

Лабораторная работа

Компьютерный анализ характеристик ослабления LC – фильтров с использованием FASTMEAN

1. Цель работы

- 1.1. Синтезировать LC-фильтр.
- 1.2. Провести компьютерный анализ частотных характеристик с помощью программы Mathcad и с помощью программы FASTMEAN.
- 1.3. Сравнить полученные частотные характеристики и сделать выводы.

2. Задание на самостоятельную подготовку к работе

- 2.1. Изучите этапы решения задачи синтеза линейных электрических цепей.
- 2.2. Изучите теоретические вопросы, связанные с синтезом LC-фильтров.
- 1.3. В соответствии со своим номером зачетной книжки рассчитайте LC-фильтр, полагая, что его элементы имеют пренебрежимо малые потери. Тип фильтра, вид аппроксимации, режим работы (вид нагрузки) и исходные требования к характеристике ослабления фильтра определяются номером варианта N и трехзначным кодовым числом. В табл. 1.1 показано, как определить N и код задания по трем последним числам зачетки.

Исходные данные для расчета фильтра приведены в табл. 1.2–1.5.

Таблица 1.1

Таблица выбора варианта

| Цифры номера зачётной книжки | Значение N (1-я от конца цифра) | Значения первой цифры кода задания (1-я от конца цифра) | Значения второй цифры кода задания (2-я от конца цифра) | Значения третьей цифры кода задания (3-я от конца цифра) |
|------------------------------|---------------------------------|---|---|--|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 4 | 4 | 4 | 2 | 1 |
| 5 | 5 | 1 | 1 | 2 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 7 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 8 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 9 | 4 | 1 | 1 | 3 |
| 0 | 5 | 2 | 2 | 1 |

Примечание. Если номер зачетной книжки 114750, то студент выполняет вариант N=5, код задания 211.

Первая цифра кода указывает на один из четырех типов фильтра:

- 1 – фильтр нижних частот (ФНЧ);
- 2 – фильтр верхних частот (ФВЧ);
- 3 – полосовой фильтр (ПФ);
- 4 – режекторный фильтр (РФ).

Вторая цифра кода указывает на один из двух видов аппроксимации характеристики ослабления:

- 1 – по Баттерворту;
- 2 – по Чебышеву.

Третья цифра кода указывает на один из трех режимов работы фильтра: 1

– двусторонняя нагрузка (рис. 1.1, а); 2 – односторонняя нагрузка при заданном входном напряжении (рис. 1.1, б); 3 – односторонняя нагрузка при холостом ходе на выходе фильтра (рис. 1.1, в).

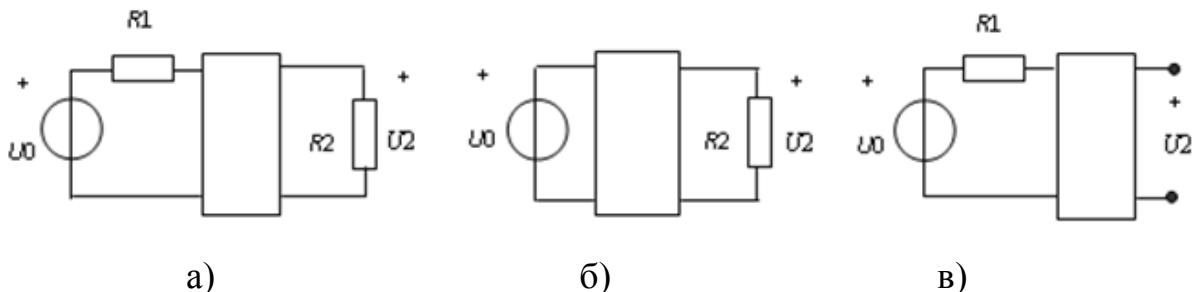


Рис. 1.1. Режимы работы фильтра

Обозначения, принятые в табл. 1.2–1.5:

a_0 – гарантированное ослабление в полосах задерживания;
 f_0 – граничная частота полосы пропускания ФНЧ и ФВЧ;
 f_1, f_{-1} – граничные частоты полос (полос) пропускания ПФ и РФ;
 f_k – граничная частота полосы задерживания ФНЧ и ФВЧ, а также одна из граничных частот полос (полос) задерживания ПФ и РФ. Значение другой граничной частоты f_{-k} определяется из условия геометрической симметрии характеристики ослабления: $f_1 \cdot f_{-1} = f_k \cdot f_{-k}$.

Таблица 1.2

Исходные данные для расчета ФНЧ

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| f_0 , кГц | $3 \cdot M$ | $5 \cdot M$ | $6,2 \cdot M$ | $3,2 \cdot M$ | $7 \cdot M$ |
| f_k , кГц | $4,2 \cdot M$ | $7 \cdot M$ | $9,4 \cdot M$ | $6,4 \cdot M$ | $8,5 \cdot M$ |
| a_0 , дБ | 30 | 40 | 36 | 54 | 20 |

Таблица 1.3

Исходные данные для расчета ФВЧ

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| f_0 , кГц | $4,2 \cdot M$ | $6,5 \cdot M$ | $5 \cdot M$ | $6,3 \cdot M$ | $7,7 \cdot M$ |
| f_k , кГц | $2,7 \cdot M$ | $5 \cdot M$ | $3,3 \cdot M$ | $3,4 \cdot M$ | $5,4 \cdot M$ |
| a_0 , дБ | 45 | 25 | 46 | 50 | 40 |

Таблица 1.4

Исходные данные для расчета ПФ

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| f_{-1} , кГц | $2,4 + C$ | $2,5 + C$ | $2,7 + C$ | $3,0 + C$ | $3,6 + C$ |
| f_1 , кГц | $7,2 + C$ | $4 + C$ | $6 + C$ | $7,5 + C$ | $5,5 + C$ |
| f_k , кГц | $12 + C$ | $7,1 + C$ | $9,1 + C$ | $12 + C$ | $7,6 + C$ |
| a_0 , дБ | 35 | 40 | 24 | 43 | 27 |

Таблица 1.5

Исходные данные для расчета РФ

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| f_{-1} , кГц | $3,1 + C$ | $15 + C$ | $3,9 + C$ | $8,4 + C$ | $3,4 + C$ |
| f_1 , кГц | $6,4 + C$ | $20 + C$ | $8 + C$ | $12 + C$ | $7 + C$ |
| f_k , кГц | $5 + C$ | $18 + C$ | $7,1 + C$ | $11 + C$ | $6,1 + C$ |
| a_0 , дБ | 32 | 30 | 13 | 16 | 15 |

В табл. 1.2–1.5: $M = 1 + C$; величина $C = 0,1 \cdot N$.

Для всех вариантов задания, т. е. для всех значений N , допустимая неравномерность характеристики ослабления фильтра в полосе пропускания должна составлять: для фильтров с характеристикой Баттерворта $\Delta a = 3$ дБ; для фильтров с характеристикой Чебышева $\Delta a = 1,25$ дБ.

Ослабление фильтра определяется выражением

$$a(\omega) = -20 \lg |H(j\omega)|, \text{ дБ}, \quad (1.1)$$

где $H(j\omega) = H(p)|_{p=j\omega}$.

Передаточные функции имеют вид:
для схемы, изображенной на рис. 1.1, а:

$$H(p) = \frac{2U_2(p)}{U_0(p)} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}},$$

а для схем, приведенных на рис. 1.1, б и рис. 1.1, в:

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_0(p)}.$$

В фильтрах с односторонней нагрузкой величину нагрузочного сопротивления (R_2 или R_1) следует принять равной 600 Ом. В двусторонне нагруженных фильтрах $R_1 = 600$ Ом, а величина R_2 находится при расчете фильтра.

2.4. Проектирование схемы фильтра

Для расчета фильтров ФВЧ, ПФ и РФ рекомендуется использовать методику, согласно которой схема, параметры элементов и характеристики проектируемого фильтра находятся с помощью частотного преобразования фильтра-прототипа низких частот (ФПНЧ). Ниже приводятся основные этапы расчета и формулы, которые рекомендуется использовать при расчете фильтров. Порядок расчета ФНЧ совпадает с методикой расчета ФПНЧ.

Прежде всего следует определить порядок ФПНЧ. Для фильтров с характеристиками Баттерворта порядок находится по формуле

$$n \geq \frac{a_0 - 10\lg(10^{0,1\Delta a} - 1)}{20\lg\hat{\omega}_k}. \quad (1.2)$$

Для фильтров с характеристиками Чебышева

$$n \geq \frac{a_0 + 6 - 10\lg(10^{0,1\Delta a} - 1)}{20\lg\left(\hat{\omega}_k + \sqrt{\hat{\omega}_k^2 - 1}\right)}. \quad (1.3)$$

В (1.2) и (1.3) нормированная граничная частота полосы задерживания ФПНЧ рассчитывается по формулам:

$$\text{для ФНЧ} \quad \hat{\omega}_k = \frac{f_k}{f_0}; \quad (1.4)$$

$$\text{для ФВЧ} \quad \hat{\omega}_k = \frac{f_0}{f_k}; \quad (1.5)$$

$$\text{для ПФ} \quad \hat{\omega}_k = k \left(\frac{f_k}{f_0} - \frac{f_0}{f_k} \right); \quad (1.6)$$

$$\text{для РФ} \quad \hat{\omega}_k = \left[k \left(\frac{f_k}{f_0} - \frac{f_0}{f_k} \right) \right]^{-1}. \quad (1.7)$$

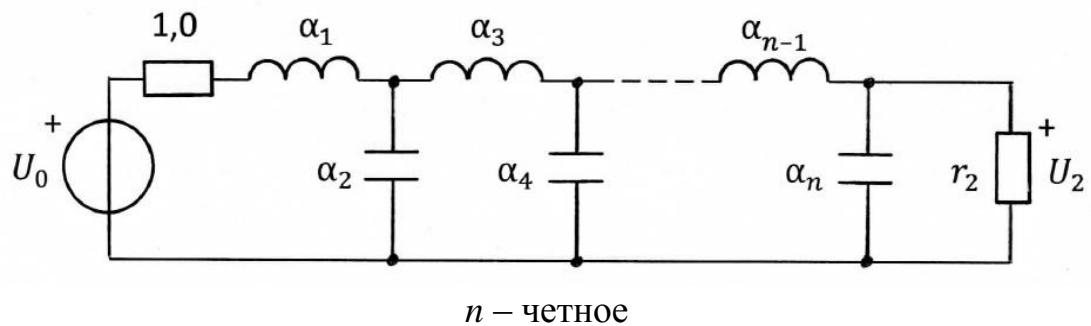
В (1.6) и (1.7)

$$f_0 = \sqrt{f_{-1} \cdot f_1}, \quad (1.8)$$

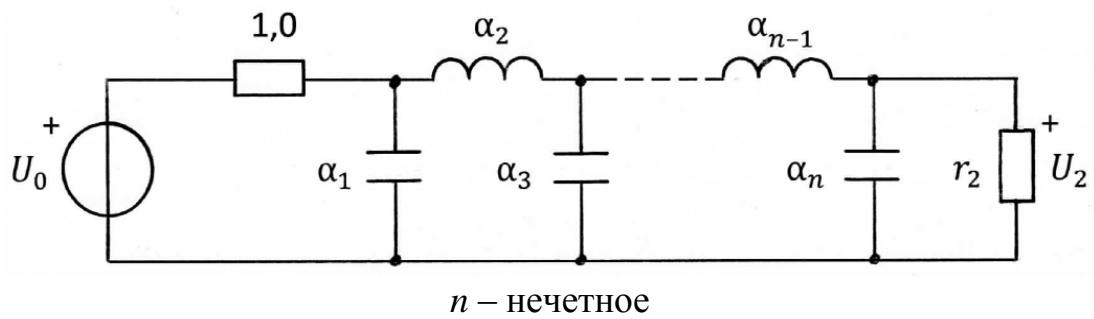
$$k = \frac{f_0}{f_1 - f_{-1}}. \quad (1.9)$$

Рассчитанное значение n следует округлить до ближайшего большего целого числа.

Схемы ФПНЧ и нумерация их нормированных элементов в зависимости от порядка фильтра-прототипа и режима работы приведены на рис. 1.1–1.1: на рис. 1.1 – для режима двусторонней нагрузки, на рис. 1.1 – для режима заданного входного напряжения и на рис. 1.4 – для режима холостого хода.

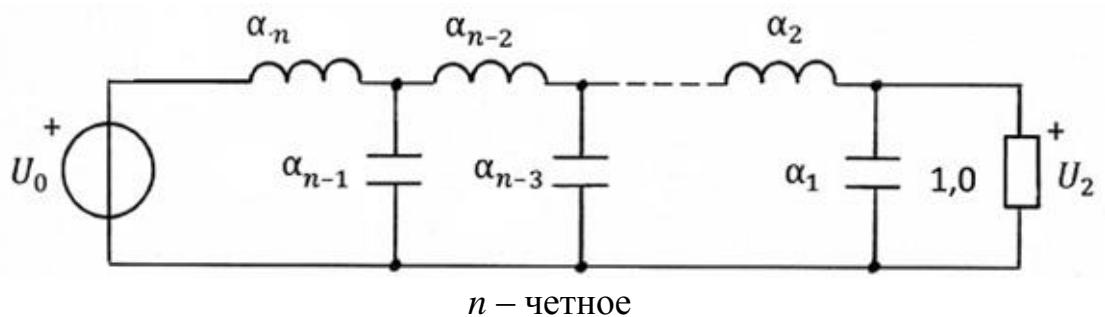


n – четное

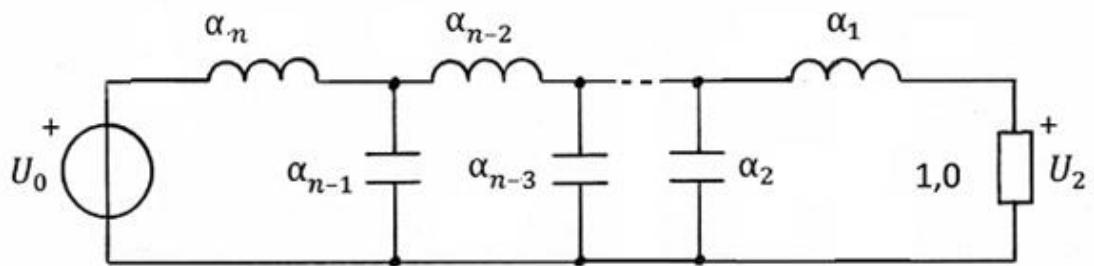


n – нечетное

Рис. 1.2. Схема ФПНЧ для режима двусторонней нагрузки

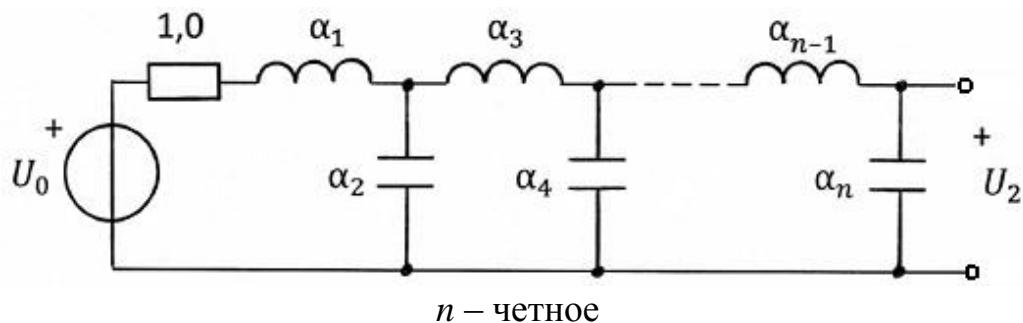


n – четное

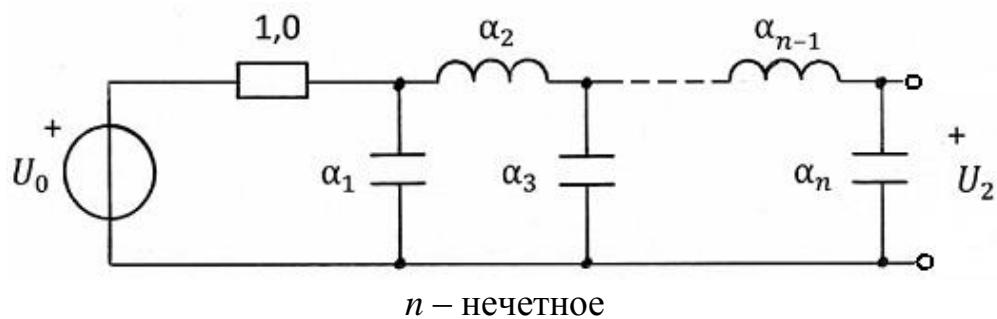


n – нечетное

Рис. 1.3. Схема ФПНЧ для режима заданного входного напряжения



n – четное



n – нечетное

Рис. 1.4. Схема ФПНЧ для режима холостого хода

Значения параметров элементов ФПНЧ для фильтров с характеристиками Баттервортса при неравномерности характеристики ослабления в полосе пропускания $\Delta a = 3$ дБ и фильтров с характеристиками Чебышева при $\Delta a = 1,25$ дБ приведены в табл. 1.6–1.9. Указанные параметры рассчитаны в предположении, что потери в элементах фильтра пренебрежимо малы и граничная частота полосы пропускания ФПНЧ $\hat{\omega}_0 = 1$.

Таблица 1.6

Элементы односторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой
Баттерворта
при $\Delta a = 3$ дБ

| n | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
|------------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|
| α_1 | 0,1951 | 0,22225 | 0,2588 | 0,3090 | 0,3827 | 0,500 |
| α_2 | 0,5776 | 0,6560 | 0,7579 | 0,8944 | 1,082 | 1,333 |
| α_3 | 0,9871 | 1,055 | 1,202 | 1,382 | 1,577 | 1,500 |
| α_4 | 1,259 | 1,397 | 1,553 | 1,694 | 1,531 | — |
| α_5 | 1,528 | 1,659 | 1,759 | 1,545 | — | — |
| α_6 | 1,729 | 1,799 | 1,553 | — | — | — |
| α_7 | 1,825 | 1,558 | — | — | — | — |
| α_8 | 1,561 | — | — | — | — | — |

Таблица 1.7

Элементы двусторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой Баттерворта
при $\Delta a = 3$ дБ

| n | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| α_1 | 0,3902 | 0,4450 | 0,5176 | 0,6180 | 0,7654 | 1,000 |
| α_2 | 1,111 | 1,247 | 1,414 | 1,618 | 1,848 | 2,000 |
| α_3 | 1,663 | 1,802 | 1,932 | 2,000 | 1,848 | 1,000 |
| α_4 | 1,962 | 2,000 | 1,932 | 1,618 | 0,7654 | — |
| α_5 | 1,962 | 1,802 | 1,414 | 0,618 | — | — |
| α_6 | 1,663 | 1,247 | 0,5176 | — | — | — |
| α_7 | 1,111 | 0,445 | — | — | — | — |
| α_8 | 0,3902 | — | — | — | — | — |
| r_2 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Таблица 1.8

Элементы односторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой Чебышева
при $\Delta a = 1,25$ дБ

| n | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| α_1 | 1,179 | 1,175 | 1,169 | 1,159 | 1,141 | 1,103 |
| α_2 | 1,460 | 1,454 | 1,446 | 1,431 | 1,401 | 1,326 |
| α_3 | 2,132 | 2,122 | 2,106 | 2,073 | 1,988 | 1,577 |
| α_4 | 1,646 | 1,635 | 1,613 | 1,556 | 1,256 | — |
| α_5 | 2,216 | 2,190 | 2,118 | 1,723 | — | — |
| α_6 | 1,658 | 1,607 | 1,313 | — | — | — |
| α_7 | 2,158 | 1,767 | — | — | — | — |
| α_8 | 1,333 | — | — | — | — | — |

Таблица 1.9

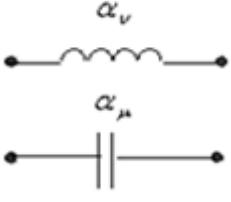
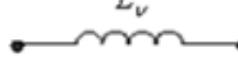
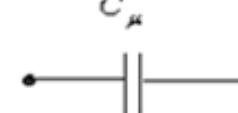
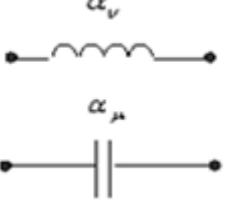
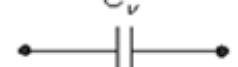
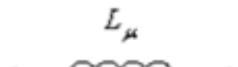
Элементы двусторонне нагруженного ФПНЧ с характеристиками Чебышева
при $\Delta a = 1,25$ дБ

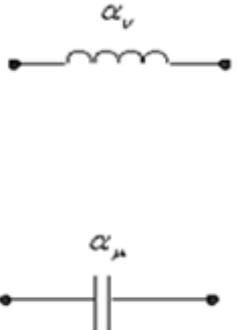
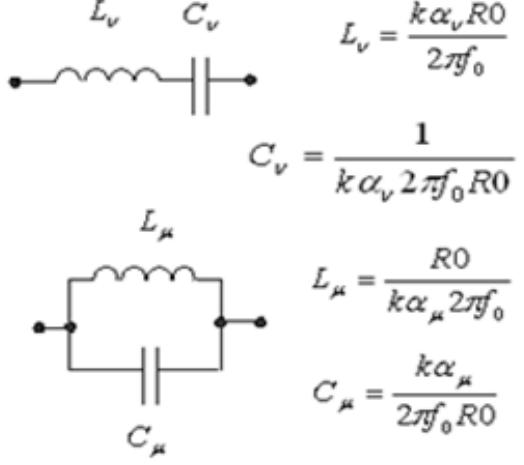
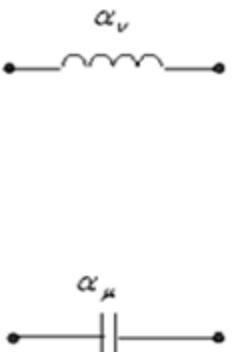
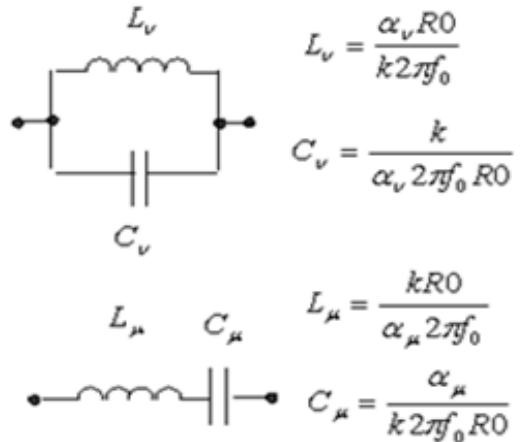
| n | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
|------------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| α_1 | 2,359 | 2,351 | 2,339 | 2,319 | 2,283 | 2,206 |
| α_2 | 1,057 | 1,053 | 1,046 | 1,035 | 1,011 | 0,9487 |
| α_3 | 3,314 | 3,297 | 3,267 | 3,204 | 3,034 | 2,206 |
| α_4 | 1,117 | 1,108 | 1,089 | 1,035 | 0,761 | — |
| α_5 | 3,352 | 3,297 | 3,140 | 2,319 | — | — |
| α_6 | 1,104 | 1,053 | 0,7798 | — | — | — |
| α_7 | 3,171 | 2,351 | — | — | — | — |
| α_8 | 0,7865 | — | — | — | — | — |
| r_2 | 3,000 | 1,000 | 3,000 | 1,000 | 3,000 | 1,000 |

Параметры элементов проектируемого фильтра определяются путем соответствующего пересчета параметров элементов ФПНЧ по формулам, приведенным в табл. 1.10. Расчет следует выполнить с точностью до четырех значащих цифр.

Таблица 1.10

Преобразование элементов ФПНЧ в элементы фильтров

| Элементы ФПНЧ | Элементы фильтров | Тип фильтра | |
|---|---|---|-----|
|  |  $L_v = \frac{\alpha_v R_0}{2\pi f_0}$ |  $C_\mu = \frac{\alpha_\mu}{2\pi f_0 R_0}$ | ФНЧ |
|  |  $C_v = \frac{1}{\alpha_v 2\pi f_0 R_0}$ |  $L_\mu = \frac{R_0}{\alpha_\mu 2\pi f_0}$ | ФВЧ |

| | | |
|--|---|----|
|  |  | ПФ |
|  |  | РФ |

В формулах табл. 1.10 для фильтров, работающих в режиме двусторонней нагрузки либо односторонней нагрузки при холостом ходе на выходе фильтра $R0 = R1$. В случае односторонней нагрузки при заданном входном напряжении $R0 = R2$.

При работе фильтра в режиме двусторонней нагрузки величину нагрузочного сопротивления рассчитайте по формуле $R2 = r_2 \cdot R0$.

2.5. Расчет характеристики ослабления проектируемого фильтра

Характеристику ослабления проектируемого фильтра следует получить частотным преобразованием характеристики ослабления ФПНЧ, которая определяется видом аппроксимации.

При аппроксимации по Баттерворту

$$a(\hat{\omega}) = 10 \lg \left[\left(10^{0,1 \Delta a} - 1 \right) \hat{\omega}^{2n} + 1 \right]. \quad (1.10)$$

При аппроксимации по Чебышеву

$$a(\hat{\omega}) = 10 \lg \left[\left(10^{0,1 \Delta a} - 1 \right) P_n^2(\hat{\omega}) + 1 \right]. \quad (1.11)$$

В (1.10) и (1.11): n – порядок ФПНЧ; $\hat{\omega}$ – нормированная частота ФПНЧ; $P_n(\hat{\omega})$ – полином Чебышева n -го порядка. Значения полиномов Чебышева определяются выражениями:

$$P_n(\hat{\omega}) = \cos[n \cdot \arccos(\hat{\omega})], \quad \hat{\omega} \leq 1; \quad (1.12)$$

$$P_n(\hat{\omega}) = ch[n \cdot \operatorname{arch}(\hat{\omega})], \quad \hat{\omega} > 1; \quad (1.13)$$

$$P_n(\hat{\omega}) = 0,5 \left[\left(\hat{\omega} + \sqrt{\hat{\omega}^2 - 1} \right)^n + \left(\hat{\omega} - \sqrt{\hat{\omega}^2 - 1} \right)^n \right]. \quad (1.14)$$

Формула (1.14) справедлива как в полосе пропускания ($\hat{\omega} \leq 1$), так и за ее пределами.

Можно также воспользоваться выражениями полиномов Чебышева, приведенными в табл. 1.10.

Таблица 1.10

| n | $P_n(\hat{\omega})$ |
|-----|---|
| 1 | $\hat{\omega}$ |
| 2 | $2\hat{\omega}^2 - 1$ |
| 3 | $4\hat{\omega}^3 - 3\hat{\omega}$ |
| 4 | $8\hat{\omega}^4 - 8\hat{\omega}^2 + 1$ |
| 5 | $16\hat{\omega}^5 - 20\hat{\omega}^3 + 5\hat{\omega}$ |
| 6 | $32\hat{\omega}^6 - 48\hat{\omega}^4 + 18\hat{\omega}^2 - 1$ |
| 7 | $64\hat{\omega}^7 - 112\hat{\omega}^5 + 56\hat{\omega}^3 - 7\hat{\omega}$ |

Для расчета характеристики ослабления проектируемого фильтра $a(f)$ можно использовать прямое преобразование частоты $\hat{\omega}$, приведенное в табл. 1.11, подставляя его в (1.10) и (1.11).

Таблица 1.11

| Тип фильтра | Формула прямого преобразования | Формула обратного преобразования |
|-------------|---|--|
| ФНЧ | $\hat{\omega} = \frac{f}{f_0}$ | $f_i = f_0 \hat{\omega}_i$ |
| ФВЧ | $\hat{\omega} = \frac{f_0}{f}$ | $f_i = \frac{f_0}{\hat{\omega}_i}$ $f_{-i,i} = f_0 \left(\sqrt{\frac{\hat{\omega}_i^2}{4k^2} + 1} \pm \frac{\hat{\omega}_i}{2k} \right)$ |
| ПФ | $\hat{\omega} = k \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$ | |
| РФ | $\hat{\omega} = \left[k \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right]^{-1}$ | $f_{-i,i} = f_0 \left(\sqrt{\frac{1}{4k^2 \hat{\omega}_i^2} + 1} \pm \frac{1}{2k \hat{\omega}_i} \right)$ |

3. Задание для компьютерного моделирования

- 3.1. Загрузите программу FASTMEAN.
- 3.2. Постройте на экране дисплея схему LC-фильтра, введите рассчитанные выше параметры элементов цепи, указав номинальные значения параметров элементов с точностью до четырех значащих цифр.
- 3.3. Подключите к входным зажимам цепи источник напряжения. На вкладке «Параметры» задайте «Тип источника» - «Гармонический», сделав выбор в раскрывающемся списке.
- 3.4. Заземлите базисный узел. Пронумеруйте узлы, нажав кнопку «Показать номера узлов» на панели инструментов.
- 3.5. Постройте характеристику ослабления LC-фильтра линейном масштабе. Для этого на панели инструментов выберите кнопку «Анализ» → «Частотные характеристики». Для построения графика характеристики ослабления проектируемого фильтра в окне частотных характеристик укажите частотный диапазон $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$, для которого требуется построить график характеристики ослабления $a(f)$. Рекомендуемые значения граничных частот, кГц:

для ФНЧ $f_{\min} = 0, f_{\max} = 1,2 f_k$;

для ФВЧ $f_{\min} = 0,8 f_k, f_{\max} = n f_0$, где n – порядок ФНЧ;

для ПФ $f_{\min} = 0,8 f_{-k}, f_{\max} = 1,2 f_k$;

для РФ $f_{\min 1} = 10^{-3}$, $f_{\max 1} = 1,2f_{-k}$; $f_{\min 2} = 0,8f_k$, $f_{\max 2} = nf_1$.

Наличие двух частотных поддиапазонов при моделировании РФ обусловлено тем, что на частоте $f_0 = \sqrt{f_{-1}f_1}$ значение характеристики ослабления РФ с пренебрежимо малыми потерями и стремится к бесконечности.

В первой строке «Выражение по оси Y » запишите выражение

« $-20 * \log(\text{mag}(U(m)/U(k)))$ »,

где k – номер узла входа, m – номер узла выхода.

Выберите линейный масштаб по осям X и Y . Задайте число расчетных точек не менее тысячи.

С помощью «линейки», имеющейся в программе, измерьте по графику характеристики ослабления значения ослабления фильтра на заданных граничных частотах полос пропускания и задерживания.

Для фильтра с характеристикой Чебышева необходимо подробно проанализировать график $a(f)$ в пределах полосы (полос) пропускания. Для этого, нажав левую кнопку «мыши», выделите курсором нужную часть графика. Исходный график можно восстановить щелчком правой кнопки «мыши», выбрав в появившемся меню команду «Исходный интервал».

3.6. Загрузите программу *Mathcad* и постройте характеристику ослабления LC-фильтра, полученную в пункте 2.5.

При этом следует выбрать частотный диапазон $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$ и число расчетных точек достаточными для сопоставления рассчитанных характеристик с исходными требованиями к ним.

Рекомендуемые значения граничных частот (кГц):

для ФНЧ $f_{\min} = 0$, $f_{\max} = 1,2f_k$;

для ФВЧ $f_{\min} = 0,8f_k$, $f_{\max} = nf_0$;

для ПФ $f_{\min} = 0,8f_{-k}$, $f_{\max} = 1,2f_k$;

для РФ $f_{\min} = 0$, $f_{\max} = nf_1$,

где n – порядок ФНЧ.

На графике $a(f)$ покажите заданные требования к ослаблению фильтра и убедитесь, что они выполняются.

3.7. Сравните график характеристики ослабления, полученный путем моделирования LC-фильтра на ПК с помощью программы *Fastmean*, с графиком, полученным с использованием программы *Mathcad*.

При существенном различии этих графиков проверьте правильность расчета фильтра и с учетом найденных ошибок повторите моделирование.

Пример расчета

Рассчитать LC -фильтр, со следующими параметрами:

Тип фильтра: фильтр верхних частот (ФВЧ).

Вид аппроксимации характеристики ослабления: по Чебышеву.

Режим работы фильтра: двухсторонняя нагрузка.

Гарантируемое ослабление в полосе задерживания $a_0 = 45$ дБ.

Границная частота полосы пропускания $f_0 = 5,46$ кГц;

Границная частота полосы задерживания $f_k = 3,51$ кГц;

Допустимая неравномерность характеристики ослабления фильтра в полосе пропускания $\Delta a = 1,25$ дБ;

Величина нагрузочного сопротивления $R_1 = 600$ Ом.

Проектирование схемы фильтра

Схема, параметры элементов и характеристики проектируемого фильтра находятся с помощью частотного преобразования фильтра-прототипа нижних частот (ФПНЧ).

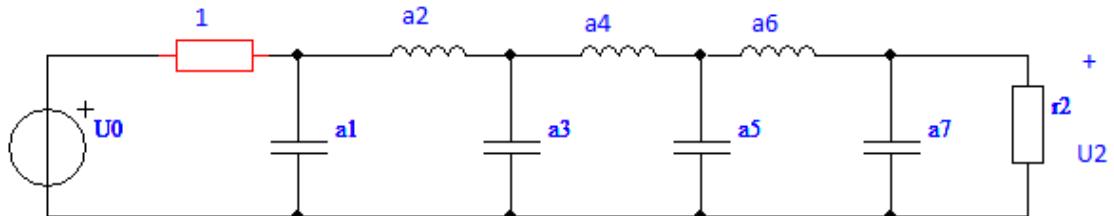
Для фильтров с характеристикой Чебышева порядок ФПНЧ находится по формуле:

$$n \geq \frac{a_0 + 6 - 10 \lg(10^{0,1\Delta a} - 1)}{20 \lg(\hat{\omega}_k + \sqrt{\hat{\omega}_k^2 - 1})},$$

в которой нормированная граничная частота полосы задерживания ФПНЧ рассчитывается по формуле: $\hat{\omega}_k = \frac{f_0}{f_k}$.

Согласно расчетам: $\hat{\omega}_k = 1.56$; $n = 6.354$. Округляя n до ближайшего большего целого числа, получаем $n = 7$.

Схема фильтра-прототипа нижних частот 7-го порядка для режима двухсторонней нагрузки выглядит следующим образом:



Элементы двухсторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой Чебышева при

$\Delta a = 1,25$ дБ и $n = 7$:

$\alpha_1 = 2,351 \quad \alpha_2 = 1,053 \quad \alpha_3 = 3,297 \quad \alpha_4 = 1,108 \quad \alpha_5 = 3,297 \quad \alpha_6 = 1,053 \quad \alpha_7 = 2,351$
 $r_2 = 1$.

Параметры элементов проектируемого фильтра определяются путем соответствующего пересчета параметров элементов ФПНЧ по формулам:

| Элементы фильтров | | Формулы пересчета |
|-------------------|-------------|---|
| ФПНЧ | ФВЧ | |
| α_v | C_v | $C_v = \frac{1}{\alpha_v 2\pi f_0 R_0}$ |
| α_μ | L_μ | $L_\mu = \frac{R_0}{\alpha_\mu 2\pi f_0}$ |

$$R_0 = R_1 = 600 \text{ Ом}$$

$$R_2 = r_2 \cdot R_0 = 1 \cdot 600 = 600 \text{ Ом}$$

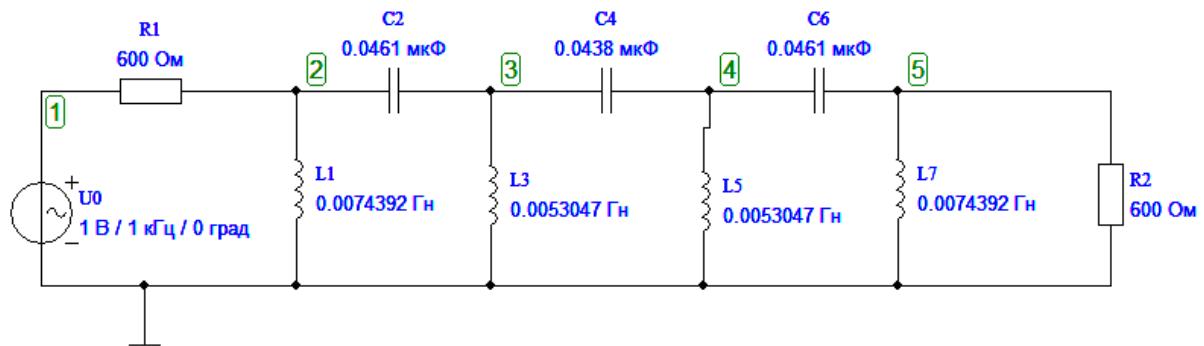
$$L_1 = 7,439 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad C_2 = 4,614 \cdot 10^{-8} \Phi$$

$$L_3 = 5,305 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad C_4 = 4,385 \cdot 10^{-8} \Phi$$

$$L_5 = 5,305 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad C_6 = 4,614 \cdot 10^{-8} \Phi$$

$$L_7 = 7,439 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Схема ФВЧ:



Расчет характеристики ослабления проектируемого фильтра

Характеристику ослабления проектируемого фильтра получим частотным преобразованием характеристики ослабления ФПНЧ, которая при аппроксимации по Чебышеву имеет вид:

$$a(\hat{\omega}) = 10 \lg \left[\left(10^{0,1\Delta a} - 1 \right) P_n^2(\hat{\omega}) + 1 \right],$$

где n – порядок ФПНЧ; $\hat{\omega}$ – нормированная частота ФПНЧ,

$$P_n(\hat{\omega}) = 64 \cdot \hat{\omega}^7 - 112 \cdot \hat{\omega}^5 + 56 \cdot \hat{\omega}^3 - 7 \cdot \hat{\omega}$$

Для расчета характеристики ослабления проектируемого фильтра $a(f)$ используем прямое преобразование частоты:

$$\hat{\omega} = \frac{f_0}{f}.$$

Значения граничных частот:

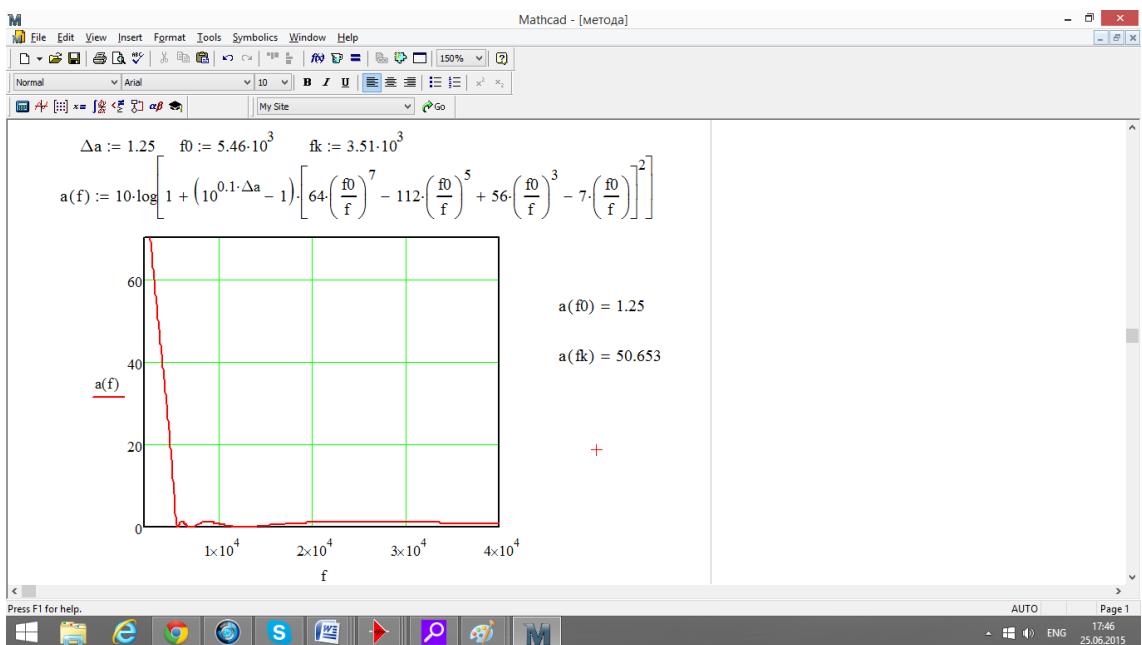
$$f_{\min} = 0,8 \cdot f_k = 2,808 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

$$f_{\max} = n \cdot f_0 = 3,822 \cdot 10^4 \text{ Гц}.$$

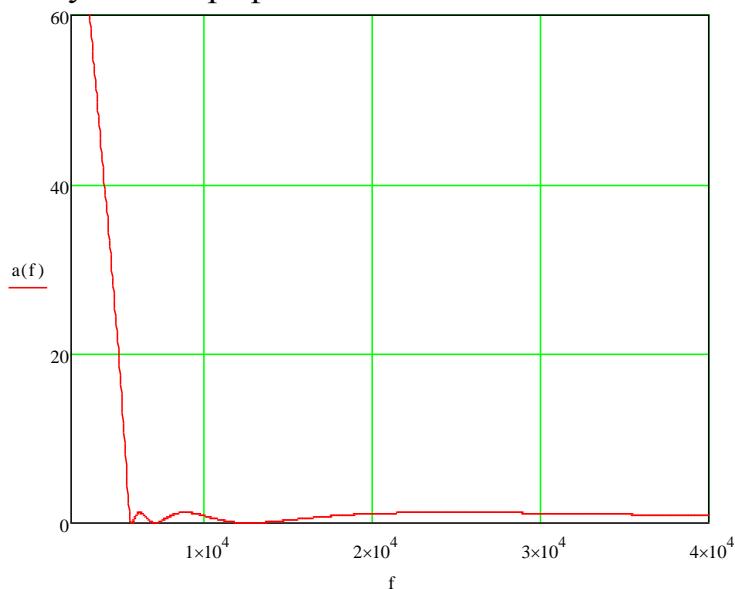
Характеристика ослабления $a(f)$, полученная прямым преобразованием частоты $\hat{\omega}$, имеет вид:

$$a(f) = 10 \cdot \log \left[1 + \left(10^{0,1 \cdot \Delta a} - 1 \right) \cdot \left[64 \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^7 - 112 \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^5 + 56 \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 - 7 \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right) \right]^2 \right].$$

Построим $a(f)$, используя Mathcad.

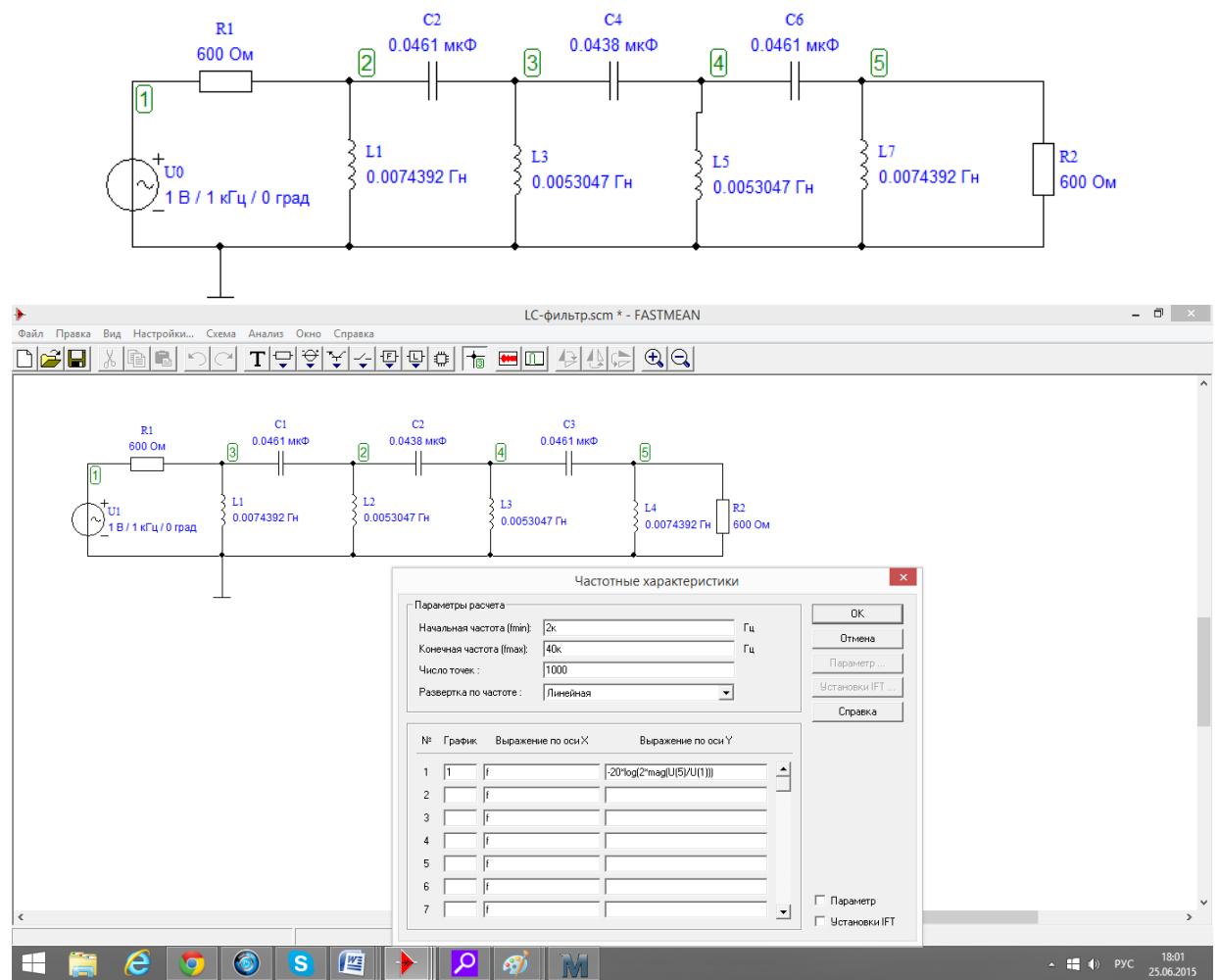


Получаем следующий график в Mathcad.

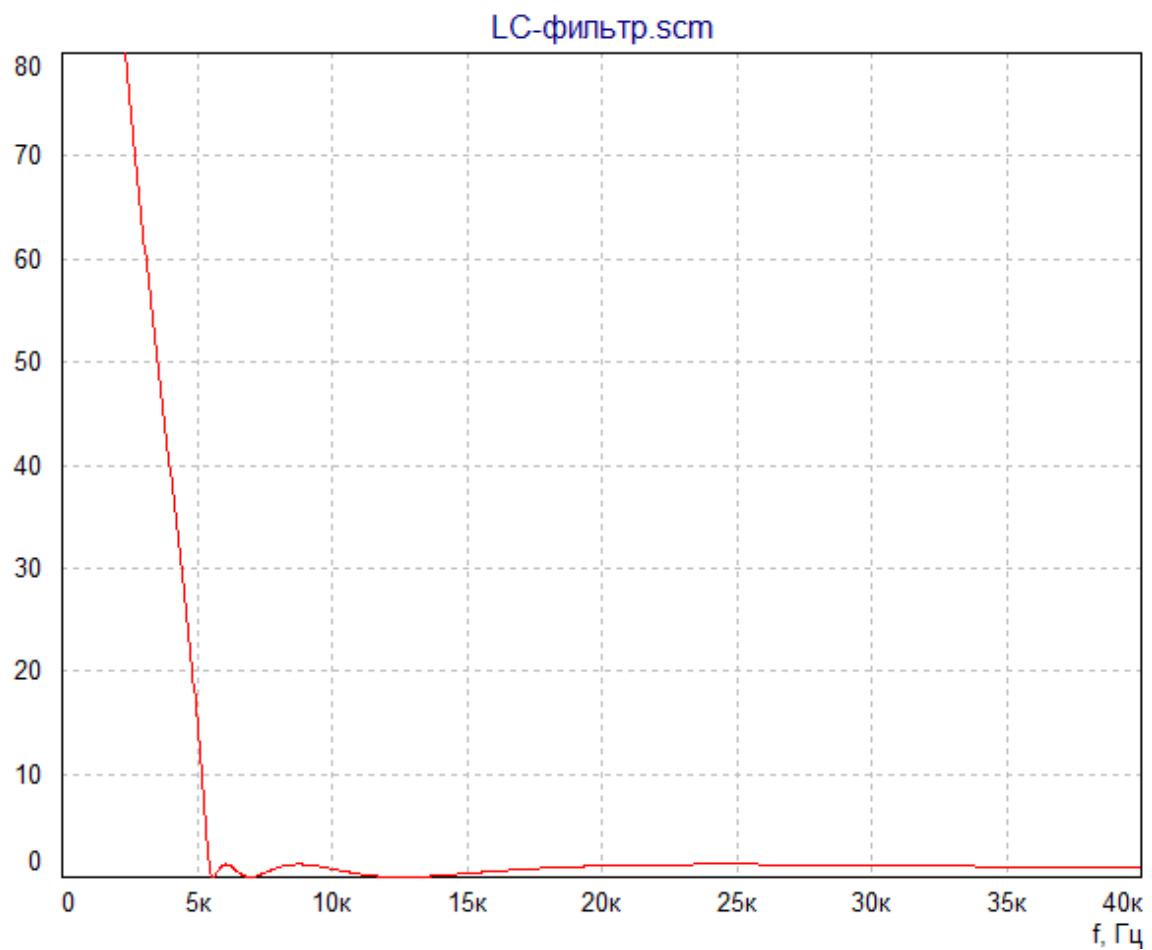


Моделирование фильтра с помощь программы Fastmean

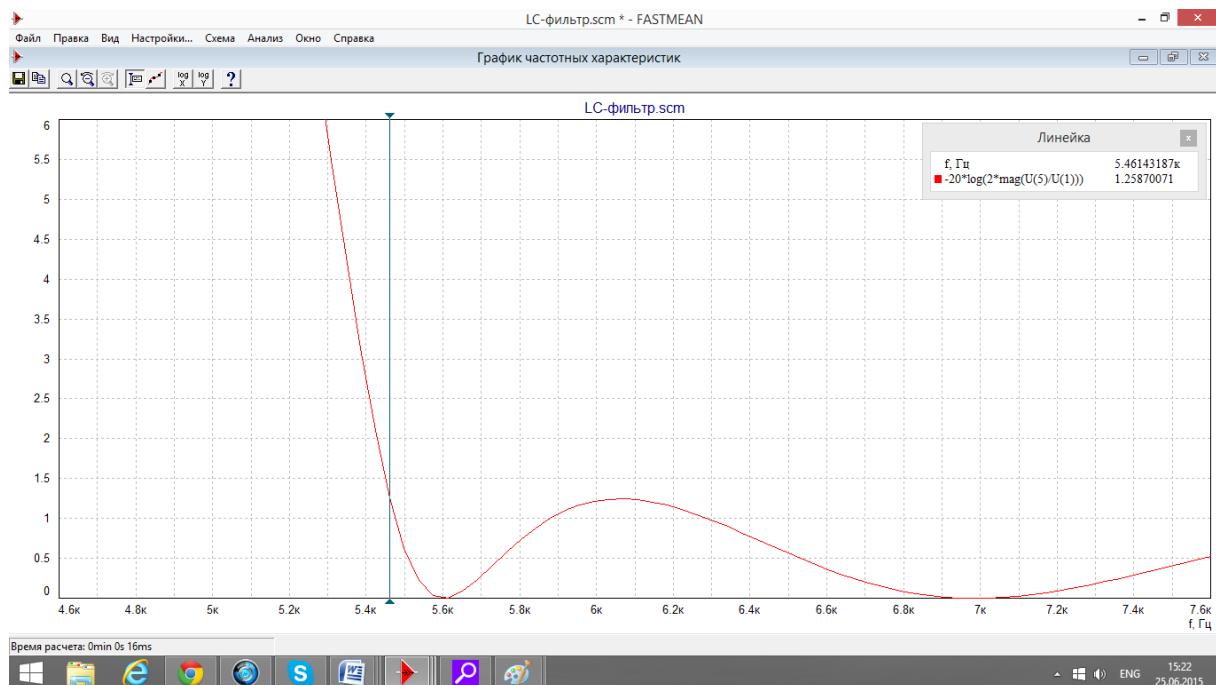
Моделирование фильтра на ПК выполняется с помощью программы Fastmean. Схема фильтра выглядит следующим образом.



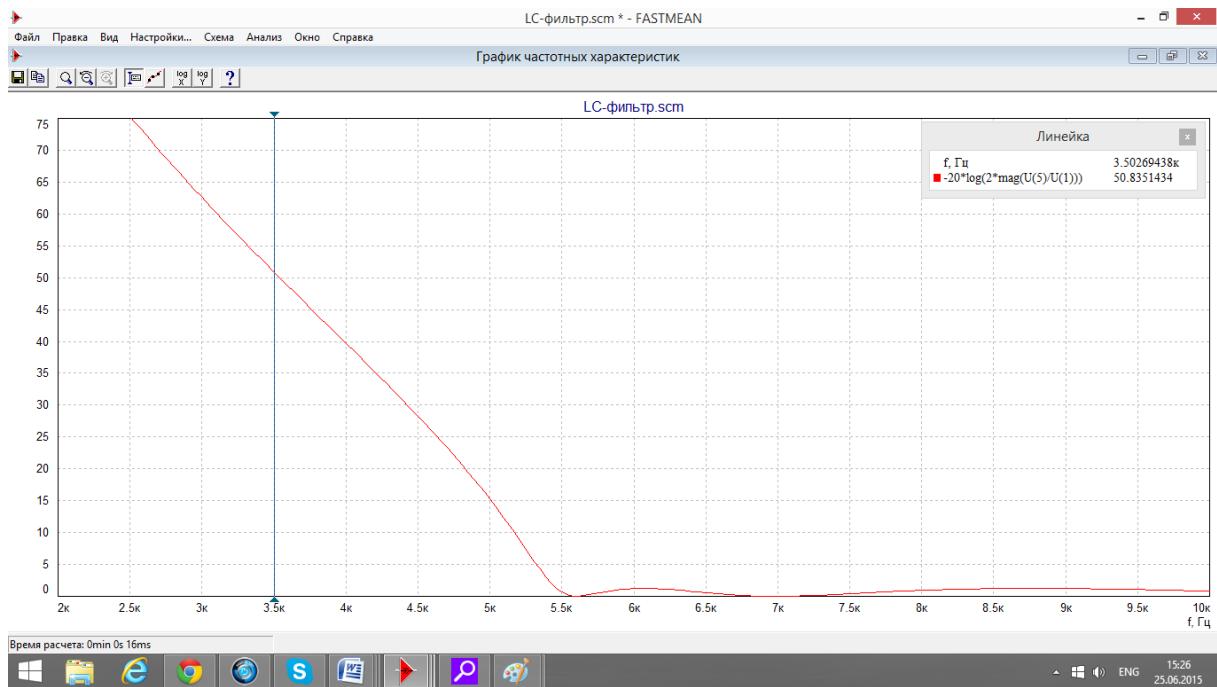
Характеристика ослабления фильтра.



С помощью «линейки», имеющейся в программе, можно убедиться, что значение ослабления фильтра.



$$a(f_0) = 1,25 \text{ дБ}$$



$$a(f_k) = 50 \text{ дБ}$$

Графики характеристики ослабления, смоделированные в программе Mathcad и Fastmean, совпали.

3. Указания к защите

Отчет должен содержать:

- схему фильтра и таблицу значений параметров его элементов;
- график характеристики ослабления фильтра, полученный в Mathcad;
- график ослабления синтезированного фильтра, полученный в процессе моделирования фильтра с помощью программы Fastmean;
- выводы

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют электрические фильтры в зависимости от взаимного расположения полос пропускания и задерживания?
2. Как определяется ослабление фильтра при двусторонней и односторонней нагрузках? Что такое рабочее ослабление?
3. Что вам известно о расположении полюсов и нулей передаточных функций устойчивых цепей?
4. Как найти передаточную функцию лестничной электрической цепи?
5. Дайте определение полинома Гурвица и перечислите его основные свойства.
6. Какими основными свойствами обладают амплитудно-квадратичные характеристики? Как определить передаточную функцию цепи по ее АКХ?
7. Какие методы аппроксимации используются в типовых задачах синтеза линейных электрических цепей?

8. Запишите выражения для АКХ и ослабления полиномиального ФНЧ с характеристиками Баттервортса, как зависит график ослабления от порядка фильтра «n»?

9. Запишите выражения для АКХ и ослабления полиномиального ФНЧ с равноволновыми характеристиками. Как выглядит график ослабления фильтров разного порядка? Перечислите основные свойства полиномов Чебышева.

10. Какой вид имеют лестничные *LC*-схемы полиномиальных ФНЧ? Как определить параметры элементов по заданной передаточной функции?

11. В чем заключается метод частотного преобразования? Как по передаточной функции ФПНЧ найти передаточную функцию ФВЧ, ПФ и РФ?

12. Как преобразовать схему ФПНЧ в схему ФВЧ, ПФ, РФ? Как преобразовать график ослабления ФПНЧ в графики ослабления перечисленных фильтров?

Лабораторная работа

СИНТЕЗ ARC-ФИЛЬТРОВ И КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1. Цель работы

- 1.1. Синтезировать ARC-фильтр 2 порядка с использованием метода уравнивания коэффициентов.
- 1.2. Провести компьютерный анализ частотных характеристик заданной операторной передаточной функции с помощью программы Mathcad и реализованного ARC-фильтра с помощью программы FASTMEAN.
- 1.3. Сравнить полученные частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) и сделать выводы.

2. Задание на самостоятельную подготовку к работе

- 2.1. Изучите этапы решения задачи синтеза линейных электрических цепей.
- 2.2. Изучите теоретические вопросы, связанные с применением метода уравнивания коэффициентов для синтеза ARC-фильтров.
- 2.3. В соответствии со своим номером варианта выберите из табл.2.1 операторную передаточную характеристику $H(p)$, которую вам необходимо реализовать с помощью ARC-фильтра 2 порядка.

№ варианта - последняя цифра в номере зачетной книжки;

N – предпоследняя цифра номере зачетной книжки;

M – третья от конца цифра в номере зачетной книжки.

Если цифра в номере равна 0, то выбираем 10.

Например, если номер зачетной книжки 114750, то студент выполняет вариант 10, $N=5$, $M=7$.

Таблица 2.1

| № вар. | Тип фильтра | Реализуемая операторная передаточная функция $H(p)$ |
|--------|-------------|---|
| 1 | ФНЧ | $\frac{\frac{1}{N^2} * 10^{10}}{p^2 + \frac{1}{2 \cdot M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{1}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 2 | ФНЧ | $\frac{\frac{4}{N^2} * 10^{10}}{p^2 + \frac{1}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{4}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 3 | ФНЧ | $\frac{\frac{16}{N^2} * 10^{10}}{p^2 + \frac{2}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{16}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 4 | ФНЧ | $\frac{\frac{9}{N^2} * 10^{10}}{p^2 + \frac{3}{2 \cdot M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{9}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 5 | ФВЧ | $\frac{p^2}{p^2 + \frac{1}{2 \cdot M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{1}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 6 | ФВЧ | $\frac{p^2}{p^2 + \frac{1}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{4}{N^2} * 10^{10}}$ |
| 7 | ФВЧ | $\frac{p^2}{p^2 + \frac{2}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{16}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 8 | ПФ | $\frac{\frac{1.5}{M} \cdot 10^5 \cdot p}{p^2 + \frac{1}{2 \cdot M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{1}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 9 | ПФ | $\frac{\frac{6}{M} \cdot 10^5 \cdot p}{p^2 + \frac{2}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{16}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |
| 10 | ПФ | $\frac{\frac{3}{M} \cdot 10^5 \cdot p}{p^2 + \frac{1}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{4}{N^2} \cdot 10^{10}}$ |

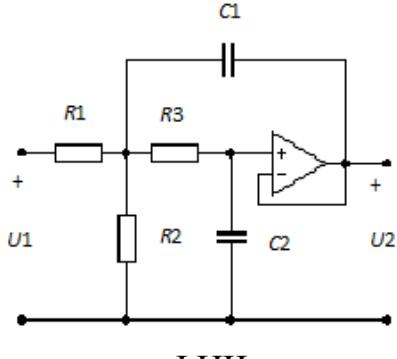
2.4. Рассчитайте параметры: добротность полюса Q_n и частоту полюса ω_n реализуемой операторной передаточной функции $H(p)$.

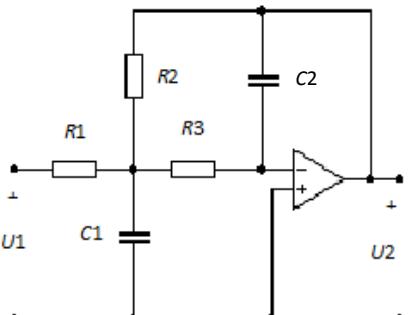
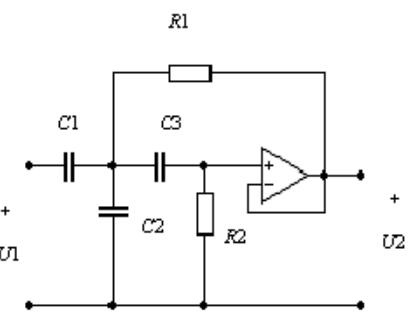
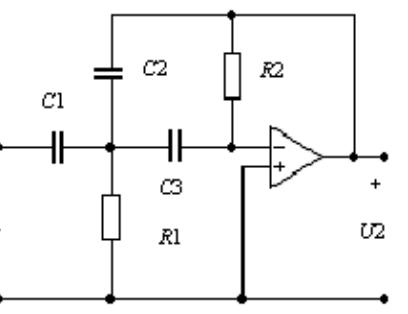
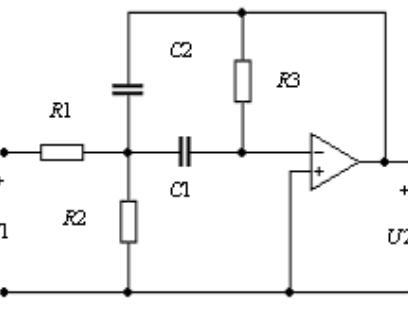
Например, для фильтра низких частот (ФНЧ)

$$H(p) = \frac{b_0}{p^2 + a_1 \cdot p + a_0}; \quad \omega_n = \sqrt{a_0}; \quad Q_n = \frac{\sqrt{a_0}}{a_1}.$$

2.5. Если добротность полюса $Q_n < 5$ выберите из табл.2.2, в которой приведены схемы и передаточные функции звеньев низкой добротности, ARC-звено, потенциально реализующее заданную операторную передаточную функцию $H(p)$, и рассчитайте параметры элементов этого звена, используя метод уравнивания коэффициентов.

Таблица 2.2

| № | Схема звена для $Q_n < 5$ | Передаточная функция. Указания к расчету |
|---|---|---|
| 1 |  <p>ФНЧ</p> | $H(p) = \frac{1}{p^2 + \frac{1}{C_1(R_1 + R_2 + R_3)}p + \frac{1}{C_1 C_2 R_3}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R$. Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2</p> |

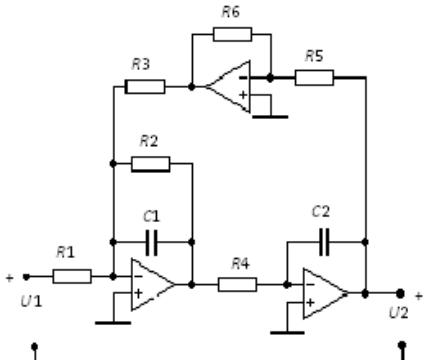
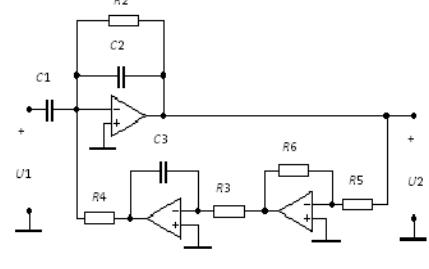
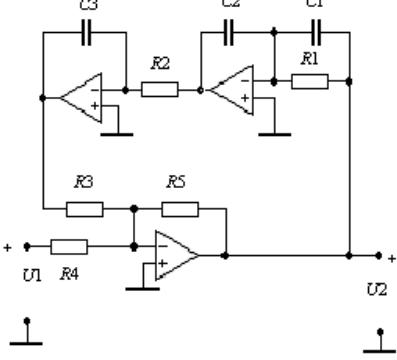
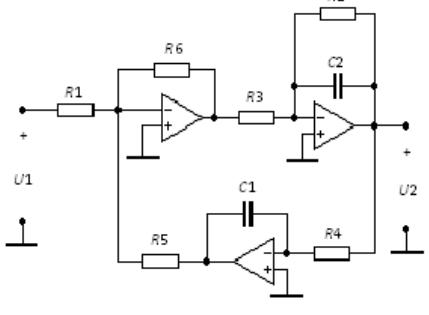
| № | Схема звена | Передаточная функция. Указания к расчету |
|---|--|--|
| 2 |  <p style="text-align: center;">ФНЧ</p> | $H(p) = -\frac{1}{p^2 + \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) p + \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R$. Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2</p> |
| 3 |  <p style="text-align: center;">ФВЧ</p> | $H(p) = \frac{\frac{C_1}{C_1 + C_2} p^2}{p^2 + \frac{1}{C_3 R_2} \cdot \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1 + C_2} p + \frac{1}{(C_1 + C_2) C_3 R_1 R_2}}$ <p>Положить $C_1 = C_2 = C_3 = C$. Задать величину $C = 10^{-9} \Phi$. Рассчитать R_1, R_2.</p> |
| 4 |  <p style="text-align: center;">ФВЧ</p> | $H(p) = \frac{-\frac{C_1}{C_2} p^2}{p^2 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2 C_3 R_2} p + \frac{1}{C_2 C_3 R_1 R_2}}$ <p>Положить $C_1 = C_2 = C_3 = C$. Задать величину $C = 10^{-9} \Phi$. Рассчитать R_1, R_2</p> |
| 5 |  <p style="text-align: center;">ПФ</p> | $H(p) = \frac{-\frac{1}{R_1 C_2} p}{p^2 + \frac{1}{R_3} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) p + \frac{1}{R_3} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) \frac{1}{C_1 C_2}}$ <p>Положить $C_1 = C_2 = C$. Задать величину $C = 10^{-9} \Phi$. Рассчитать R_1, R_2, R_3</p> |

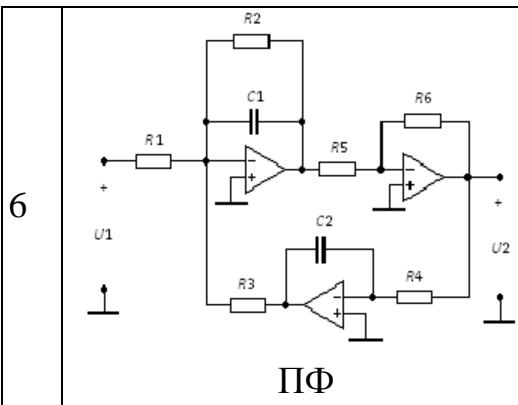
| | | |
|---|--|---|
| 6 | | $H(p) = \frac{-\frac{C_1}{R_2(C_1+C_2)C_3}p}{p^2 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\frac{1}{C_1+C_2}p + \frac{1}{R_1R_2C_3(C_1+C_2)}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R$ Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2, C_3</p> |
|---|--|---|

2.6. Если добротность полюса $Q_n \geq 5$ выберите из табл.2.3, в которой приведены схемы и передаточные функции звеньев высокой добротности, ARC-звено, потенциально реализующее заданную операторную передаточную функцию $H(p)$, и рассчитайте параметры элементов этого звена, используя метод уравнивания коэффициентов.

Таблица 2.3

| № | Схема звена $Q_n \geq 5$ | Передаточная функция. Указания к расчету |
|---|-----------------------------|---|
| 1 | | $H(p) = \frac{\frac{1}{R_1R_4C_1C_2}}{p^2 + p\frac{1}{R_2C_2} + \frac{R_5}{R_3R_4R_6C_1C_2}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2</p> |

| № | Схема звена | Передаточная функция. Указания к расчету |
|---|--|--|
| 2 |  <p style="text-align: center;">ФНЧ</p> | $H(p) = \frac{1}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{R_6}{R_3 R_4 R_5 C_1 C_2}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2</p> |
| 3 |  <p style="text-align: center;">ФВЧ</p> | $H(p) = \frac{-\frac{C_1}{C_2} p^2}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{R_6}{R_3 R_4 R_5 C_2 C_3}}$ <p>Положить $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$; $C_1 = 10^{-9} \Phi$ Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_2, C_3</p> |
| 4 |  <p style="text-align: center;">ФВЧ</p> | $H(p) = \frac{-\frac{R_5}{R_4} p^2}{p^2 + p \frac{C_1 R_5}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{R_5}{R_1 R_2 R_3 C_2 C_3}}$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R$; $C_3 = 10^{-9} \Phi$ Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2</p> |
| 5 |  <p style="text-align: center;">ПФ</p> | $H(p) = \frac{p \frac{R_6}{R_1 R_3 C_2}}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{R_6}{R_3 R_4 R_5 C_1 C_2}}$ <p>Положить $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$; Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$. Рассчитать C_1, C_2, R_1</p> |



$$H(p) = \frac{p \frac{R_6}{R_1 R_5 C_1}}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{R_6}{R_3 R_4 R_5 C_1 C_2}}$$

Положить $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$;

Задать величину $R = 10^5 \text{ Ом}$.

Рассчитать C_1, C_2, R_1

Известно, что операторная передаточная функция ARC-фильтра реализуется с точностью до весового коэффициента γ и может отличаться знаком, что приведет к отличию фазочастотных характеристик на величину π .

$$H_1(p) = \gamma \cdot H_2(p),$$

где $H_1(p)$ - заданная операторная передаточная функция;

$H_2(p)$ – операторная передаточная функция реализованной ARC-цепи.

Желательно получить $\gamma = 1$, но коэффициент γ может быть любым вещественным числом.

Пример расчета:

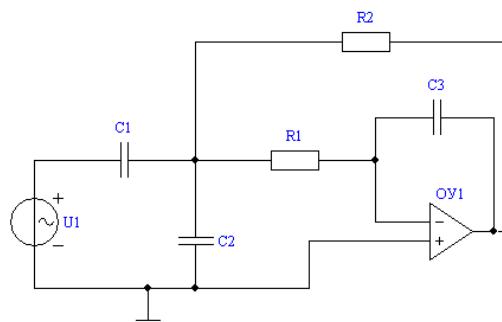
Пусть задана операторная передаточная функция ППФ:

$$H(p) = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot p}{p^2 + 10^5 \cdot p + 4 \cdot 10^{10}}.$$

$$\text{Рассчитаем } \omega_n = \sqrt{a_0} = \sqrt{4 \cdot 10^{10}} = 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}; \quad Q_n = \frac{\sqrt{4 \cdot 10^{10}}}{10^5} = 2.$$

Поскольку добротность полюса $Q_n < 5$, выбираем звено из таблицы 2.2, соответствующие ППФ, т.е. нам подходят звенья 5 и 6, так как вид $H(p)$ этих звеньев совпадает с видом заданной $H(p)$ и значение добротности полюса низкая ($Q_n = 2$).

Для примера возьмем другую схему полосового фильтра:



Операторная передаточная функция этого фильтра имеет вид:

$$H(p) = \frac{-p \frac{C_1}{C_3 R_1 (C_1 + C_2)}}{p^2 + p \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{1}{C_1 + C_2} + \frac{1}{C_3 R_1 R_2 (C_1 + C_2)}}.$$

Используя метод уравнения коэффициентов, составим систему уравнений для нахождения параметров элементов цепи, для этого приравняем коэффициенты при всех степенях p заданной $H(p)$ и $H(p)$ приведенного выше ARC-звена:

$$\frac{C_1}{C_3 R_1 (C_1 + C_2)} = 2 \cdot 10^5$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{1}{C_1 + C_2} = 10^5$$

$$\frac{1}{C_3 R_1 R_2 (C_1 + C_2)} = 4 \cdot 10^{10}$$

В результате уравнения коэффициентов получается система, в которой число уравнений меньше числа неизвестных параметров элементов. По этой причине некоторые параметры необходимо задать, по возможности положив их равными.

Зададим $R_1 = R_2 = 10^5$ Ом и найдем значения C_1, C_2 и C_3 .

Для решения данной системы можно воспользоваться программой Mathcad:

$$R1 := 10^5 \quad R2 := 10^5$$

Given

$$\frac{C1}{C3 \cdot (C1 + C2) \cdot R1} = 2 \cdot 10^5$$

$$\frac{1}{(C1 + C2)} \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) = 10^5$$

$$\frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} = 4 \cdot 10^{10}$$

$$\text{Find}(C1, C2, C3) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{200000000000} \\ \frac{3}{200000000000} \\ \frac{1}{800000000000} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \times 10^{-11} \\ 1.5 \times 10^{-10} \\ 1.25 \times 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Таким образом, все параметры реализуемой цепи рассчитаны:

$C_1 = 50$ пкФ, $C_2 = 0.15$ нФ, $C_3 = 12.5$ пкФ, $R_1 = R_2 = 10^5$ Ом.

3. Задание для компьютерного моделирования

3.1. Загрузите программу FASTMEAN.

3.2. Постройте на экране дисплея схему ARC-цепи, введите рассчитанные выше параметры элементов цепи.

3.3. Подключите к входным зажимам цепи источник напряжения. На вкладке «Параметры» задайте «Тип источника» - «Гармонический», сделав выбор в раскрывающемся списке.

3.4. Заземлите базисный узел. Пронумеруйте узлы, нажав кнопку «Показать номера узлов» на панели инструментов.

3.5. Постройте частотные характеристики цепи АЧХ и ФЧХ в линейном масштабе. Для этого на панели инструментов выберите кнопку «Анализ» → «Частотные характеристики». Начальную частоту выберите равной 1 Гц, конечную частоту – 1 МГц. Указанные значения в дальнейшем следует откорректировать так, чтобы на экране дисплея достаточно хорошо отображались основные особенности АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи. Выберите число точек для расчета, равное 1000.

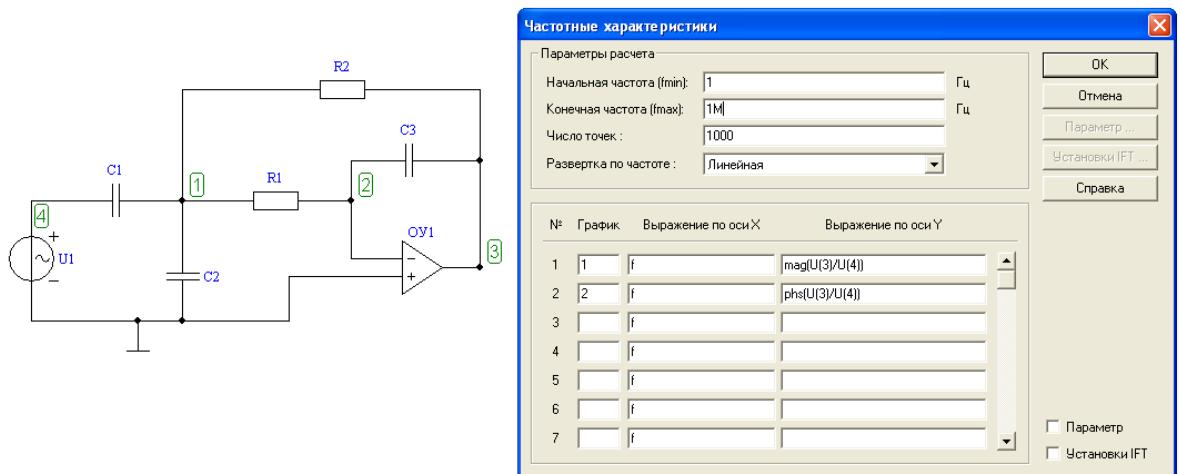


График АЧХ

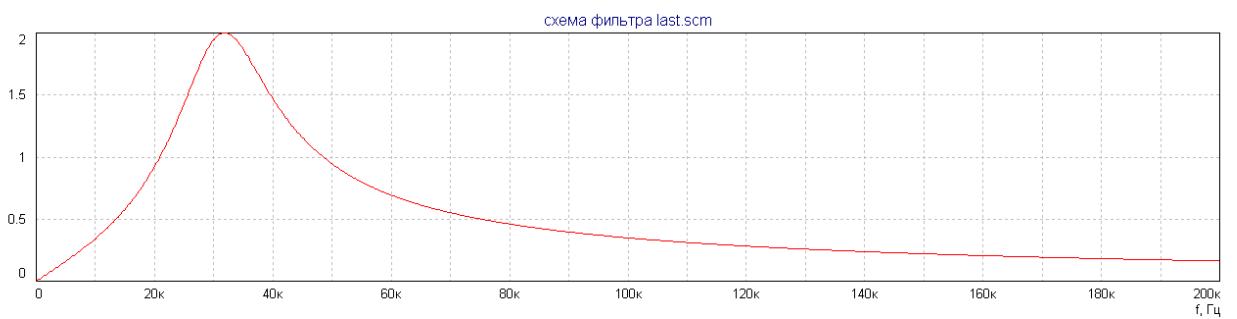
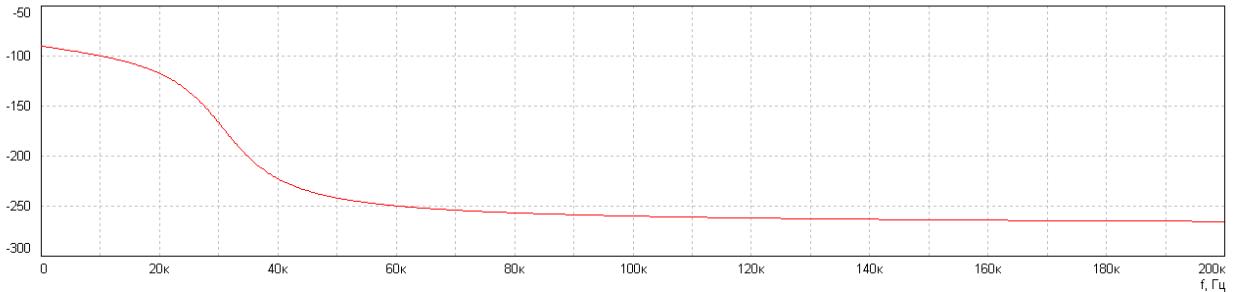
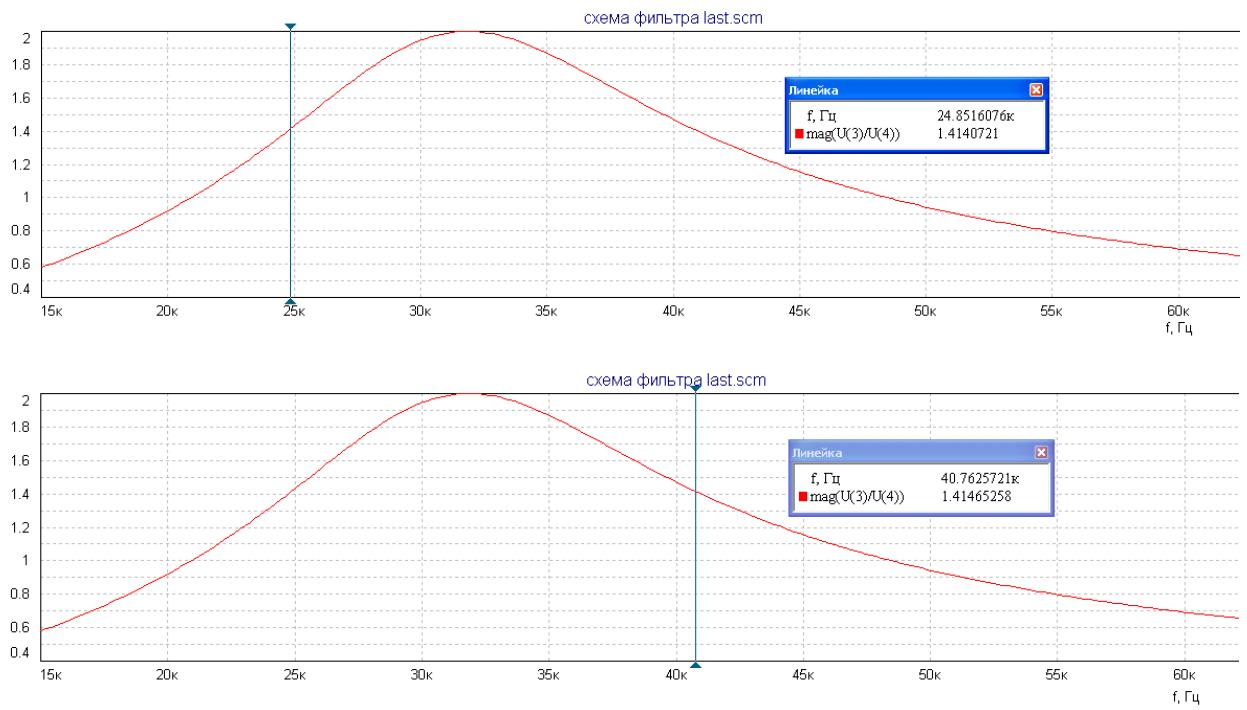


График ФЧХ



3.6. С помощью электронной линейки определите по графику АЧХ граничные значения амплитудно-частотной полосы пропускания цепи:

- для полосового фильтра (ПФ) – это диапазон частот $2 \Delta f^* = f_1 - f_{-1}$, в котором АЧХ уменьшается от своего максимального значения H_{max} до $\frac{H_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot H_{max}$.



В приведенном примере $H_{max} = 2$; $\frac{H_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot H_{max} = 1.414$; $f_{-1} = 24.85$ кГц; $f_1 = 40.76$ кГц; полоса пропускания $2 \Delta f^* = f_1 - f_{-1} = 40.76 - 24.85 = 15.91$ кГц;

- для фильтра нижних частот (ФНЧ) необходимо определить значение АЧХ при $\omega = 0$, полоса пропускания в данном случае – это диапазон частот, в котором АЧХ меняется от значения $H(0)$ до $\frac{H(0)}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot H(0)$, где

$$H(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} |H(j\omega)|;$$

- для фильтра верхних частот (ФВЧ) необходимо определить значение АЧХ при $\omega \rightarrow \infty$, полоса пропускания в данном случае – это диапазон частот, в котором АЧХ меняется от значения $\frac{H(\infty)}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot H(\infty)$ до $H(\infty)$, где

$$|H(\infty)| = \lim_{\omega \rightarrow \infty} |H(j\omega)|.$$

3.7. Загрузите программу Mathcad.

3.8. Постройте графики АЧХ $|H(j\omega)|$ и ФЧХ $\theta(\omega)$ ARC-звена в Mathcad. Для этого замените в выражении $H(p)$ для операторной передаточной функции $p = j\omega$ и получите выражение для комплексной передаточной функции $H(j\omega)$

$$H(p)|_{p=j\omega} = H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}$$

Для приведенного выше примера расчет АЧХ и ФЧХ в Mathcad выглядит следующим образом:

Комплексная передаточная функция

$$H(w) := \frac{i \cdot w \cdot (2 \cdot 10^5)}{-w^2 + i \cdot w \cdot 10^5 + 4 \cdot 10^{10}}$$

График АЧХ

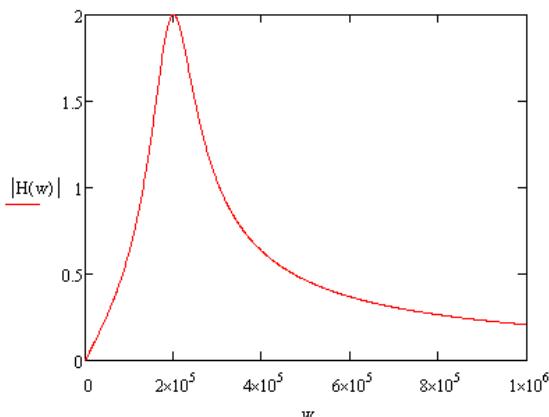
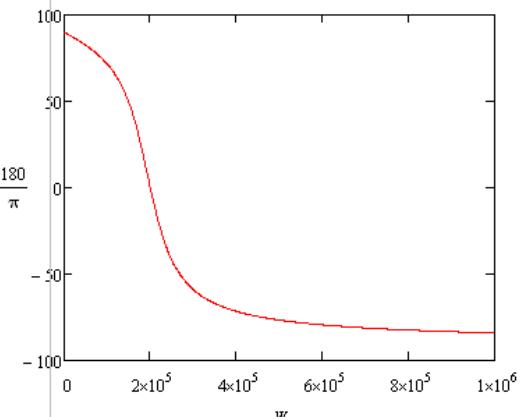


График ФЧХ



3.9. Сравните рассчитанные в Mathcad частотные характеристики с характеристиками, полученными в FASTMEAN.

Найдите значение коэффициента γ :

$$\gamma = \frac{H_1(p)}{H_2(p)}$$

где - заданная операторная передаточная функция;

$H_1(p)$ – операторная передаточная функция реализованной ARC-цепи.

Для приведенного выше примера $H_1(p) = -H_2(p)$, поэтому ФЧХ заданной и реализованной операторной передаточной функций отличаются на π , что наглядно видно из приведенных графиков. АЧХ заданной и реализованной операторной передаточной функций полностью совпадают, так как $|\gamma| = 1$.

4. Указания к защите

4.1. Отчет должен содержать:

- операторную передаточную функцию, заданную для реализации;
- схему ARC-фильтра;
- расчет параметров элементов ARC-фильтра;
- графики частотных характеристик АЧХ и ФЧХ ARC-фильтра, рассчитанные в Mathcad;

- графики частотных характеристик АЧХ и ФЧХ ARC-фильтра, рассчитанные в FASTMEAN;
- расчет полосы пропускания ARC-фильтра;
- сравнительный анализ частотных характеристик АЧХ и ФЧХ заданной операторной передаточной функции и реализованного ARC-звена и соответствующие выводы

выводы об эффективности использования метода уравнивания коэффициентов при синтезе ARC-фильтров.

4.2. Подготовьтесь к ответам на вопросы и решению типовых задач.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются преимущества и недостатки ARC-фильтров в сравнении с LC-фильтрами?
2. Почему ARC-фильтры высоких порядков реализуют путем каскадно-развязанного соединения звеньев низкого порядка (обычно не выше второго)?
3. В чем состоит метод уравнивания коэффициентов?
4. Что понимают под частотными характеристиками фильтра, и как они связаны с операторной передаточной функцией?
5. Что понимают под полосой пропускания фильтра? Чему равно ослабление фильтра в полосе пропускания?
6. Что понимают под полосой задерживания фильтра? Чему равно ослабление фильтра в полосе задерживания?
7. Как величина добротности полюса Q_n влияет на выбор звена, потенциально реализующего заданную $H(p)$?