

УДК 621.372

Г. Г. Китушин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: glebkit@yandex.ru

ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА ФИЛЬТРОВ ПОСТОЯННОГО ИМПЕДАНСА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Рассматривается методика синтеза фильтров с постоянным входным импедансом, которые строятся в виде параллельного соединения нескольких лестничных цепей. Приведены примеры синтеза фильтров Чебышева третьего порядка и фильтра с неклассической передаточной функцией.

Ключевые слова: фильтр постоянного импеданса, Чебышев, кумулянт.

Предлагаемые в справочной литературе фильтры лестничного типа обычно имеют резистивный импеданс в полосе пропускания, комплексный импеданс в переходной области и стремящийся к бесконечности или к нулю реактивный импеданс в полосе затухания. В радиотехнике часто возникают задачи создания фильтров с постоянным входным сопротивлением в широком частотном диапазоне. Такие фильтры, в частности, требуются в качестве нагрузок для линий, если необходимо избежать отражений в этих линиях. Если фильтр является нагрузкой усилителей мощности, то здесь также важно, чтобы импеданс нагрузки в широком диапазоне частот был чисто активным. В противном случае могут возникнуть перенапряжения на выходе усилителя. Фильтры, имеющие постоянное резистивное входное сопротивление в широком диапазоне частот, называют фильтрами постоянного импеданса (ФПИ).

Стандартный подход к построению таких цепей изображен на рис. 1. Представленная цепь состоит из двух параллельных ветвей: первая (верхняя) ветвь представляет собой исходный фильтр с одинаковыми сопротивлениями R на обоих концах, а вторая (нижняя) ветвь является компенсационной и со-

стоит из последовательного соединения сопротивления R и цепи, обратной первому фильтру без его входного сопротивления (эти взаимнообратные цепи выделены пунктиром). В силу того, что произведение входных сопротивлений взаимнообратных цепей (Z и $\frac{R^2}{Z}$) есть постоянная величина, входное сопротивление всей цепи также постоянно. Технику построения обратных цепей можно найти, например, в [1]. Однако в этой схеме согласование достигается ценой затухания сигнала в два раза в полосе пропускания фильтра, что не всегда желательно.

В работе [2] утверждается, что основная и дополнительная ветви могут соединяться и без дополнительных последовательных сопротивлений R , если имеют характеристики Баттерворта – параллельное соединение фильтров нижних и верхних частот с равными частотами среза дает постоянное входное сопротивление. В данной статье показывается на примере фильтров Чебышева 3 порядка, что без дополнительных последовательных сопротивлений R можно реализовать не только фильтры Баттерворта. Используемая методика синтеза таких ФПИ

базируется на подходе к синтезу лестничных фильтров, изложенному в книге [3].

Методика построения фильтров постоянного импеданса

Структура ФПИ показана на рис. 2. В общем случае он состоит из параллельного соединения фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра верхних частот (ФВЧ) и полосового фильтра (ПФ) [3]. Прежде чем приступить к синтезу ФПИ, сформулируем требование к передаточным характеристикам входящих в него параллельных фильтров. Напишем закон сохранения энергии для цепи, показанной на рис. 2, являющейся нагрузкой для длинной линии с волновым сопротивлением R :

$$\frac{|W1(i\omega)|^2}{R} = \frac{|W2(i\omega)|^2}{R} + \frac{|W1(i\omega) + W2(i\omega)|^2 \cdot |P1(i\omega)|^2}{R} + \frac{|W1(i\omega) + W2(i\omega)|^2 \cdot |P2(i\omega)|^2}{R} + \frac{|W1(i\omega) + W2(i\omega)|^2 \cdot |P3(i\omega)|^2}{R},$$

где $W1(i\omega)$ – амплитуда падающей волны, $W2(i\omega)$ – амплитуда отраженной волны, а $P1(i\omega)$, $P2(i\omega)$ и $P3(i\omega)$ – передаточные функции реактивных лестничных цепей $N1$, $N2$ и $N3$ соответственно, рассматриваемые как функции от частоты.

Из данного соотношения видно, что согласование в линии возможно только при выполнении условия $|P1|^2 + |P2|^2 + |P3|^2 = 1$. Таким образом, передаточная характеристика фильтра Ni должна удовлетворять следующему условию:

$$|P1(i\omega)| \leq 1. \tag{1}$$

Очевидно, что такой же результат получится при рассмотрении цепи, состоящей из четырех и более параллельных секций. Это и есть необходимое условие построения ФПИ.

Проиллюстрируем условие (1) на примере двухполюсного ФПИ (рис. 3). После несложных расчетов легко установить, что входное сопротивление этой цепи равно R , если выполнены следующие соотношения:

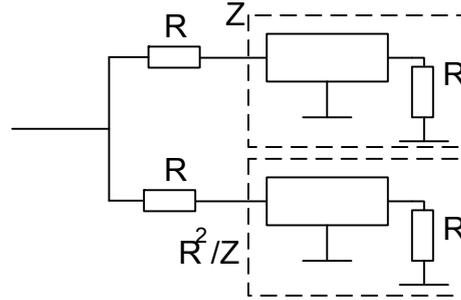


Рис. 1. Общая схема ФПИ с ослаблением сигнала в два раза в полосе пропускания

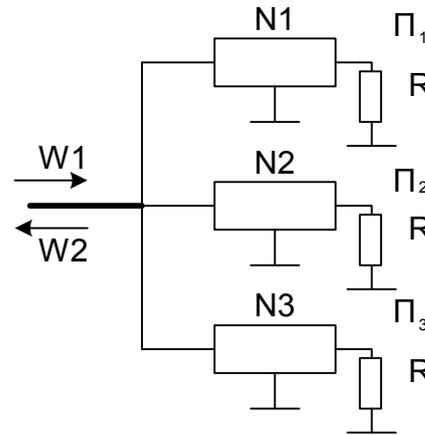


Рис. 2. Параллельное соединение трех лестничных цепей с передаточными функциями $P1$, $P2$ и $P3$

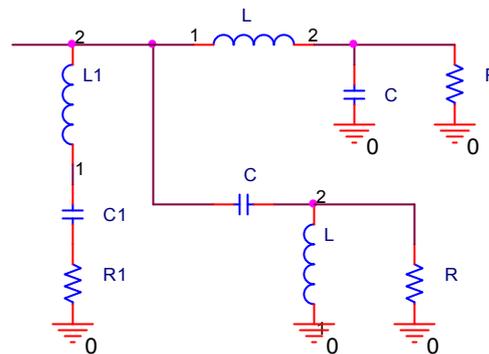


Рис. 3. Схема двухполюсного ФПИ

$$R1 = \frac{R \cdot L}{L - 2 \cdot C \cdot R^2}, \quad L1 = \frac{R^2 \cdot L \cdot C}{L - 2 \cdot C \cdot R^2},$$

$$C1 = \frac{L - 2 \cdot C \cdot R^2}{R^2}.$$

Следовательно, условие реализуемости цепи определяется соотношением $L > 2 \cdot C \cdot R^2$,

которое совпадает с условием (1), так как передаточная функция этого фильтра

$$П = \frac{1}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC}$$

разования Лапласа.

Условие (1) справедливо для ФНЧ или ФВЧ, для которых сопротивление нагрузки на выходе совпадает с входным сопротивлением всей цепи. Для полосовых фильтров сопротивление нагрузки r может не совпадать с входным сопротивлением ФПИ R , для них условие (1) преобразуется в условие

$$|П|^2 < \frac{r}{R}.$$

Итак, в общем случае (при синтезе с помощью лестничных цепей) ФПИ состоит из трех параллельных звеньев: ФВЧ, ФНЧ и ПФ. Далее будем считать, что нам задан ФНЧ, и требуется найти ФВЧ и ПФ. Если заданы ФВЧ или ПФ, значения элементов для них можно получить из предыдущего решения с помощью стандартных преобразований. Из условия постоянства входного сопротивления ФПИ можно найти входное сопротивление Z_c параллельного соединения ФВЧ и ПФ:

$$\frac{1}{Z_{in}} + \frac{1}{Z_c} = \frac{1}{R}, \quad (2)$$

здесь Z_{in} обозначает входной импеданс ФНЧ, а R – постоянное входное сопротивление ФПИ.

Получив выражение для Z_c , мы можем определить возможность реализации этого сопротивления одной цепью ФВЧ лестничной структуры (подобно случаю с фильтром Баттерворта). Если это окажется невозможным, то необходимо разложить выражение $\frac{1}{Z_c}$ на две дроби так, чтобы каждая из них

описывала входную проводимость реализуемой лестничной цепи. Тогда параллельное соединение этих лестничных цепей даст нам искомую компенсирующую цепь.

Прежде чем перейти к примерам, будет полезным кратко описать синтез лестничной цепи по ее входному сопротивлению, который изложен в книге [3]. Базовым элементом этого подхода является кумулянт – определитель специального вида, составленный из проводимостей параллельных ветвей y_i и импедансов последовательных ветвей z_i цепи (рис. 4):

$$\begin{vmatrix} z_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & y_2 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & z_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & y_{2n-2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & z_{2n-1} \end{vmatrix}$$

Для компактности выражений введем обозначение $\{z_i | z_{2n-1}\}$ для вышеприведенного кумулянта. В этом обозначении используются первый и последний диагональные элементы определителя, а промежуточными элементами являются иммитансы с возрастающими на единицу индексами.

С помощью кумулянтов можно выразить все основные параметры лестничной цепи. Для синтеза ФПИ (см. [3]) необходимо рассматривать цепи, начинающиеся с последовательных звеньев. В случае нечетной степени фильтра эта цепь представлена на рис. 4. Если бы цепь начиналась с параллельного звена, то ее входное сопротивление достигало бы нулевого значения на

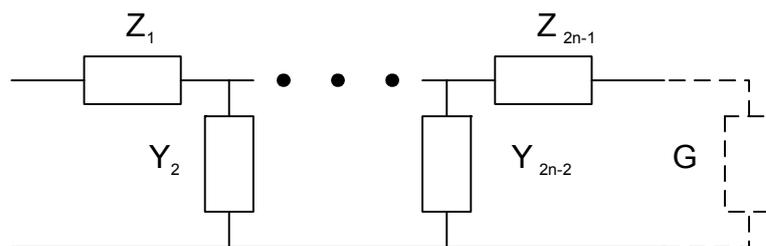


Рис. 4. Схема пассивной лестничной цепи $2n - 1$ порядка

резонансной, нулевой или / и бесконечной частоте, что несовместимо с уравнением (2).

Входное сопротивление цепи, изображенной на рис. 4, нагруженной на выходе на проводимость G , выражается через кумулянты следующим образом [3]:

$$Z_{11} = \frac{\{z_1 | z_{2n-1}\} \cdot G + \{z_1 | y_{2n-2}\}}{\{y_2 | z_{2n-1}\} \cdot G + \{y_2 | y_{2n-2}\}}.$$

Отметим, что сами кумулянты являются дробями, поэтому они не могут быть непосредственно определены из сопоставления этого выражения с конкретным выражением для Z_{11} . Представим Z_{11} в следующем виде:

$$Z_{11} = \frac{O_n + E_n}{O_d + E_d},$$

где O_n и O_d – полиномы, содержащие нечетные степени s , а E_n и E_d – четные. Основным шагом в [3] является установление связи между кумулянтами и этими многочленами:

$$\{z_1 | z_{2n-1}\} = \frac{O_n}{G \cdot D}, \quad (3)$$

$$\{z_1 | y_{2n-2}\} = \frac{E_n}{D}, \quad (4)$$

$$\{y_2 | z_{2n-1}\} = \frac{E_d}{G \cdot D}, \quad (5)$$

$$\{y_2 | y_{2n-2}\} = \frac{O_d}{D}, \quad (6)$$

$$\pm D^2 = \frac{O_n \cdot O_d - E_n \cdot E_d}{G}. \quad (7)$$

Соотношение (7) является уравнением, разрешимость которого определяет возможность синтеза лестничной цепи, состоящей из реактивных элементов с нагрузкой G на выходе. Многочлен D пропорционален наименьшему общему кратному знаменателей кумулянтов, входящих в уравнения (3)–(6), и определяет все полюсы парциальных иммитансов цепи. Следовательно, все корни полинома D должны лежать на мнимой оси симметрично относительно нуля.

Соответствие (3)–(6) справедливо только в случае четного полинома D , в противном случае (0 является корнем D) в соотношениях (3)–(6) мы должны поменять местами O_n и E_n , O_d и E_d . Если уравнение (7) разрешимо, то после его решения можно найти все эти базовые кумулянты.

Расчет фильтра постоянного импеданса третьего порядка с характеристикой Чебышева с колебаниями 0,028 dB

Проиллюстрируем этот метод синтеза ФПИ на примере фильтра Чебышева третьего порядка (рис. 5) с колебаниями 0,028 dB в полосе пропускания, нагрузкой на выходе 50Ω и частотой среза $\omega = 1$.

Из уравнения (2) найдем, что

$$Z_C = \frac{50 \cdot (5,42 + 7,1s + 4,5s^2 + 1,74s^3)}{s \cdot (2,23 + 2,6s + 1,74s^2)}.$$

Для упрощения синтеза цепи компенсации сделаем замену:

$$s \rightarrow \frac{1}{s}. \quad (8)$$

Это преобразование избавит нас от лишнего полюса в нуле. В результате этой замены мы перейдем к низкочастотному прототипу, после синтеза которого совершим обратную замену. Произведя замену (8) в Z_C , мы получим выражение для входного сопротивления низкочастотного прототипа:

$$Z'_C = \frac{50 \cdot (5,42s^3 + 7,1s^2 + 4,5s + 1,74)}{2,23s^2 + 2,6s + 1,74}. \quad (9)$$

Как и ожидалось, эта дробь не содержит полюса в нуле. Теперь решим уравнение (7) для выражения (9):

$$D = 50 \cdot (1,74 + 1,31s^2). \quad (10)$$

Это решение является приближенным, с погрешностью коэффициентов менее 1%. Случай, для которого нельзя с такой же точностью решить уравнение (7), мы рассмотрим ниже. Таким образом, уравнение (7) имеет решение, и, следовательно, мы можем синтезировать искомую цепь в виде параллельного соединения основной (ФНЧ) и дополнительной (ФВЧ) ветвей без ком-

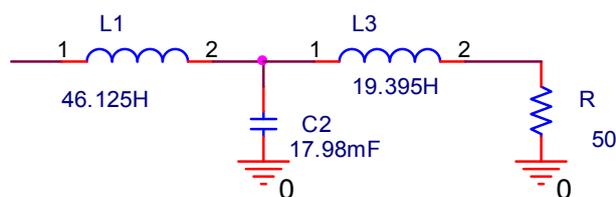


Рис. 5. Исходный ФНЧ Чебышева

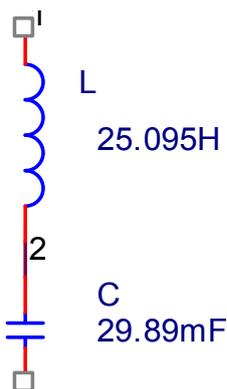


Рис. 6. Схема последовательного LC контура

пенсирующего параллельного полосового фильтра. В данном случае D оказалось четным многочленом, поэтому соответствие между кумулянтами цепи и выражением Z_{11} описывается соотношениями (3)–(6). Из выражения (10) видно, что цепь имеет лишь два комплексно сопряженных полюса $s_{1,2} = \pm j \cdot 1,15$, которые мы разместим в y_2 , как это следует из уравнения (6). А z_1 и z_3 не будут содержать полюсов и, следовательно, являются индуктивностями. Если бы мы не сделали замену (8), то D оказался бы нечетным, и нужно было бы пользоваться обратным соответствием ($O \leftrightarrow E$). Поскольку мы рассматриваем цепь 3-го порядка ($n = 2$), то соотношение (6) имеет следующий вид:

$$\{y_2 | y_2\} = y_2 = \frac{2,6s}{50 \cdot (1,74 + 1,31s^2)}.$$

Это выражение проводимости соответствует последовательному LC контуру (рис. 6).

Определив y_2 , мы можем из равенства (4) найти z_1 :

$$\begin{aligned} \{z_1 | y_2\} = 1 + z_1 \cdot y_2 &= \frac{7,1s^2 + 1,74}{1,74 + 1,31s^2} \rightarrow \\ \rightarrow z_1 &= 111,9s. \end{aligned}$$

Аналогично, исходя из равенства (5), мы приходим к результату $z_3 = 17,68s$.

Синтезировав низкочастотный прототип, мы можем снова сделать замену (8), в результате которой придем к искомой цепи ФВЧ. В результате этой замены $L \rightarrow \frac{1}{C}$,

$C \rightarrow \frac{1}{L}$. Окончательный вид цепи ФПИ

представлен на рис. 7, а зависимость входного сопротивления этого фильтра от частоты – на рис. 8.

Расчет фильтра постоянного импеданса третьего порядка с характеристикой Чебышева с колебаниями 0,28 dB

В предыдущем примере ФПИ все элементы цепи оказались положительными, что не является обязательным. В качестве примера подобной ситуации мы построим фильтр Чебышева 3-го порядка с колебаниями 0,28 dB в полосе пропускания с нагрузкой 50Ω на выходе и частотой среза $\omega = 1$. Схема ФНЧ этого фильтра представлена на рис. 9. Ход синтеза цепи полностью аналогичен предыдущему примеру, поэтому мы опустим промежуточные вычисления, представив лишь результаты.

Решив уравнение (2) и сделав замену (8), мы придем к низкочастотному прототипу цепи компенсации с входным сопротивлением:

$$Z'_C = \frac{50 \cdot (4,254 + 6,475s + 4,218s^2 + 8,08s^3)}{4,353 + 2,972s + 2,871s^2}.$$

Решая для этого выражения уравнение (7), мы придем к соотношению

$$D = 50 \cdot (4,354 + 3,265s^2).$$

Парциальные иммитансы цепи находим так же, как и в предыдущем примере:

$$\begin{aligned} y_2 &= \frac{2,972s}{217,7 + 163,3s^2}, \\ z_1 &= 80,98s, \\ z_3 &= -6,628s. \end{aligned}$$

Сделав снова замену (8), мы получим цепь, которая представлена на рис. 10. Здесь мы видим проблему, состоящую в наличии отрицательной емкости. К решению этой проблемы можно подойти двумя путями (как минимум). Первый путь состоит в реализации отрицательной емкости с помощью трансформатора. Использование этого приема применительно к фильтрам описано в монографии [4]. Но мы пойдем другим путем. Поскольку цепь компенсации служит балластной нагрузкой, то для ее реализации можно использовать два резистора, а не один, как мы предполагали сначала. Поэтому мы можем воспользоваться преобразованием T-образной цепи в мостовую схему,

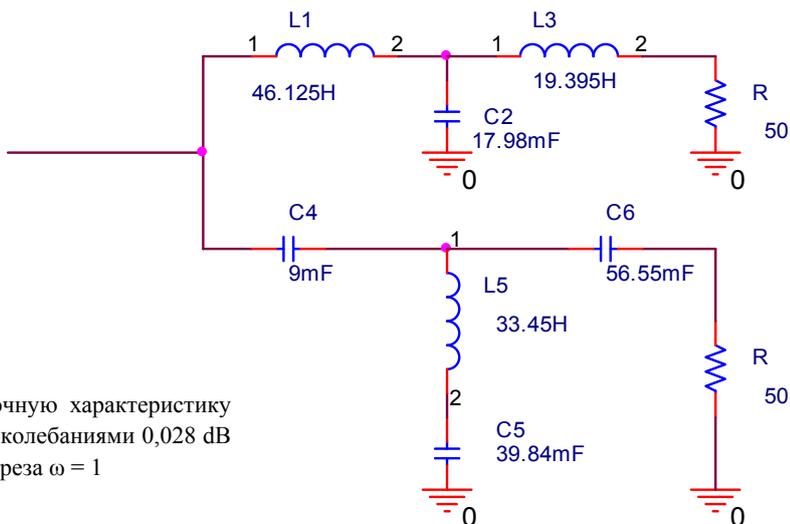


Рис. 7. ФПИ, имеющий передаточную характеристику фильтра Чебышева 3-го порядка с колебаниями 0,028 dB в полосе пропускания и частотой среза $\omega = 1$

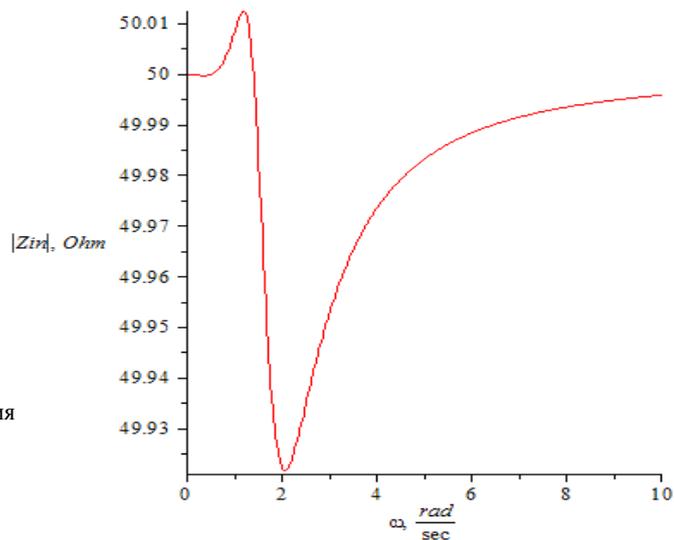


Рис. 8. Зависимость входного сопротивления ФПИ от частоты

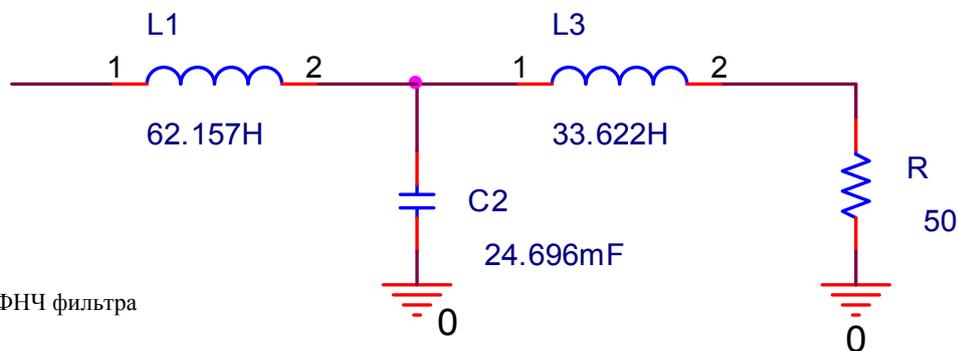


Рис. 9. Схема ФНЧ фильтра

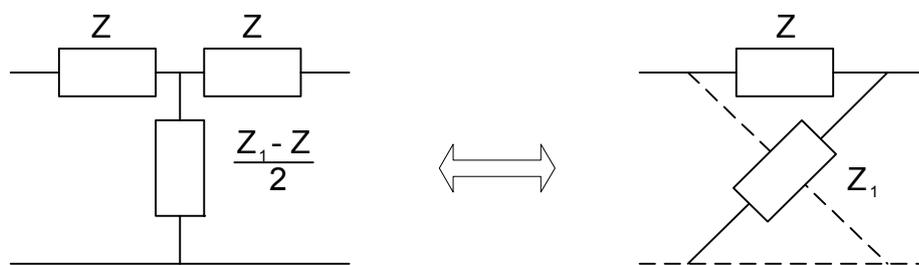
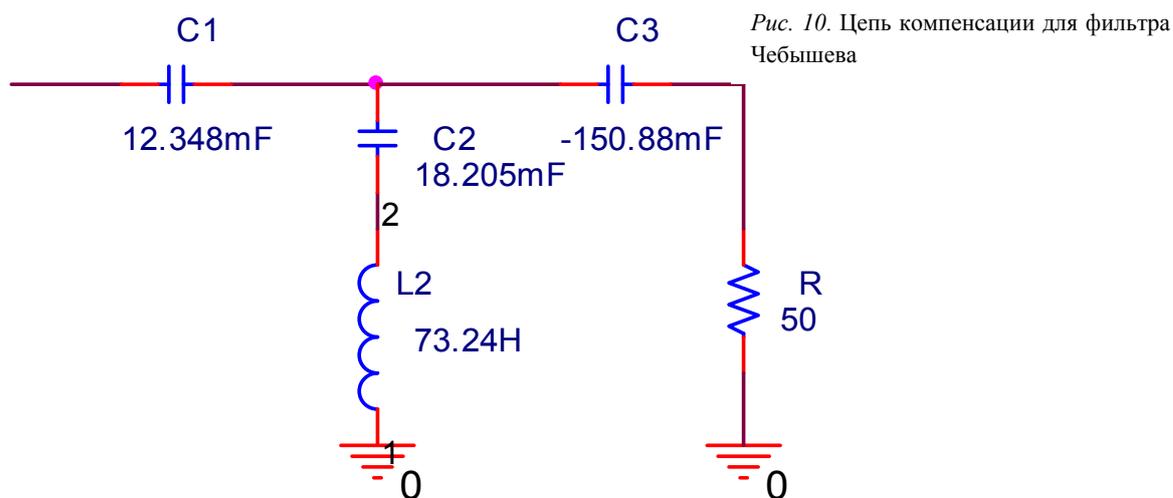


Рис. 11. Эквивалентность мостовой и Т-образной цепи

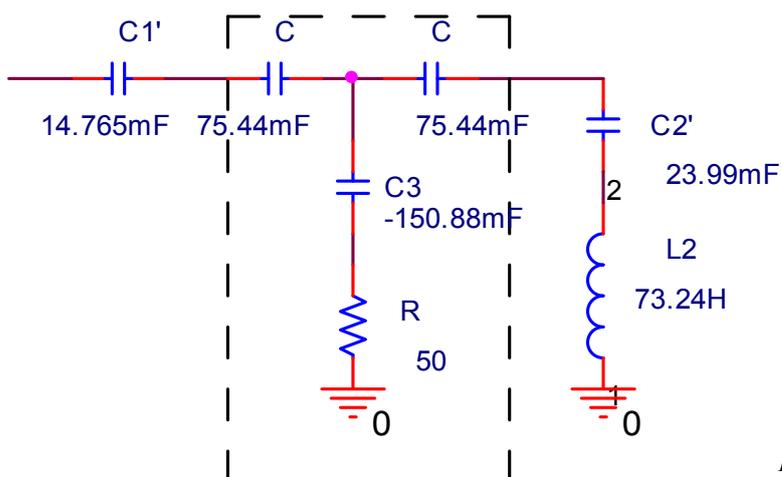


Рис. 12. Преобразование ФПИ

которая изображена на рис. 11. Предварительно мы преобразуем нашу цепь, как это показано на рис. 12. Пунктиром выделена та часть, которая подвергнется мостовому пре-

образованию. Окончательная схема ФПИ изображена на рис. 13, а зависимость его входного сопротивления от частоты – на рис. 14.

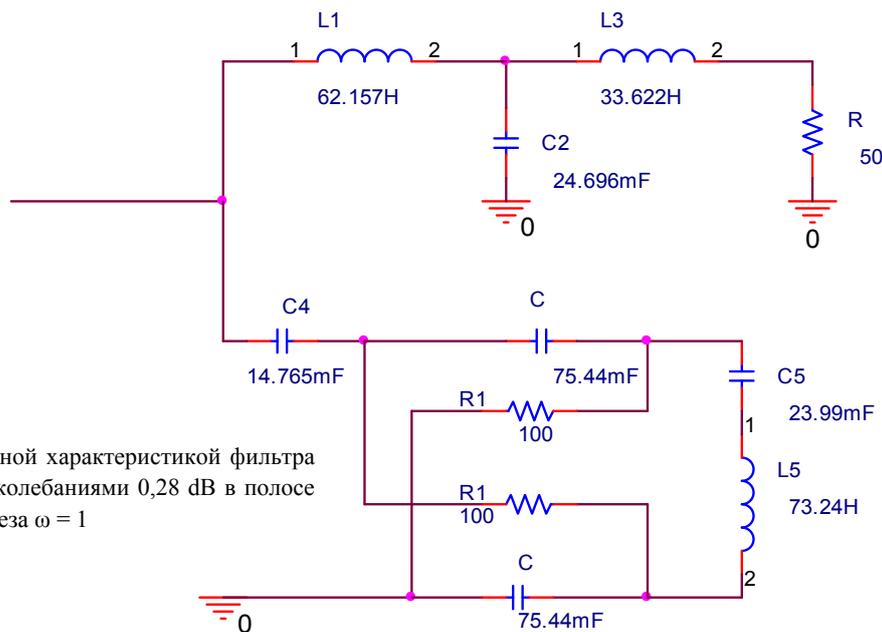


Рис. 13. ФПИ с передаточной характеристикой фильтра Чебышева 3-го порядка с колебаниями 0,28 dB в полосе пропускания и частотой среза $\omega = 1$

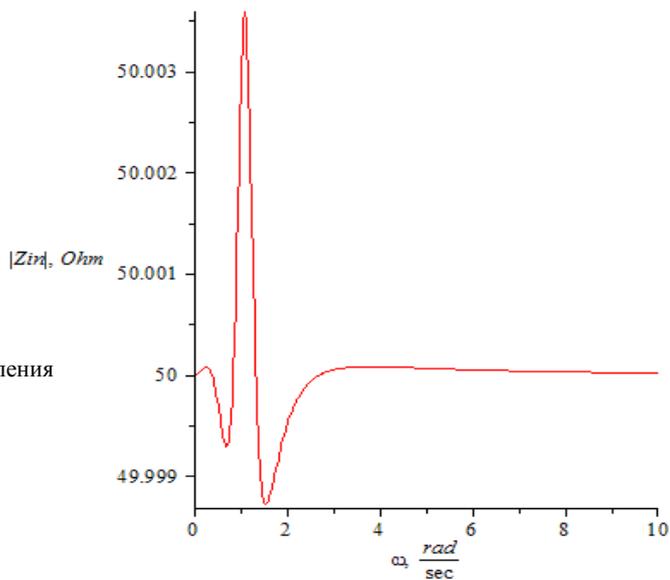


Рис. 14. Зависимость входного сопротивления ФПИ от частоты

Пример расчета произвольной цепи

Итак, мы синтезировали цепи, для которых уравнение (7) имеет решение (приближенное), поэтому ФПИ состоял лишь из параллельного соединения ФНЧ и ФВЧ. Однако не каждый ФПИ обладает таким свойством. В этом случае необходимо искать компенсирующую цепь в виде параллельного соединения ФВЧ и ПФ. Рассмотрим пример, соответствующий данной ситуации.

Рассчитаем компенсирующую цепь для изображенного на рис. 15 ФНЧ. Элементы этого фильтра выбраны случайно, но так, чтобы не нарушилось условие (1). Передаточная функция этой цепи

$$H = \frac{1}{1 + 12s + 10s^2 + 20s^3},$$

и ее модуль не превышает 1 во всем диапазоне частот.

Определим входной импеданс цепи компенсации из уравнения (2):

$$Z_c = \frac{50 \cdot (1 + 12s + 10s^2 + 20s^3)}{s \cdot (11 + 8s + 20s^2)}.$$

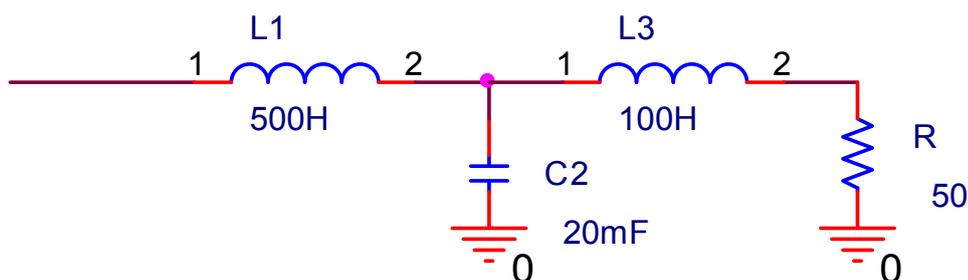


Рис. 15. Исходный фильтр нижних частот

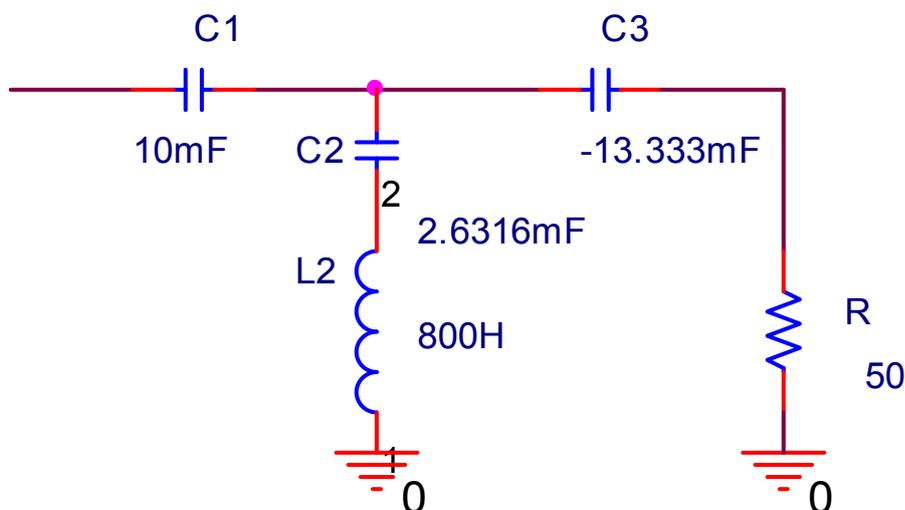


Рис. 16. Реализация ФВЧ с одной нагрузкой на выходе

Запишем уравнение (7):

$$D^2 = (124s^2 + 380s^4 + 400s^6) \cdot 50^2.$$

Правая часть этого выражения не является полным квадратом, поэтому уравнение (7) неразрешимо. Следовательно, невозможно синтезировать лестничную цепь с таким входным сопротивлением. Поэтому попробуем найти две цепи (ФВЧ и ПФ), параллельное соединение которых даст необходимый нам импеданс Z_c . Представим входные сопротивления цепей следующими выражениями:

$$Z_1 = \frac{50 \cdot (1 + 12s + 10s^2 + 20s^3)}{b \cdot s + a \cdot s^2 + 20s^3},$$

$$Z_2 = \frac{50 \cdot (1 + 12s + 10s^2 + 20s^3)}{c \cdot s^2 + d \cdot s},$$

где a, b, c, d – коэффициенты, которые нужно определить. Выражение для Z_1 соответ-

ствует ФВЧ, а для Z_2 – ПФ. Условие постоянства входного импеданса приводит к следующей системе уравнений:

$$a + c = 8, \quad (11)$$

$$b + d = 11. \quad (12)$$

Теперь запишем условие реализуемости цепи с входным сопротивлением Z_2 :

$$2500 \cdot (20s^3 + 12s) \cdot (d \cdot s) - 2500 \cdot (1 + 10s^2) \cdot (c \cdot s^2) = D^2.$$

Отсюда находим соотношение между c и d : $c = 12 \cdot d$ или $c = 2 \cdot d$.

Если искать цепь ФВЧ так, как это делалось для фильтров Чебышева, то мы получим цепь, изображенную на рис. 16. Этот результат соответствует решению $a = 1,25$, $b = 7,625$, $c = 6,75$, $d = 3,375$. Мы видим, что

$C_1 > \frac{|C_3|}{2}$, поэтому емкость C_1 невозможно

представить в виде последовательного соединения двух положительных емкостей так, как это необходимо для преобразования рис. 11. Для преодоления этой трудности будем искать ФВЧ в виде лестничной цепи с нагрузками на обоих концах (рис. 17), поскольку соотношение величин емкостей можно регулировать, разбивая нагрузку на две части – одна на входе, а другая на выходе.

В связи с этим условие реализуемости (7) необходимо применять к $Z_1 - r$. Выбрав $r = 45,392$ (позднее будет ясна причина такого выбора) и решая совместно с этим уравнением уравнения (11) и (12) для случая $c = 2 \cdot d$, мы получим следующий результат: $a = 4,093$, $b = 9,046$, $c = 3,907$, $d = 1,953$.

Мы не будем приводить расчетов для определения элементов ФВЧ, поскольку они полностью аналогичны рассмотренному выше примеру с фильтром Чебышева. На рис. 18 представлен конечный результат. Для исключения отрицательной емкости из цепи опять можно воспользоваться преобразованием Т-образной цепи в мостовую схему. Мы выбрали $r = 45,392$, чтобы избавиться-

ся от емкости C_2 при преобразовании, хотя, в принципе, r может быть и другим.

Перейдем к расчету элементов ПФ:

$$Z_2 = \frac{50 \cdot (1 + 12s + 10s^2 + 20s^3)}{3,907s^2 + 1,953s}$$

Для цепи ПФ мы можем выбрать сопротивление нагрузки на выходе любой величины. Не будем его фиксировать, а оставим в качестве параметра r . Тогда для данной цепи уравнение (7) приводит к следующему решению:

$$D = 31,252 \cdot \sqrt{r} \cdot s.$$

Мы видим, что D оказалось нечетным, поэтому при сопоставлении кумулянтов с многочленами импеданса четные и нечетные полиномы необходимо поменять местами. В результате чего мы получим:

$$y_2 = \frac{0,125s}{\sqrt{r}}, \tag{13}$$

$$1 + y_2 \cdot z_1 = \frac{1,6 \cdot (12 + 20s^2)}{\sqrt{r}}, \tag{14}$$

$$1 + y_2 \cdot z_3 = 0,062 \cdot \sqrt{r}. \tag{15}$$

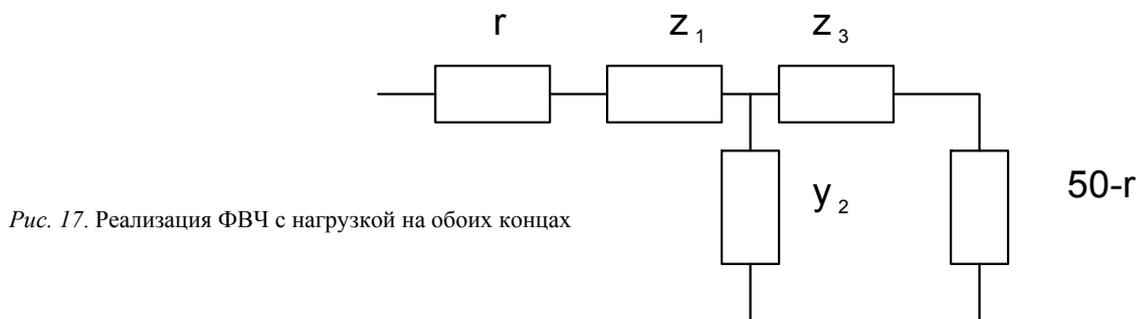


Рис. 17. Реализация ФВЧ с нагрузкой на обоих концах

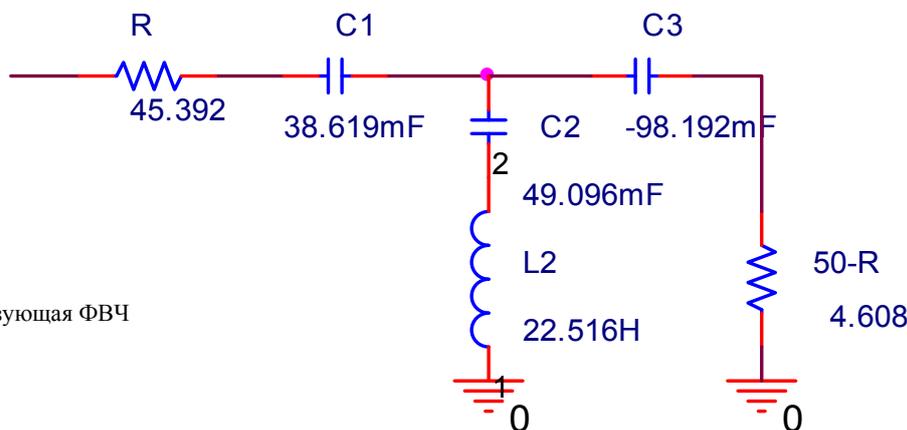


Рис. 18. Цепь, реализующая ФВЧ

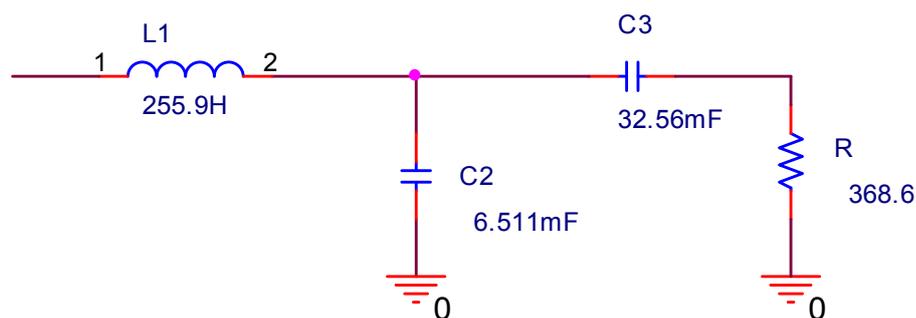


Рис. 19. Схема цепи с входным сопротивлением Z_2

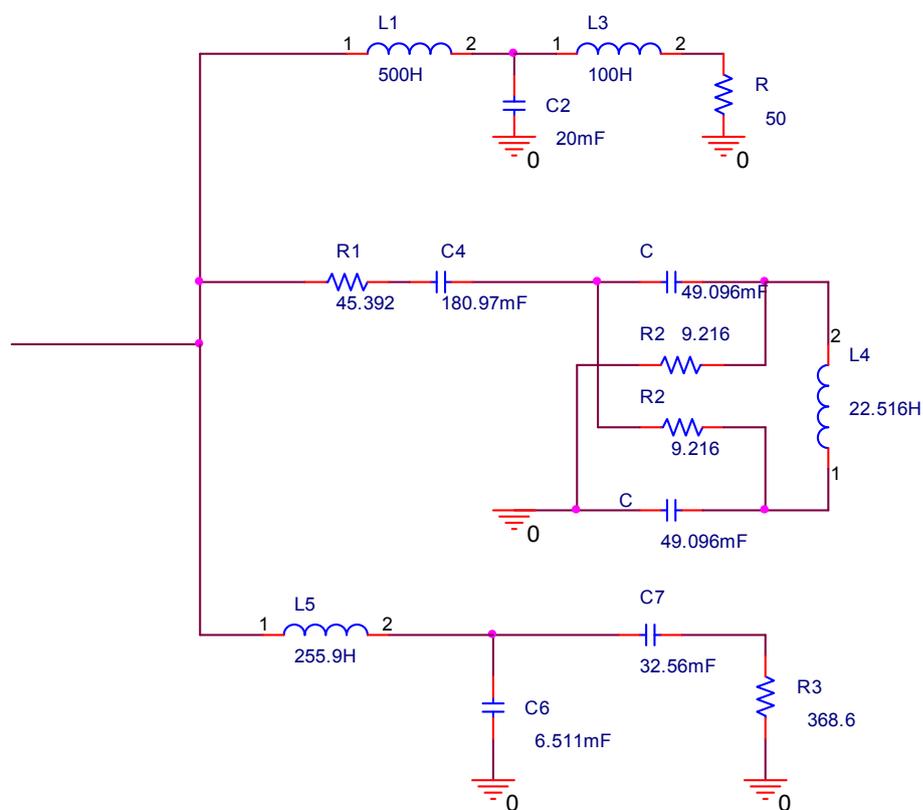


Рис. 20. ФПИ с передаточной функцией
$$P = \frac{1}{1 + 12s + 10s^2 + 20s^3}$$

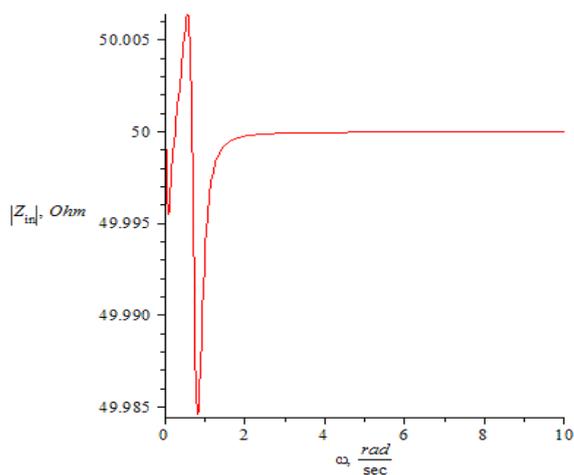


Рис. 21. Зависимость входного сопротивления ФПИ от частоты

Из уравнения (14) видно, что если выбрать r из условия $\sqrt{r}=1,6 \cdot 12$, то в ветви z_1 можно избавиться от одной реактивности (в данном случае от емкости). Поэтому выбираем $r = 368,6$. Тогда из уравнения (13) следует, что y_2 – это емкость величиной $6,511 \text{ mF}$, из уравнения (14) следует, что z_1 – это индуктивность величиной $255,9 \text{ H}$, а из (15), что z_3 – это емкость $32,56 \text{ mF}$. Схема искомого ПФ изображена на рис. 19. Как и в случае синтеза ФВЧ мы выбрали r с целью исключения емкости из цепи.

Таким образом, ФПИ, содержащий цепь, изображенную на рис. 15, в качестве ФНЧ состоит из трех параллельных звеньев, показанных на рис. 15, 18, 19. Общая схема фильтра представлена на рис. 20, а зависимость его входного сопротивления от частоты изображена на рис. 21.

Заключение

Итак, на конкретных примерах мы показали возможность реализации ФПИ без дополнительных последовательных сопротивлений не только на основе фильтров Баттерворта, но и на основе других фильтров. Препятствием при использовании рассмотренной выше методики синтеза ФПИ

является возможное возникновение отрицательной реактивности. Но данная проблема решается с помощью соответствующих преобразований цепи.

Хотя здесь рассмотрены примеры цепей третьей степени, приведенный выше подход вполне можно применить к цепям более высокого порядка. Также входное сопротивление цепи высокого порядка в ряде случаев можно реализовать с помощью параллельного соединения цепей более низкого порядка, которые проще анализировать и реализовывать.

Список литературы

1. Лэнди Р., Дэвис Д., Албхерт А. Справочник радиоинженера. М.; СПб.: Гос. энергетическое изд-во, 1961. 704 с.
2. Черепанов В. П. Диагностика заряженных пучков. Новосибирск, 2007. 100 с.
3. Херреро Д., Уиллонер Г. Синтез фильтров: Пер. с англ. / Под ред. И. С. Гоноровского. М.: Сов. радио, 1971. 232 с.
4. Zverev A. Handbook of Filter Synthesis. N. Y.; L.; Sydney: John Wiley and Sons, Inc., 1967. 576 с.

Материал поступил в редколлегию 02.07.2012

G. G. Kitushin

SOME EXAMPLES OF THE THIRD ORDER FILTERS WITH CONSTANT INPUT IMPEDANCE SYNTHESIS

The article is devoted to filter with constant impedance synthesis. The filter consists of appropriate ladder networks shunt connection. The third order Chebyshev filters and a filter with nonclassical transfer function are considered as examples.

Keywords: constant impedance filter, Chebyshev, cumulant.