

В.В. Козловский¹, Р.М. Лысенко²¹ДУИКТ, ДТН, доцент²ИСЗІ НТУУ «КПІ», аспірант

СИНТЕЗ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ С РАСШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРАЖДЕНИЯ

Решена задача увеличения полосы заграждения распределенного ФНЧ на основе многоступенчатых линий.

Ключевые слова: распределенные фильтры, нижние частоты, полосы заграждения, многоступенчатые линии, фильтры с расширенной частотной областью заграждения, полюса ступенчатой секции.

Введение

Существенным недостатком частотных распределённых фильтров нижних частот (ФНЧ), составленных из отрезков линий передачи с равными электрическими длинами, является наличие паразитных (нерабочих) полос пропускания, которые являются источником формирования несанкционированных каналов утечки информации [1,2]. В [1] показано, что центральные частоты несанкционированных каналов определяются резонансными частотами разомкнутых секций ФНЧ (полюсами сопротивления) и равны

$$\omega_k = \frac{k\pi}{t_c}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где t_c - время задержки однородной секции, то есть секции с постоянным волновым сопротивлением. При этом максимум затухания определяется нулями сопротивления разомкнутой секции:

$$\Omega_k = \frac{(2k-1)\pi}{2t_c}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Для увеличения полосы заграждения при разработке распределённых фильтров уменьшают время задержки t_c или используют комбинации различных фильтров: полосовых фильтров, фильтров гармоник, заградительных фильтров. В результате резко возрастают стоимостные и массогабаритные характеристики фильтрующих устройств. При этом всё равно не удаётся избавиться от паразитных каналов, поскольку принципы построения элементов фильтров остаются прежними [2].

С физической точки зрения источником паразитных полос пропускания фильтров являются волновые процессы, происходящие в линиях передачи. В результате этого линия как колебательная система в принципе является многорезонансной системой. Теоретически количество нулей и полюсов сопротивления такой системы равно бесконечности. Поэтому избавиться от многорезонансности в распределённой цепи невозможно.

В статье предлагается для увеличения полосы заграждения ФНЧ в качестве секции фильтра использовать нерегулярный (неоднородный) отрезок линии передачи. При этом изменение волнового сопротивления вдоль длины подбирается таким образом, чтобы увеличить полосу заграждения фильтра.

Основная часть

Основная идея работы состоит в том, чтобы увеличить расстояние между первым нулевым полюсом и первым ненулевым полюсом сопротивления разомкнутой нерегулярной линии (рис. 1) без уменьшения электрической длины (времени задержки) секции.

Поскольку резонансные частоты являются полюсами входного сопротивления разомкнутой линии, а противорезонансные частоты являются нулями входного сопротивления разомкнутой линии, то для получения широкой полосы заграждения ФНЧ необходимо частоту ω_1 взять как можно большей (рис. 1). Для того, чтобы и вторая полоса заграждения была как можно шире необходимо увеличить вторую резонансную частоту ω_2 , то есть надо осуществить разрядку спектра резонансных частот (совокупность резонансных и противорезонансных частот образует спектр линии передачи).

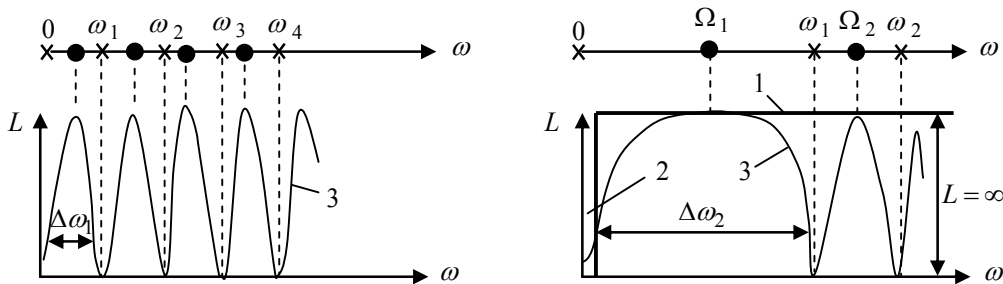


Рис. 1. Связь затухания ФНЧ с расположением резонансных и противорезонансных частот: 1 – характеристика идеального ФНЧ; 2 – рабочая область; 3 – характеристика реального ФНЧ

В качестве элемента ФНЧ будем использовать многоступенчатую линию передачи, причём каждая ступень имеет одинаковое время задержки. Такие цепи относятся к цепям Ричардса стержневой структуры [3]. Тогда в соответствии с теорией цепей Ричардса [3] сопротивление разомкнутой линии можно представить в виде

$$Z(s) = A \frac{s^2 + \delta_1^2}{s(s^2 + \zeta_1^2)} \cdot \frac{s^2 + \delta_2^2}{(s^2 + \zeta_2^2)} \cdots \frac{s^2 + \delta_n^2}{(s^2 + \zeta_n^2)}, \quad A > 0, \quad (3)$$

$$0 < \delta_1 < \zeta_1 < \delta_2 < \cdots < \delta_n < \zeta_n, \quad s = thpt_c,$$

где A - постоянный положительный множитель, p - комплексная частотная переменная. Не нарушая общности примем $A=1$.

Выражение (3) можно записать в виде отношения двух полиномов

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2s^2 + a_4s^4 + \dots}{b_1s + b_3s^3 + b_5s^5 + \dots}. \quad (4)$$

Очевидно, что коэффициенты полиномов числителя и знаменателя $Z(s)$ полностью определяются резонансными и противорезонансными частотами.

Обозначим через n максимальную степень полиномов числителя или знаменателя $Z(s)$. Тогда в соответствии с процедурой Ричардса находим явные выражения для волновых сопротивления отдельных ступеней (единичных элементов (ЕЭ)): многоступенчатой линии (рис. 2) для различных n .

При $n=2$

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2 s^2}{b_1 s} \cdot Z_{\epsilon 1} = \frac{a_0 + a_2}{b_1}, Z_{\epsilon 2} = Z_{\epsilon 2} \frac{a_0}{a_2}. \quad (5)$$

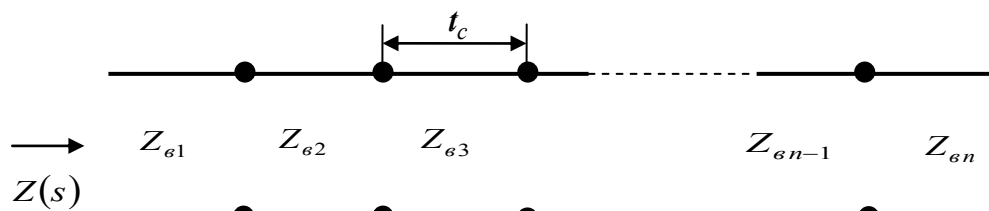


Рис.2. Многоступенчатая разомкнутая линия

При $n=3$

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2 s^2}{b_1 s + b_3 s^3}, \quad Z_{\epsilon 1} = \frac{a_0 + a_2}{b_1 + b_3}, \quad Z_{\epsilon 2} = \frac{a_0 + Z_{\epsilon 1} b_3}{b_1 - \frac{a_0}{Z_{\epsilon 1}}}, \quad Z_{\epsilon 3} = \frac{Z_{\epsilon 2} a_0}{Z_{\epsilon 1} b_3}. \quad (6)$$

При $n=4$

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2 s^2 + a_4 s^4}{b_1 s + b_3 s^3}, \quad Z_{\epsilon 1} = \frac{a_0 + a_2 + a_4}{b_1 + b_3}, \quad Z_{\epsilon 2} = \frac{a_0 - a_4 + Z_{\epsilon 1} b_3}{b_1 + \frac{a_4 - a_0}{Z_{\epsilon 1}}}, \quad (7)$$

$$Z_{\epsilon 3} = \frac{a_0 + \frac{a_4 Z_{\epsilon 2}}{Z_{\epsilon 1}}}{b_1 - a_0 \left(\frac{1}{Z_{\epsilon 2}} + \frac{1}{Z_{\epsilon 1}} \right)}, \quad Z_{\epsilon 4} = \frac{Z_{\epsilon 3} Z_{\epsilon 1} a_0}{Z_{\epsilon 2} a_4}. \quad (8)$$

При $n=5$

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2 s^2 + a_4 s^4}{b_1 s + b_3 s^3 + b_5 s^5}, \quad Z_{\epsilon 1} = \frac{a_0 + a_2 + a_4}{b_1 + b_3 + b_5}, \quad Z_{\epsilon 2} = \frac{2a_0 + a_2 + Z_{\epsilon 1} (b_5 - b_1)}{b_1 - b_5 + \frac{a_4 - a_0}{Z_{\epsilon 1}}}, \quad (9)$$

$$Z_{\epsilon 3} = \frac{a_0 + \frac{Z_{\epsilon 2} a_4 - b_5 (Z_{\epsilon 1} + Z_{\epsilon 2})}{Z_{\epsilon 1}}}{b_1 - a_0 \left(\frac{1}{Z_{\epsilon 1}} + \frac{1}{Z_{\epsilon 2}} \right) + \frac{Z_{\epsilon 1} b_5}{Z_{\epsilon 2}}}, \quad Z_{\epsilon 4} = \frac{a_0 + \frac{Z_{\epsilon 1} Z_{\epsilon 3} b_5}{Z_{\epsilon 2}}}{b_1 - a_0 \left(\frac{1}{Z_{\epsilon 1}} + \frac{1}{Z_{\epsilon 2}} + \frac{1}{Z_{\epsilon 3}} \right)},$$

$$Z_{\epsilon 5} = \frac{Z_{\epsilon 2} Z_{\epsilon 4} a_0}{Z_{\epsilon 3} Z_{\epsilon 1} b_5}. \quad (10)$$

Определим потенциально возможную ширину первой области заграждения ФНЧ, построенного из набора многоступенчатых секций. Данная задача сводится к нахождению наибольшего значения первого полюса (первой резонансной частоты ω_1) входного сопротивления многоступенчатой линии $Z(s)$. Тогда, как следует из (3), первая резонансная частота определяется сомножителем $(s^2 + \zeta_1^2)$. Из решения уравнения $s^2 + \zeta_1^2 = 0$ находим первую резонансную частоту:

$$\omega_1 = \frac{1}{t_c} \operatorname{arctg} \zeta_1. \quad (11)$$

При $\zeta_1 \rightarrow \infty$ выражение (11) приводит к неравенству)

$$\omega_1 \leq \frac{1}{2} \frac{\pi}{t_c}. \quad (12)$$

С другой стороны, отрезок однородной разомкнутой линии передачи имеет резонансную частоту (t – время задержки секции фильтра на однородной линии)

$$\omega_{1od} = \frac{\pi}{t}. \quad (13)$$

Теперь предположим, что однородная линия и многоступенчатая линия имеют одинаковое время задержки, то есть $t = nt_c$, где n – количество ЕЭ многоступенчатой линии. Тогда (12) примет вид

$$\omega_1 \leq \frac{n}{2} \frac{\pi}{t}. \quad (14)$$

Из сравнения (13) с (14) следует, что в многоступенчатой линии обеспечить выигрыш в протяжённости области заграждения по сравнению с однородной линией ($\omega_1 > \omega_{1od}$) можно только, когда

$$n \geq 3. \quad (15)$$

Таким образом, простейшей многоступенчатой линией, обеспечивающей выигрыш в протяжённости области заграждения является трёхступенчатая линия. В этом случае возможный выигрыш будет не более чем в 1,5 раза. В общем случае при использовании n – ступенчатой линии может быть достигнут выигрыш не более, чем в $n/2$ раз.

В общем случае распределение нулей и полюсов физически реализуемой многоступенчатой линии показано на рис. 3.

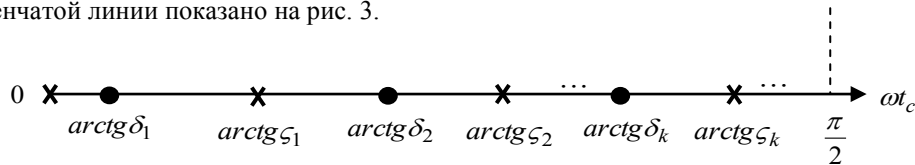


Рис. 3. Распределение нулей и полюсов сопротивления многоступенчатой секции: t_c – время задержки ЕЭ

Воспользуемся полученными результатами для анализа амплитудно-частотной характеристики ФНЧ, построенного на основе трёхступенчатой секции.

В данном случае

$$Z(s) = \frac{s^2 + \delta^2}{s(s^2 + \zeta^2)}, \quad 0 < \delta < \zeta. \quad (16)$$

Согласно (37) находим волновые сопротивления

$$Z_{\epsilon 1} = \frac{\delta^2 + 1}{\zeta^2 + 1}, \quad Z_{\epsilon 2} = \frac{\delta^2 + Z_{\epsilon 1}}{\zeta^2 - \frac{\delta^2}{Z_{\epsilon 1}}}, \quad Z_{\epsilon 3} = \delta^2 \frac{Z_{\epsilon 2}}{Z_{\epsilon 1}}. \quad (17)$$

Электрическая длина ЕЭ: $\omega_1 t_c = \text{arctg} \zeta$. Следовательно, чтобы был выигрыш по полосе заграждения электрическая длина трёхступенчатой секции должна быть больше π , то есть должно выполняться условие $\omega_1 t = 3\omega_1 t_c = 3\text{arctg} \zeta > \pi$. Отсюда находим

$$\frac{\pi}{3} < \text{arctg} \zeta < \frac{\pi}{2}. \quad (18)$$

В случае n – ступенчатой линии для получения выигрыша по полосе заграждения в $\frac{n}{2}$ раз должно быть выполнено неравенство

$$\frac{\pi}{n} < \text{arctg} \zeta_1 < \frac{\pi}{2}. \quad (19)$$

Условия (18), (19) можно переформулировать иначе:

$$\text{tg} \frac{\pi}{3} = \sqrt{3} < \zeta < \infty, \quad \text{tg} \frac{\pi}{n} < \zeta_1 < \infty. \quad (20)$$

Оценивать выигрыш по полосе заграждения различных ФНЧ будем по отношению первого полюса трёхступенчатой секции к первому полюсу одноступенчатой секции (однородной линии), поскольку полюсы (рис. 4) определяют центральные частоты первых паразитных полос пропускания (первых частотных каналов утечки информации)

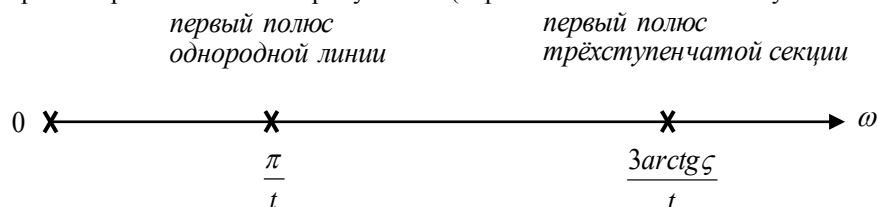


Рис. 4. Взаимное расположение первого полюса однородной линии и трёхступенчатой секции

Из рис. 4 следует, что выигрыш по области заграждения ФНЧ на трёхступенчатых секциях составляет

$$B = \frac{3 \operatorname{arctg} \zeta}{\pi}. \quad (21)$$

При использовании n - ступенчатых секций выигрыш определяется аналогичным выражением

$$B = \frac{n \cdot \operatorname{arctg} \zeta_1}{\pi}. \quad (22)$$

Заклучение

Решена задача увеличения полосы заграждения распределенного ФНЧ на основе многоступенчатых линий. Полученные результаты позволяют проектировать фильтры с расширенной частотной областью заграждения. Из формулы (22) следует, что чем больше количество ступеней n , тем более широкую полосу заграждения можно получить. В пределе при $n \rightarrow \infty$ и времени задержки ступени $t_c \rightarrow 0$ можно получить сколь угодно широкую защитную полосу. Рассмотренный выше предельный случай соответствует ступени с непрерывным законом изменения волнового сопротивления.

На основании полученных результатов были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики односекционного фильтра на основе однородной и трёхступенчатой линии (рис. 5). Из анализа характеристик рис. 5 следует, что с увеличением первого полюса сопротивления секции фильтра (зависимости 2 и 3) возрастает протяжённость полосы заграждения.

Таким образом для обеспечения более широкой области заграждения необходимо увеличивать значение первого полюса ступенчатой секции (рис.4).

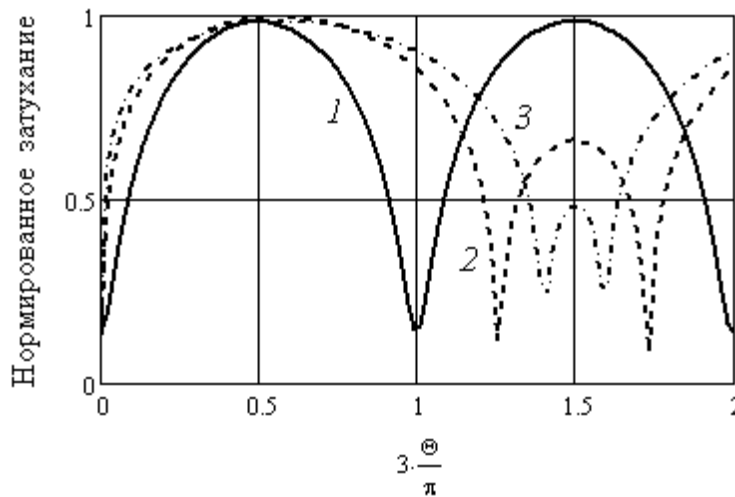


Рис. 5. Характеристика затухания односекционного ФНЧ (R - нагрузки фильтра, $\Theta = \omega t_c$):

1 – секция на основе однородной линии ($\delta = 0,577$; $\zeta = 1,732$; $R = 12Z_{e1}$);

2 – секция на основе трёхступенчатой линии (

$$\delta = 0,35; \zeta = 4; R = 60Z_{e1}; \frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} = 0,2; \frac{Z_{e3}}{Z_{e1}} = 0,37);$$

3 - секция на основе трёхступенчатой линии (

$$\delta = 0,35; \zeta = 10; R = 363Z_{e1}; \frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} = 0,135; \frac{Z_{e3}}{Z_{e1}} = 1,5)$$

Литература

1. Козловский В.В., Лысенко Р.М. Концептуальная модель СВЧ канала утечки информации по цепи питания //Сучасний захист інформації. ДУІКТ. - 2013. - №1.-С.12-18.
2. Хорошко В.А., Чекатков А.А. Методы и средства защиты информации. - К.: Юниор, 2003. – 502 с.
3. Giovanni Miano, Antonio Maffucci. Transmission Lines and Lumped Circuits (Electromagnetism). - Academic Press, 2001. - 479 p.

Надійшла до редколегії 05.02.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Петров А.С.

В.В. Козловський, Р.М. Лисенко
СИНТЕЗ БАЗОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ФІЛЬТР НИЖНІХ ЧАСТОТ З РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ЗАГОРОДЖЕННЯ

Розв'язана задача збільшення смуги загородження розподіленого фільтра нижніх частот на основі багатоступеневих ліній.

Ключові слова: розподілені фільтри, нижні частоти, смуги загородження, багатоступінчасті лінії, фільтри з розширеною частотною областю загородження, полюса ступінчастою секції.

V.V. Kozlovskiy, R.M. Lysenko
SYNTHESIS OF THE BASIC ELEMENTS FOR DISTRIBUTED LOW-PASS FILTERS WITH THE EXPANDED BAND BOOM

Solved the problem of increasing the stopband distributed low-pass filter based on multi-lines.

Keywords: distributed filters, bass, stopband, multi-line filters with extended frequency region fences, poles speed section.