

Лекция №8.

Реализация ЧИФ.

([3]; [4] стр. 35-75)

I. Реализация лестничной структуры ФНЧ

На рисунках 8.1 и 8.2 приведены схемы ФНЧ реализующие передаточные функции, содержащие только полюса (тип Р или Т).

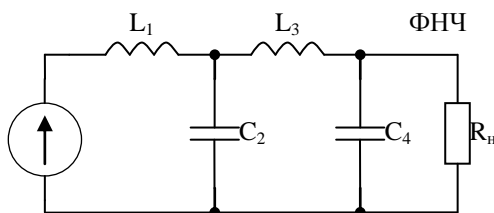


Рис 8.1 ФНЧ порядка n=4

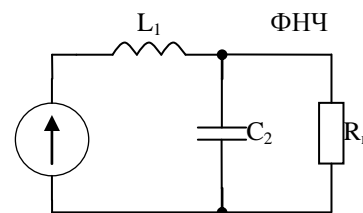


Рис 8.2 ФНЧ порядка n=2

Алгоритм расчёта лестничной структуры на примере ФНЧ для n=4: (рис 8.1)

1. По полюсам, рассчитанным при решении задачи синтеза, записываем передаточную функцию ФНЧ:

$$K(p) \underset{\text{(по полюсам)}}{=} \frac{A_0}{p^4 + B_3 p^3 + \dots + B_0}$$
$$A_0 = B_0$$

2. По принципиальной схеме ФНЧ 4-го порядка (в общем случае n-го) определяем передаточную функцию K(p).

$$K(p) \underset{\text{(по схеме)}}{=} \frac{C_0}{p^4 + D_3 p^3 + \dots + D_0}$$
$$C_0 = D_0$$

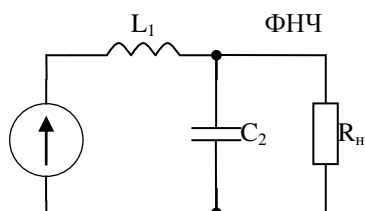
3. Составим систему уравнений, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях p . При этом сопротивление нагрузки считается заданным.

$$\begin{cases} C_0 = A_0 \\ D_3 = B_3 \\ D_2 = B_2 \\ D_1 = B_1 \end{cases} \Rightarrow L_1, C_2, L_3, C_4$$

4. Из решения системы найдем значения элементов схемы.

Пример.

Используя предложенный алгоритм найдем формулы для расчета L_1 и C_2 ФНЧ Баттерворда порядка $n=2$, схема которого приведена на рис 8.2 и повторена ниже



$n=2$

Решение.

1. Нормированная передаточная функция фильтра низких частот Баттерворда второго порядка имеет два полюса и принимает вид

$$K(\hat{p}) = \frac{1}{\hat{p}^2 + \sqrt{2} \cdot \hat{p} + 1}$$

2. Денормируем передаточную функцию, используя замену $\hat{p} = \frac{p}{\omega_n}$. Тогда

денормированная передаточная функция фильтра низких частот Баттерворда второго порядка принимает вид

$$K(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + \sqrt{2}\omega_n p + \omega_n^2}.$$

3. Найдем передаточную функцию схемы, представленной на рисунке

$$K(p) = \frac{\frac{1}{L_1 C_2}}{p^2 + \frac{1}{C_2 R_n} \cdot p + \frac{1}{L_1 C_2}}.$$

4. Составим систему уравнений, приравняв коэффициенты при одинаковых степенях p и из решения системы найдем значения элементов схемы. При этом сопротивление нагрузки считается заданным.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{L_1 C_2} &= \omega_n^2 \\ \frac{1}{C_2 R_n} &= \sqrt{2} \omega_n \end{aligned} \right\} \rightarrow L_1, C_2$$

II. Реализация лестничной структуры для фильтров других типов

Реализация ФВЧ

Используем формулу $\hat{p} = \frac{\omega_n}{S}$. Пересчитаем ёмкость ФНЧ в двухполюсник ФВЧ.

$$\begin{array}{c} C_{\text{нч}} \\ \text{---} \text{---} \\ | \\ | \\ \text{---} \text{---} \end{array} \quad p \cdot C_{\text{нч}} = \omega_n \cdot \hat{p} \cdot C_{\text{нч}} = \frac{\omega_n \cdot \omega_n \cdot C_{\text{нч}}}{S} \Rightarrow Y_{\text{снч}} = \frac{1}{S \cdot \frac{1}{\omega_n^2 \cdot C_{\text{нч}}}}, \text{ где } \frac{1}{\omega_n^2 \cdot C_{\text{нч}}} = L_{\text{вч}}$$

$$\begin{array}{c} L_{\text{вч}} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \quad L_{\text{вч}} = \frac{1}{\omega_n^2 \cdot C_{\text{нч}}}. \text{ Итак, ёмкость ФНЧ пересчитывается в индуктивность ФВЧ.}$$

Аналогично доказывается, что индуктивность ФНЧ пересчитывается в ёмкость ФВЧ.

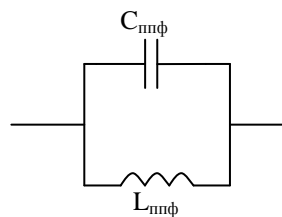
Реализация полосно-пропускающего фильтра

Используем формулу $\hat{p} = \frac{S^2 + \omega_n^2}{S \cdot B}$, $\omega_n = \omega_0$. Пересчитаем ёмкость ФНЧ в двухполюсник ППФ.

$$\begin{array}{c} C_{\text{нч}} \\ \text{---} \text{---} \\ | \\ | \\ \text{---} \text{---} \end{array} \quad p \cdot C_{\text{нч}} = \omega_0 \cdot \hat{p} \cdot C_{\text{нч}} = \\ = \frac{S^2 \omega_0 C_{\text{нч}} + \omega_0^3 C_{\text{нч}}}{S \cdot B} = S \cdot \frac{\omega_0 \cdot C_{\text{нч}}}{B} + \frac{1}{S \cdot \frac{B}{\omega_0^3 \cdot C_{\text{нч}}}}, \text{ где } \frac{\omega_0 \cdot C_{\text{нч}}}{B} = C_{\text{ппф}}, \text{ а } \frac{B}{\omega_0^3 \cdot C_{\text{нч}}} = L_{\text{ппф}}$$

$$C_{\text{ппф}} = \frac{\omega_0 \cdot C_{\text{нч}}}{B}$$

$$L_{\text{ппф}} = \frac{B}{\omega_0^3 \cdot C_{\text{нч}}}$$



Итак, ёмкость ФНЧ пересчитывается в параллельный колебательный контур ППФ.

Аналогично доказывается, что индуктивность ФНЧ пересчитывается в последовательный колебательный контур ППФ.

Достоинство лестничной структуры: наиболее дешевый вариант реализации.

Недостатки:

1. Нестабильность (изменение одного из элементов приводит к изменению всей диаграммы полюсов и к большому искажению АЧХ);
2. Сложность расчетов.

III. Каскадная RLC реализация

Реализуется с помощью фильтров первого и второго порядка, между которыми ставятся развязывающие каскады.

Достоинства:

1. Более высокая стабильность;
2. Простота расчета;

Недостаток: более дорогая схема.

Отдельные каскады подбираются из справочников по диаграмме нулей и полюсов, которая предварительно разбивается на парциальные диаграммы, содержащие либо один действительный полюс, либо два комплексно – сопряженных полюса. Кроме того, парциальная диаграмма может содержать не более двух нулей. Нули в парциальную диаграмму подбираются по принципу близости к соответствующим полюсам. Тогда нестабильность положения полюсов, вызванная нестабильностью элементов схемы, компенсируется нестабильностью нулей.

Пример

По заданной диаграмме нулей и полюсов (рис. 8.3) составим принципиальную схему каскадной реализации фильтра пятого порядка.

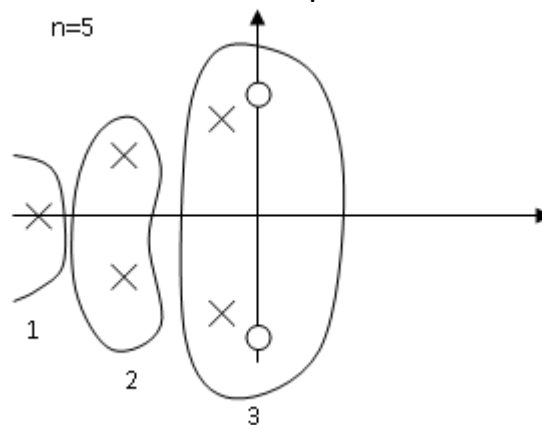


Рис.8.3

Схема представлена тремя каскадами, которые выбраны в соответствии с парциальными диаграммами по таблице (см. [3]-стр.23-24,26-27) и изображена на рис.8.4

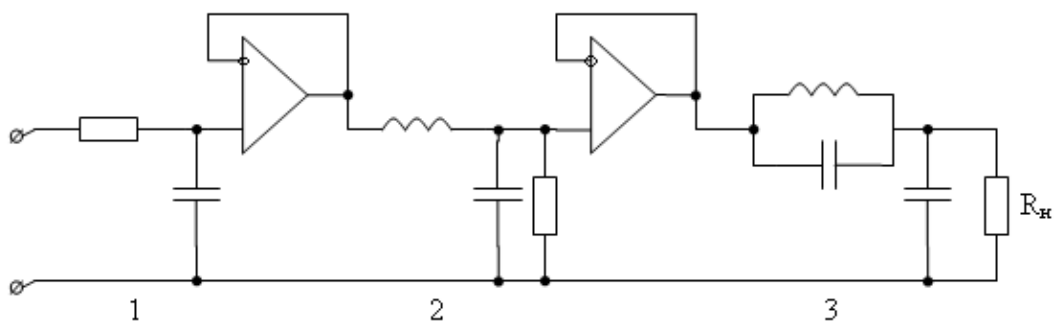


Рис. 8.4

Каскады схемы рассчитываются также как лестничные структуры. Но каждый каскад рассчитывается отдельно, следовательно, в системе не будет больше двух уравнений.

IV.Каскадная ARC реализация.

Каскадная реализация реализуется с помощью последовательного соединения фильтров 1^{ого} и 2^{ого} порядков, построенных на операционных усилителях. При этом развязывающие каскады не нужны, поскольку развязка осуществляется в самом операционном усилителе. Выбор каскадов осуществляется по тому же принципу, что и в каскадной RLC реализации. То есть отдельные каскады подбираются из справочников (см. [3] стр.30-33) по диаграмме нулей и полюсов, которая предварительно разбивается на парциальные диаграммы, содержащие либо один действительный полюс, либо два комплексно – сопряженных полюса. Кроме того, парциальная диаграмма может содержать не более двух нулей.

Достоинства:

1. Сочетание усиления с фильтрацией.
2. Отсутствие развязывающих (буферных) каскадов.
3. Отсутствие индуктивности.

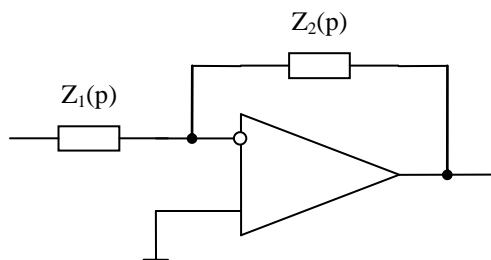
Недостатки:

1. Узкий диапазон частот.
2. Высокая стоимость.

Приведем примеры ARC – фильтров первого и второго порядков и формулы для расчета их передаточных функций.

ARC – фильтры первого порядка.

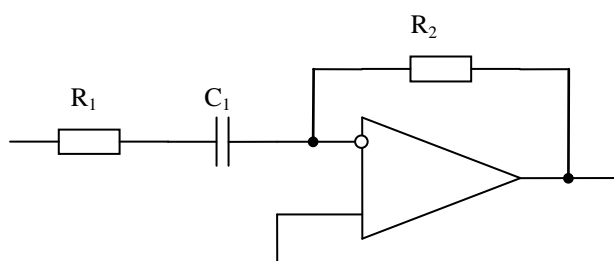
Общая схема и общая формула передаточной функции.



$$K(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}$$

Частные случаи

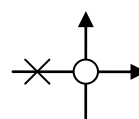
1. Частотно независимая отрицательная обратная связь



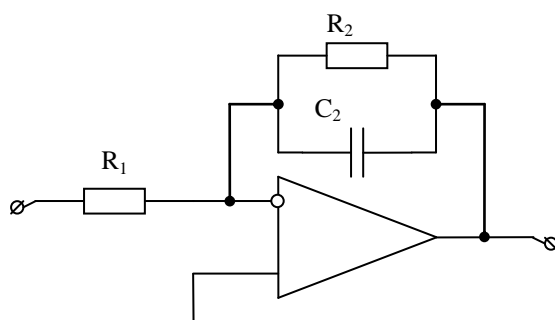
Передаточная функция

$$K(p) = \frac{pC_1R_2}{pC_1R_1 + 1}$$

Диаграмма нулей и полюсов



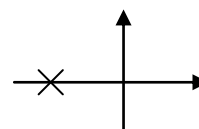
2. Частотно зависимая отрицательная обратная связь



Передаточная функция

$$K(p) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{pC_2R_2 + 1}$$

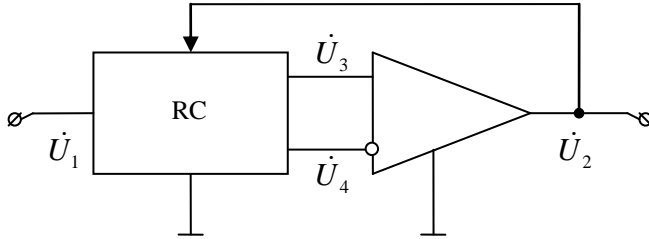
Диаграмма нулей и полюсов



ARC – фильтры второго порядка.

Расчет передаточной функции. Общий случай.

Найдем $K(p) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$.



Для идеального ОУ с ООС выполняется равенство $\dot{U}_3 = \dot{U}_4$. Тогда используя принцип

суперпозиции можно записать $K(p) = \frac{C_0}{p^4 + D_3 p^3 + \dots + D_0}$, где:
 $C_0 = D_0$

$$K_{31}(p) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_1} \Big|_{\dot{U}_2=0} = 0 \quad K_{41}(p) = \frac{\dot{U}_4}{\dot{U}_1} \Big|_{\dot{U}_2=0} = 0$$

$$K_{32}(p) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_2} \Big|_{\dot{U}_1=0} = 0 \quad K_{42}(p) = \frac{\dot{U}_4}{\dot{U}_2} \Big|_{\dot{U}_1=0} = 0$$

передаточные функции четырехполюсников, полученных после устранения ОУ из схемы ARC фильтра и замыкания двух соответствующих полюсов из четырех.

$$\begin{cases} \dot{U}_3 = K_{31}(p) \cdot \dot{U}_1 + K_{32}(p) \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{U}_4 = K_{41}(p) \cdot \dot{U}_1 + K_{42}(p) \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{U}_4 = \dot{U}_3 \end{cases}$$

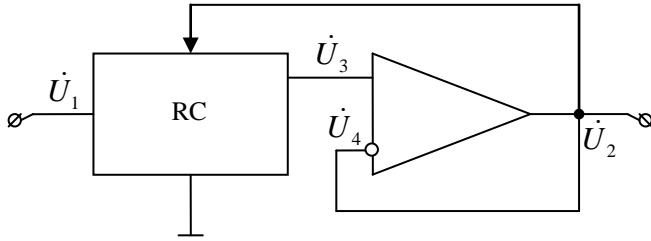
$$K_{31}(p) \cdot \dot{U}_1 + K_{32}(p) \cdot \dot{U}_2 = K_{41}(p) \cdot \dot{U}_1 + K_{42}(p) \cdot \dot{U}_2$$

$$\dot{U}_1 (K_{31}(p) - K_{41}(p)) = \dot{U}_2 (K_{42}(p) - K_{32}(p))$$

$$K(p) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{K_{31}(p) - K_{41}(p)}{K_{42}(p) - K_{32}(p)}$$

Расчет передаточной функции. Частные случаи.

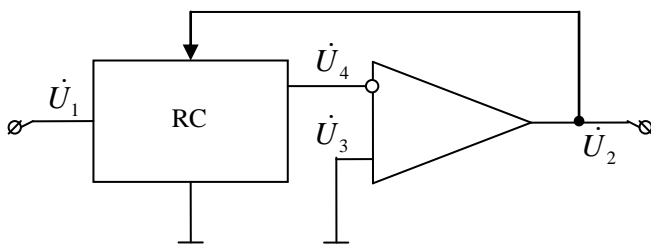
1. Частотнозависимая ПОС



$$\left. \begin{array}{l} \dot{U}_4 = \dot{U}_2 \\ K_{41}(p) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow K_{42}(p) = 1$$

$$K(p) = \frac{K_{31}(p)}{1 - K_{32}(p)}$$

2. Частотнозависимая ООС



$$\begin{array}{l} \dot{U}_3 = 0 \\ K_{31}(p) = K_{32}(p) = 0 \end{array}$$

$$K(p) = -\frac{K_{41}(p)}{K_{42}(p)}$$

Контрольные вопросы.

1. Как рассчитать лестничную структуру ФНЧ?
2. Как по лестничной структуре ФНЧ рассчитать лестничную структуру ФВЧ?
3. Как по лестничной структуре ФНЧ рассчитать лестничную структуру ППФ?
4. Как рассчитать каскадную RLC- реализацию?
5. Как рассчитать каскадную ARC- реализацию?
6. В чем преимущества и недостатки лестничной реализации фильтра перед остальными способами реализации?
7. В чем преимущества и недостатки каскадной RLC-реализации фильтра перед остальными способами реализации?
8. В чем преимущества и недостатки каскадной ARC-реализации фильтра перед остальными способами реализации?
9. Почему наличие индуктивности в схеме фильтра считается недостатком?

Типовые задачи к экзамену

1. Рассчитать порядок ФНЧ Баттерворда (тип Р) и его полюсы, изобразить диаграмму полюсов фильтра для следующих исходных данных: $a_n=3$ дБ; $a_3=40$ дБ.; $f_n=1$ кГц; $f_3=2$ кГц; $R_n=100$ Ом. Используя эти результаты и справочные пособия, изобразить принципиальную схему лестничной структуры фильтра, каскадной и ARC реализации. Объяснить методику расчета элементов схем.
2. Рассчитать порядок ФВЧ Баттерворда (тип Р) его полюсы и нули, изобразить диаграмму полюсов и нулей фильтра для следующих исходных данных: $a_n=3$ дБ; $a_3=40$ дБ.; $f_n=2$ кГц; $f_3=1$ кГц; $R_n=100$ Ом. Используя эти результаты и справочные пособия, изобразить принципиальную схему лестничной структуры фильтра, каскадной и ARC реализации. Объяснить методику расчета элементов схем.
3. Рассчитать порядок ППФ Баттерворда (тип Р) его полюсы и нули, изобразить диаграмму полюсов и нулей фильтра для следующих исходных данных: $a_n=3$ дБ; $a_3=30$ дБ.; $f_o=1000$ кГц $f_{пв}=1100$ кГц; $f_{зв}=1400$ кГц; $R_n=100$ Ом. Используя эти результаты и справочные пособия, изобразить принципиальную схему лестничной структуры фильтра, каскадной и ARC реализации. Объяснить методику расчета элементов схем.