зависимость уровня вносимых потерь фильтра от параметров катушки индуктивности:

$$\alpha_{\text{вн}} = \frac{4,343r \sum_{i=1}^n g_i}{\Delta \omega L \left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - \left( \frac{r}{L\omega_p} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

Здесь  $\Delta$  – относительная ширина полосы пропускания фильтра,  
 $g_i$  – коэффициенты фильтра-прототипа.

Анализ рисунка 3 а и выражения (6) показывает, что в схеме фильтра на параллельных контурах основным фактором, ограничивающим диапазон перестройки, является влияние сопротивления потерь катушки индуктивности. При настройке фильтра вниз по частоте происходит падение добротности катушки индуктивности и уменьшение относительной ширины полосы пропускания пропорционально коэффициенту перестройки, что ведет к росту величины вносимых

потерь. Выше средней частоты диапазона перестройки влияние сопротивления потерь катушки индуктивности компенсируется расширением его относительной ширины полосы пропускания. При этом малая величина собственной емкости катушки индуктивности по сравнению с контурной емкостью рассматриваемого фильтра не оказывает существенного влияния на его АЧХ и величину вносимых потерь на частотах ниже резонансной частоты.

Как следует из графиков, представленных на рисунке 3 б, в фильтре на последовательных контурах параметры катушки индуктивности оказывают наибольшее влияние на частоту настройки, ширину полосы пропускания и избирательность фильтра при его перестройке по частоте, оказывая при этом незначительное влияние на величину вносимых потерь.

Действительно, в [5] было показано, что для обеспечения согласования при перестройке по частоте абсолютная полоса пропускания рассматриваемого фильтра должна быть постоянной. Следовательно, при перестройке вниз от средней частоты диапазона перестройки относительная полоса пропускания увеличивается и приводит к уменьшению влияния омического сопротивления катушки индуктивности на вносимые потери фильтра.

Собственная емкость катушки индуктивности является причиной возникновения полюса затухания, частота которого совпадает с частотой собственного резонанса катушки. По мере приближения частоты настройки к частоте полюса затухания влияние собственной емкости катушки индуктивности возрастает и ведет к отклонению граничных частот полосы пропускания. Нижнюю  $\omega_n$  и верхнюю  $\omega_v$  границы полосы пропускания фильтра на последовательных контурах можно записать в виде выражений (7) с учетом обозначений эквивалентной катушки индуктивности:

$$\omega_n = \frac{1}{L(C_1 + C_p)}$$

$$\omega_v = \frac{2C_1 + C_2}{L(C_2(C_1 + C_p) + 2C_1C_p)}$$
(7)

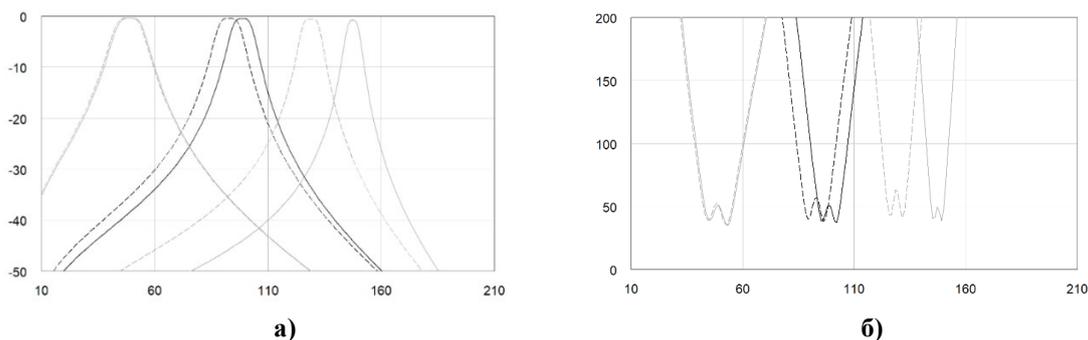
Как следует из анализа соотношений (7), вследствие влияния собственной емкости катушки индуктивности нижняя и верхняя границы полосы пропускания сдвигаются вниз по частоте. При перестройке такого фильтра вверх по частоте, величина контурной емкости  $C_1$  уменьшается и приводит к увеличению влияния собственной емкости катушки индуктивности на АЧХ фильтра, что ведет к ограничению верхней границы частотного диапазона перестройки. Нижняя граница диапазона перестройки рассматриваемой схемы ограничивается практической реализуемостью элементов.

Для увеличения верхней границы диапазона перестройки и минимизации влияния собственной емкости катушки индуктивности на полосу пропускания фильтра необходимо задать допустимые изменения границ полосы пропускания и контурную емкость фильтра в виде СК:

$$C_K = \frac{C_1 K (\omega^2 L C_2 K - 1)}{C_2} C_1 - C_p$$
(8)

На рисунках 4 а) и б) в виде графиков приведены расчетные зависимости модуля коэффициента передачи и модуля входного сопротивления соответственно, ранее рассчитанного LC-фильтра на последовательных контурах при перестройке в диапазоне частот от 50 до 250 МГц без учета (штриховая линия) и с учетом (пунктирная линия) компенсации собственной емкости катушки индуктивности. Входное сопротивление  $Z_{BX}$  определено через коэффициенты ABCD-матрицы [7]:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{A \cdot R + B}{C \cdot R + D} \quad (9)$$



**Рисунок 4.** Зависимость модуля передаточной функции при перестройке фильтра-а), зависимость модуля входного сопротивления при перестройке фильтра-б).

Как видно из представленных графиков, за счет корректировки величины контурной емкости в LC-фильтрах на последовательных контурах можно минимизировать влияние собственной емкости катушки индуктивности на АЧХ фильтра при его перестройке.

#### 4. Заключение

Проведенный в настоящей работе анализ влияния параметров катушек индуктивности показал, что в перестраиваемых LC-фильтрах, выполненных на параллельных контурах основным фактором, ограничивающим диапазон перестройки, является сопротивление потерь катушки индуктивности, в схемах на последовательных контурах – ее собственная емкость.

Выведены соотношения, позволяющие исходя из параметров катушки индуктивности и требований, предъявляемых к фильтру провести оценку диапазона перестройки. На основе полученных результатов оценки влияния параметров катушек индуктивности представлены рекомендации по расширению диапазона перестройки LC-фильтров, выполненных на связанных контурах, перестройка которых осуществляется с помощью контурной емкости и емкости связи.

Представлены в виде графиков расчеты модуля передаточной функции и модуля входного сопротивления при перестройке, подтверждающие корректность полученных результатов.

#### Список литературы

1. Забегайло И.В. Полосовые перестраиваемые фильтры с использованием варикапов в широком диапазоне частот / И.В. Забегайло, А.И. Тюменцев, Т.С. Хроленко – ТРС 3(23), 2014.
2. Знаменский А.Е. Перестраиваемые электрические фильтры. – М.: Связь, 1979. – 128 с.
3. A.R. Brown and G. M. Rebeiz, "A varactor-tuned RF filter," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 48, no. 7, pp. 1157-1160, July 2000.
4. Palego, C. et al. A two-pole lumped-element programmable filter with MEMS pseudodigital capacitor banks [Text] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Т. 56. – №. 3. – С. 729-735.
5. Забегайло И.В. Диапазон перестройки LC-фильтров на связанных контурах/ И.В. Забегайло, Тюменцев А.И., Яковлев А.Н. – ТРС, 2025.
6. Inder Bahl. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Artech House, 2003. – 488 p.
7. High frequency techniques: an introduction to RF and microwave engineering. Joseph F. White. – 2004, 526 p.
8. Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров / Пер. с англ. под ред. А.Е. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
9. Zverev A.I. Handbook of Filter Synthesis / A.I. Zverev// John Wiley and Sons, Inc.- 1967. – 576 p.