

## 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).

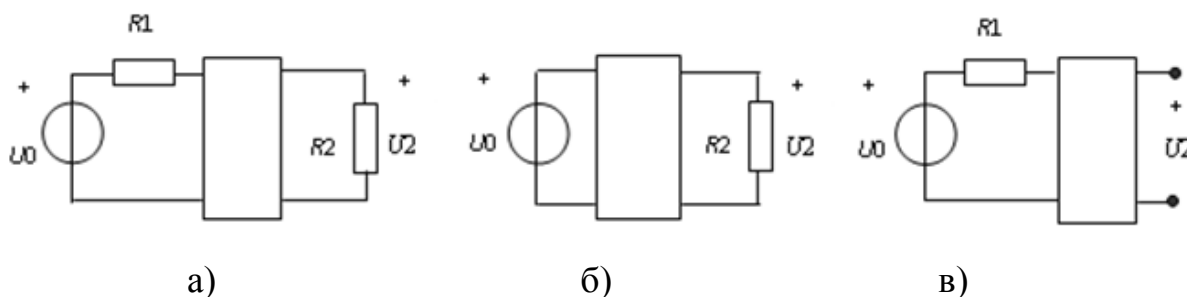


Рис. 1.1. Режимы работы фильтра

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 полосы (полос) пропускания ПФ и РФ;

$f_k$  – граничная частота полосы задерживания ФНЧ и ФВЧ, а также одна из граничных частот полосы (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  $H(j\omega) = H(p) \Big|_{p=j\omega}$ .

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

$$H(p) = \frac{2U_2(p)}{U_0(p)} \sqrt{\frac{R1}{R2}},$$

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 нижних 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

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

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

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

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

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

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

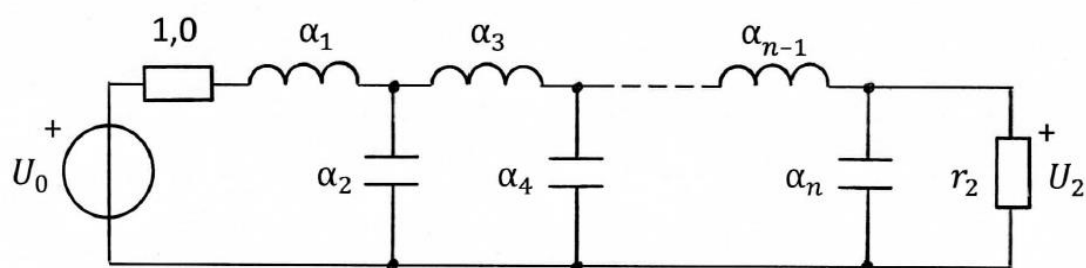
В (1.6) и (1.7)

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

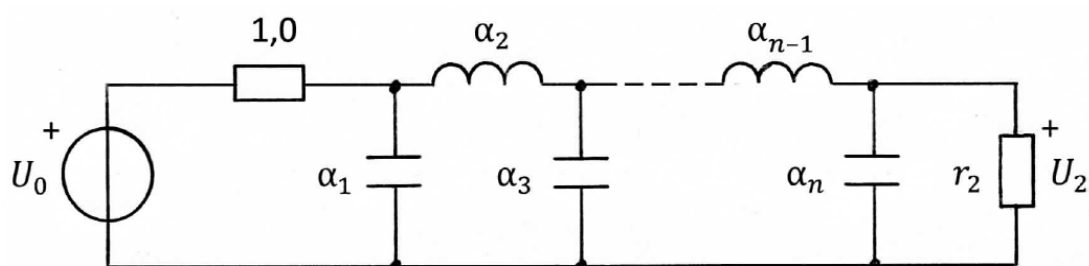
$$k = \frac{f_0}{f_1 - f_{-1}}. \quad (1.9)$$

Расчитанное 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.

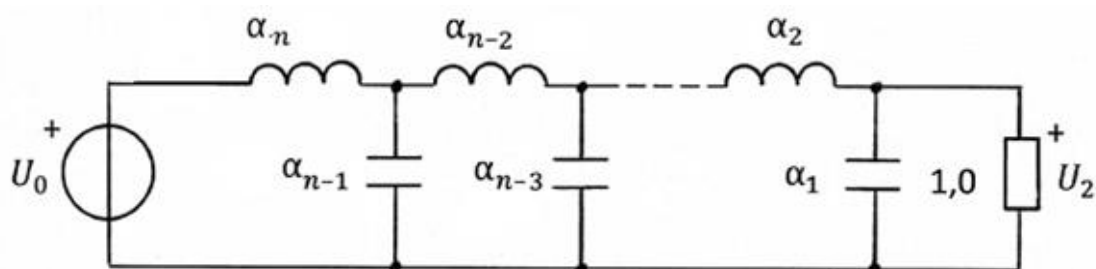


$n$  – четное

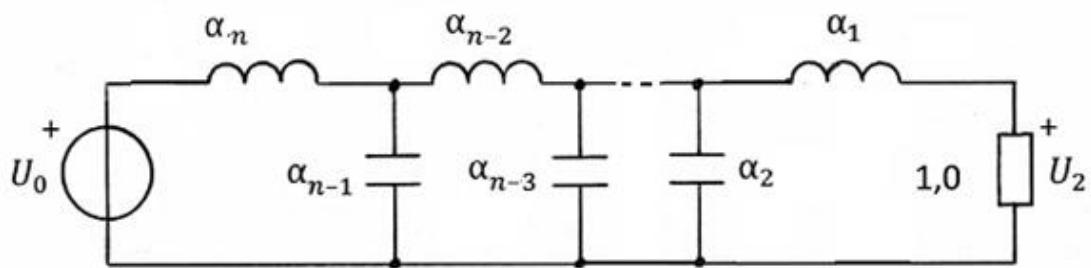


$n$  – нечетное

Рис. 1.2. Схема ФПНЧ для режима двусторонней нагрузки

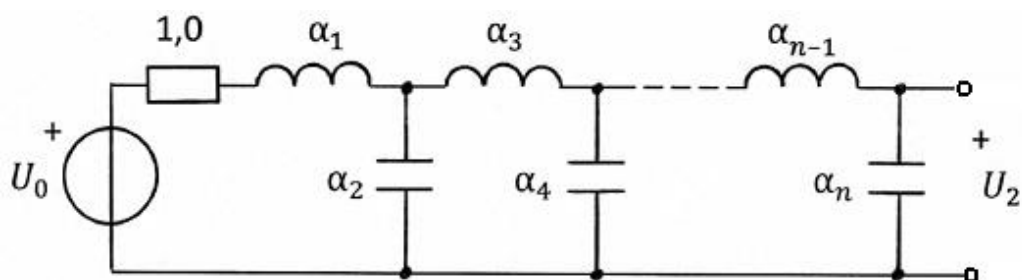


$n$  – четное

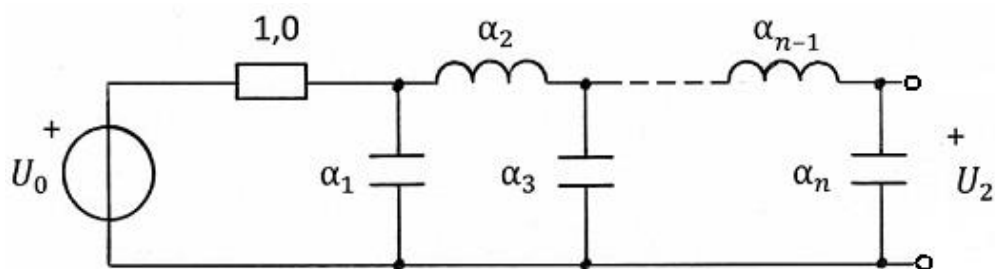


$n$  – нечетное

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 Баттерворта 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  $\Delta\alpha = 3\text{дБ}$

$n$	8	7	6	5	4	3
$\alpha_1$	0,1951	0,22225	0,2588	0,3090	0,3827	0,500
$\alpha_2$	0,5776	0,6560	0,7579	0,8944	1,082	1,333
$\alpha_3$	0,9871	1,055	1,202	1,382	1,577	1,500
$\alpha_4$	1,259	1,397	1,553	1,694	1,531	–
$\alpha_5$	1,528	1,659	1,759	1,545	–	–
$\alpha_6$	1,729	1,799	1,553	–	–	–
$\alpha_7$	1,825	1,558	–	–	–	–
$\alpha_8$	1,561	–	–	–	–	–

Таблица 1.7

Элементы двусторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой Баттерворта  
при  $\Delta\alpha = 3\text{ дБ}$

$n$	8	7	6	5	4	3
$\alpha_1$	0,3902	0,4450	0,5176	0,6180	0,7654	1,000
$\alpha_2$	1,111	1,247	1,414	1,618	1,848	2,000
$\alpha_3$	1,663	1,802	1,932	2,000	1,848	1,000
$\alpha_4$	1,962	2,000	1,932	1,618	0,7654	–
$\alpha_5$	1,962	1,802	1,414	0,618	–	–
$\alpha_6$	1,663	1,247	0,5176	–	–	–
$\alpha_7$	1,111	0,445	–	–	–	–
$\alpha_8$	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  $\Delta\alpha = 1,25\text{ дБ}$

$n$	8	7	6	5	4	3
$\alpha_1$	1,179	1,175	1,169	1,159	1,141	1,103
$\alpha_2$	1,460	1,454	1,446	1,431	1,401	1,326
$\alpha_3$	2,132	2,122	2,106	2,073	1,988	1,577
$\alpha_4$	1,646	1,635	1,613	1,556	1,256	–
$\alpha_5$	2,216	2,190	2,118	1,723	–	–
$\alpha_6$	1,658	1,607	1,313	–	–	–
$\alpha_7$	2,158	1,767	–	–	–	–
$\alpha_8$	1,333	–	–	–	–	–

Таблица 1.9

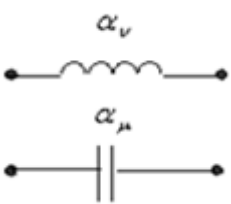
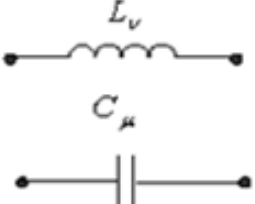
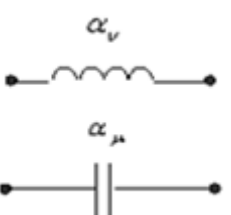
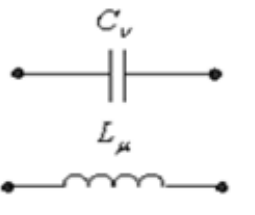
Элементы двусторонне нагруженного ФПНЧ с характеристиками Чебышева при  $\Delta a = 1,25$  дБ

$n$	8	7	6	5	4	3
$\alpha_1$	2,359	2,351	2,339	2,319	2,283	2,206
$\alpha_2$	1,057	1,053	1,046	1,035	1,011	0,9487
$\alpha_3$	3,314	3,297	3,267	3,204	3,034	2,206
$\alpha_4$	1,117	1,108	1,089	1,035	0,761	–
$\alpha_5$	3,352	3,297	3,140	2,319	–	–
$\alpha_6$	1,104	1,053	0,7798	–	–	–
$\alpha_7$	3,171	2,351	–	–	–	–
$\alpha_8$	0,7865	–	–	–	–	–
$r_2$	3,000	1,000	3,000	1,000	3,000	1,000

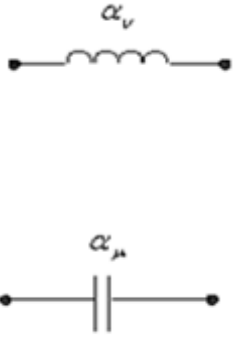
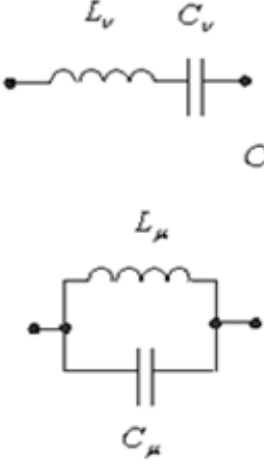
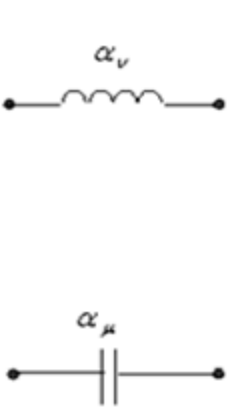
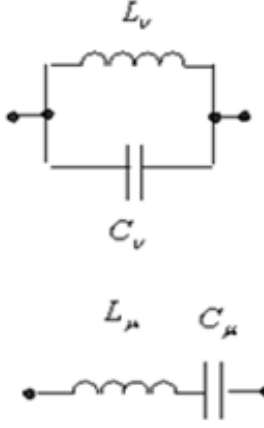
Параметры элементов проектируемого фильтра определяются путем соответствующего пересчета параметров элементов ФПНЧ по формулам, приведенным в табл. 1.10. Расчет следует выполнить с точностью до четырех значащих цифр.

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



	 $L_v = \frac{k \alpha_v R_0}{2\pi f_0}$ $C_v = \frac{1}{k \alpha_v 2\pi f_0 R_0}$ $L_\mu = \frac{R_0}{k \alpha_\mu 2\pi f_0}$ $C_\mu = \frac{k \alpha_\mu}{2\pi f_0 R_0}$	ПФ
	 $L_v = \frac{\alpha_v R_0}{k 2\pi f_0}$ $C_v = \frac{k}{\alpha_v 2\pi f_0 R_0}$ $L_\mu = \frac{k R_0}{\alpha_\mu 2\pi f_0}$ $C_\mu = \frac{\alpha_\mu}{k 2\pi f_0 R_0}$	РФ

В формулах табл. 1.10 для фильтров, работающих в режиме двусторонней нагрузки либо односторонней нагрузки при холостом ходе на выходе фильтра  $R_0 = R_1$ . В случае односторонней нагрузки при заданном входном напряжении  $R_0 = R_2$ .

При работе фильтра в режиме двусторонней нагрузки величину нагрузочного сопротивления рассчитайте по формуле  $R_2 = r_2 \cdot R_0$ .

## 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 ФПНЧ;

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 потерям и стремится к бесконечности.

В первой строке «Выражение по оси Y» запишите выражение

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

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 ФПНЧ.

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.

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

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

Граничная 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:

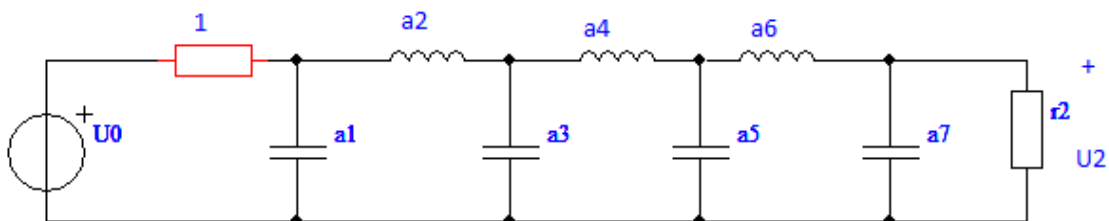
$$n \geq \frac{a_0 + 6 - 10 \lg(10^{0,1\Delta a} - 1)}{20 \lg(\hat{\omega}_k + \sqrt{\hat{\omega}_k^2 - 1})},$$

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:

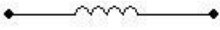





Элементы двухсторонне нагруженного ФПНЧ с характеристикой Чебышева при

$\Delta a = 1,25$  дБ и  $n = 7$ :

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

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

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

$$R_0 = R_1 = 600 \text{ Ом}$$

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

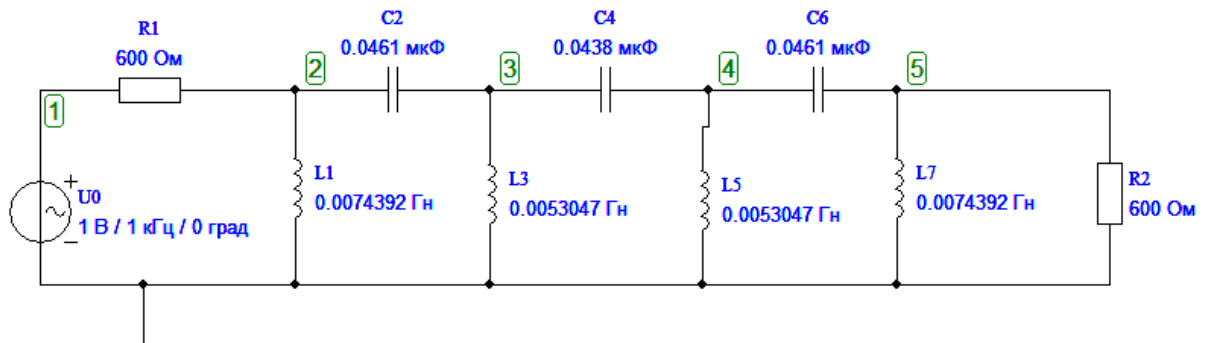
$$L_1 = 7,439 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad C_2 = 4,614 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$$

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

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

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

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:

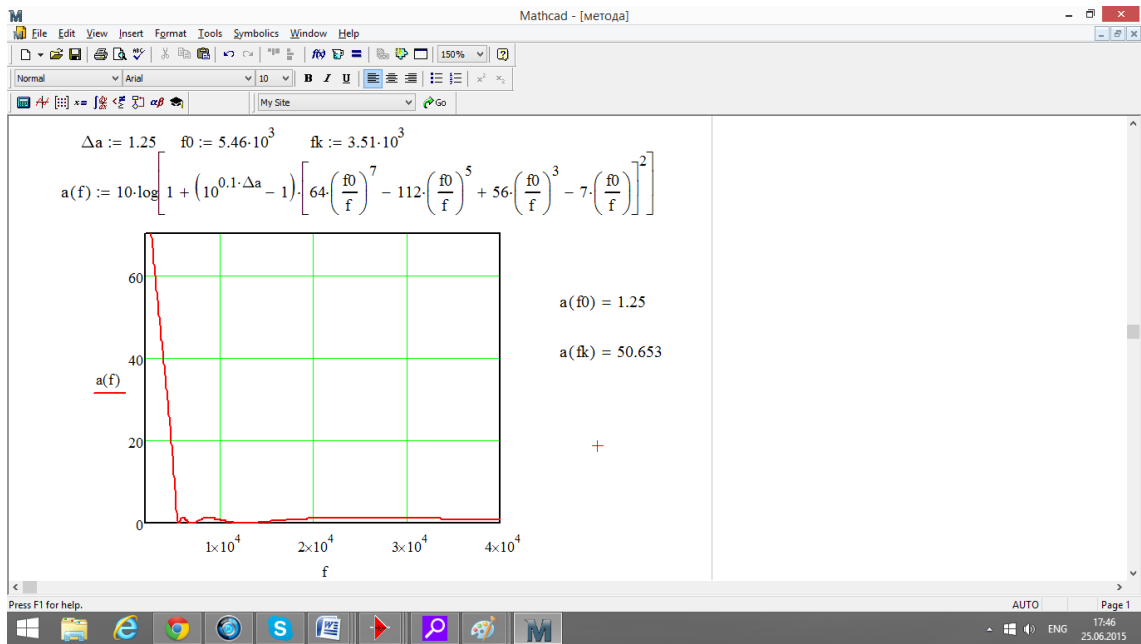
$$f_{\min} = 0,8 \cdot f_k = 2,808 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

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

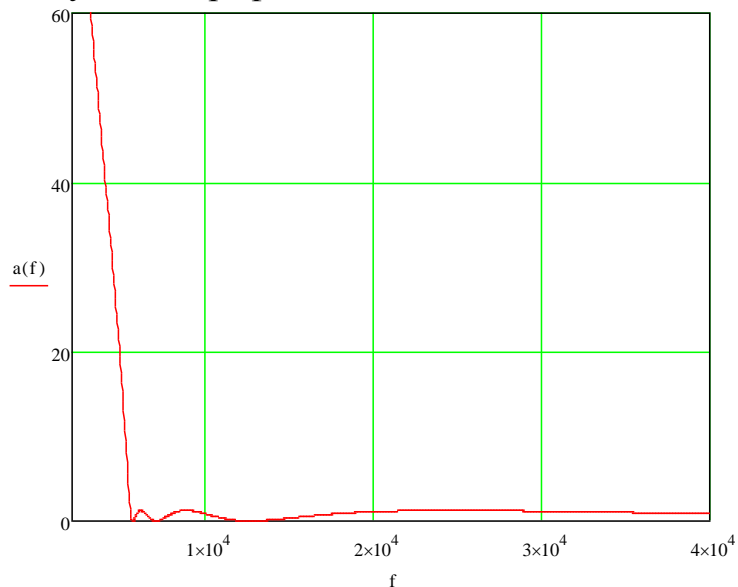
Характеристика ослабления  $a(f)$ , полученная прямым преобразованием частоты  $\hat{\omega}$ , имеет вид:

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

Построим  $a(f)$ , используя Mathcad.

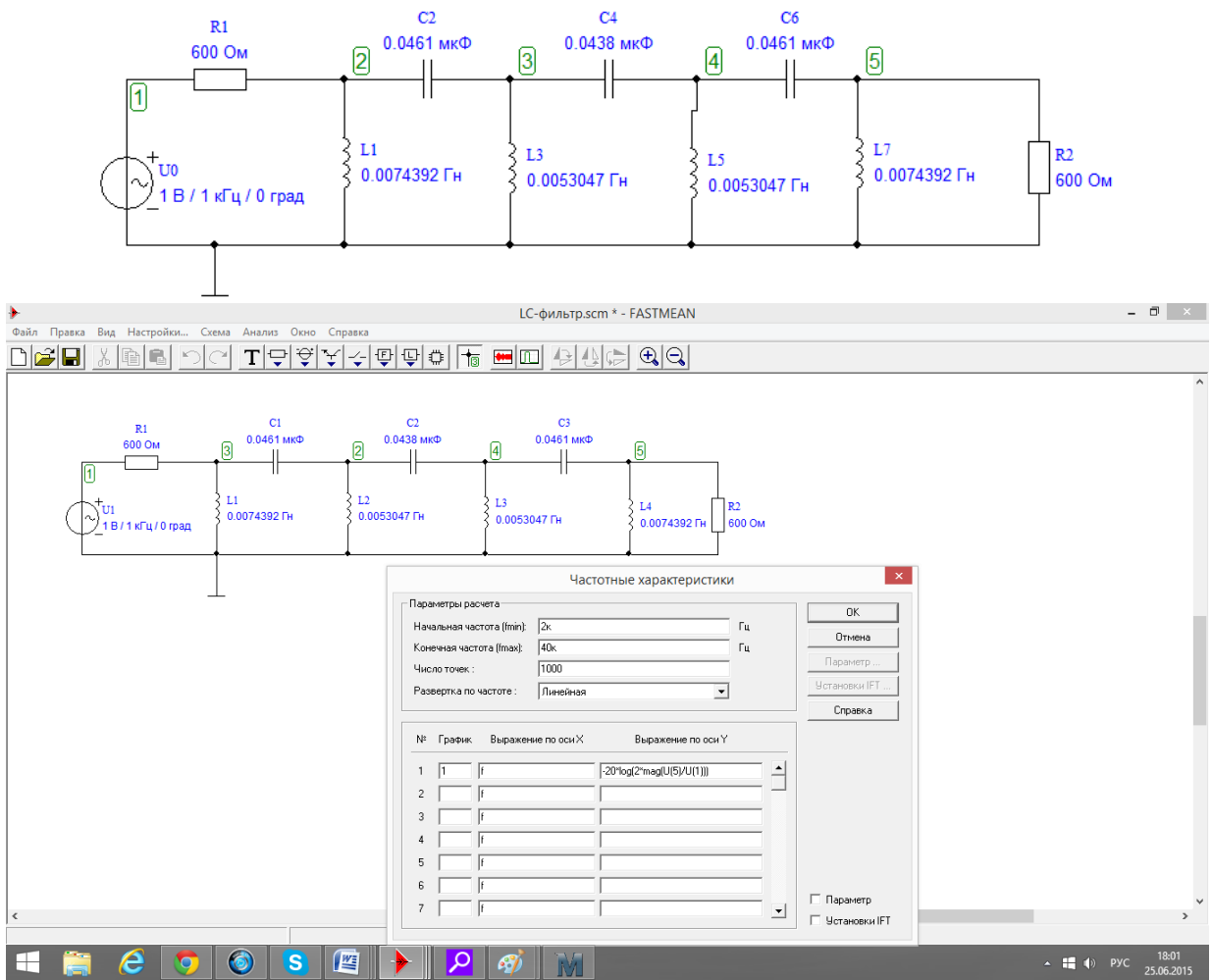


Получаем следующий график в Mathcad.



### Моделирование фильтра с помощью программы Fastmean

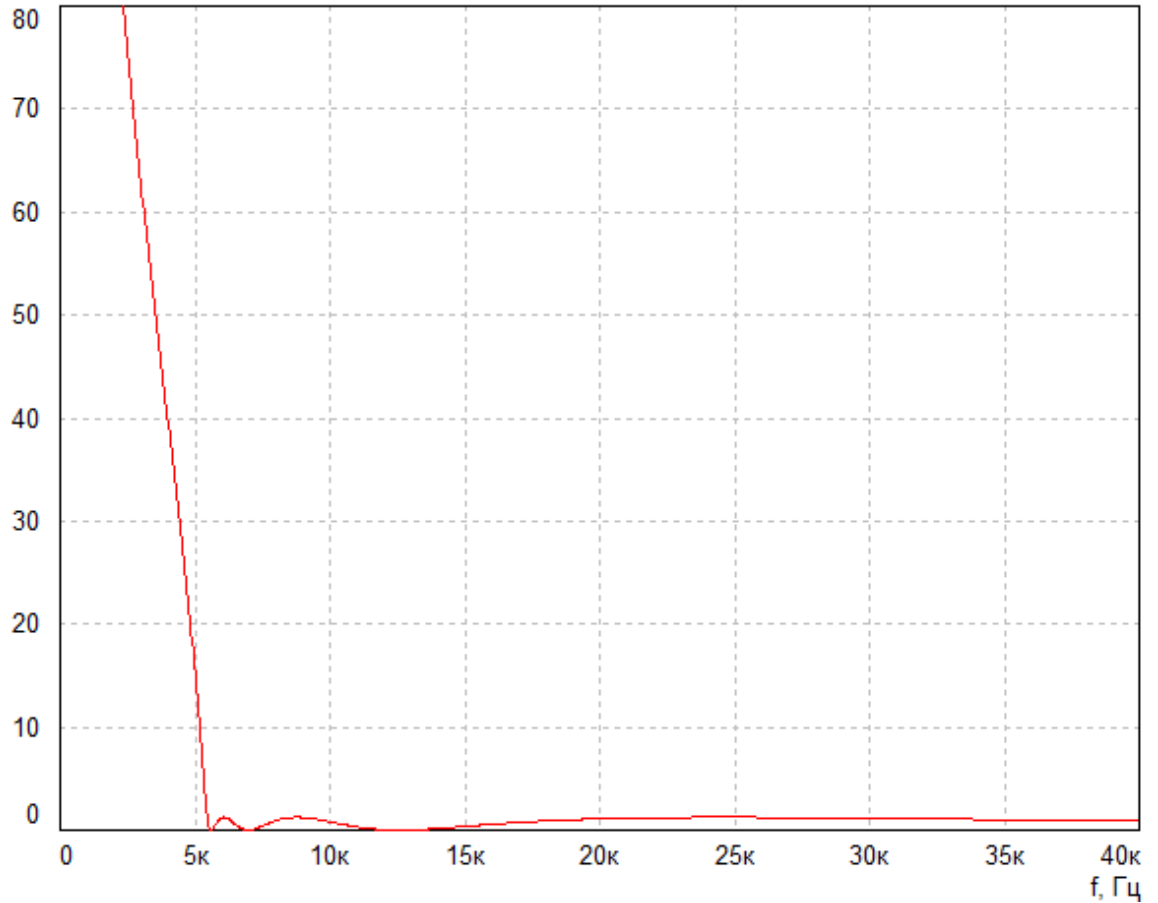
Моделирование фильтра на ПК выполняется с помощью программы Fastmean. Схема фильтра выглядит следующим образом.



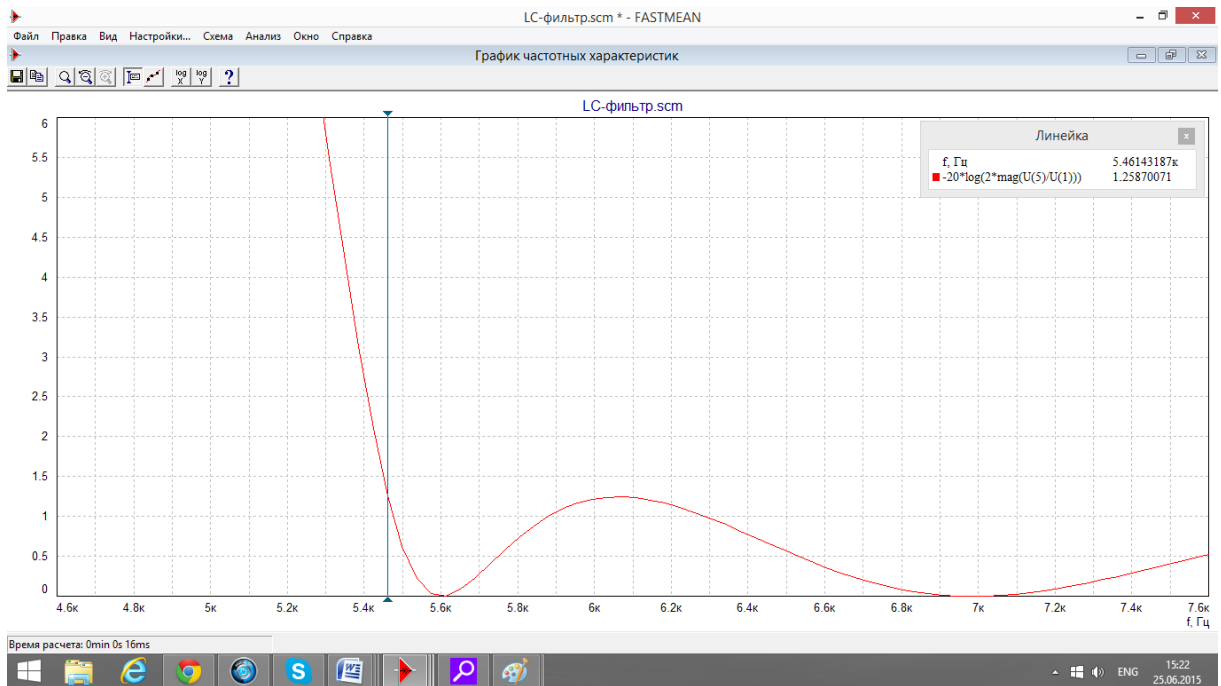
Характеристика ослабления фильтра.



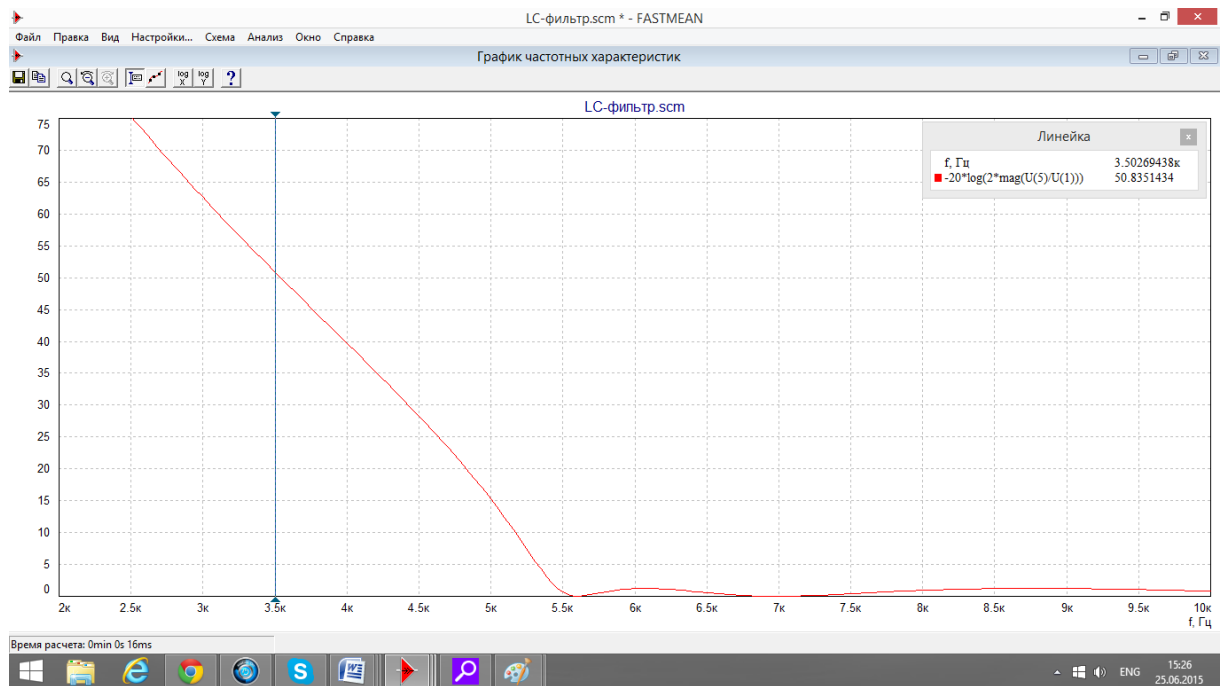
LC-фильтр.scm



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 Баттерворта, 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	$\frac{\frac{3}{M} \cdot 10^5 \cdot p}{p^2 + \frac{1}{M} \cdot 10^5 \cdot p + \frac{4}{N^2} \cdot 10^{10}}$

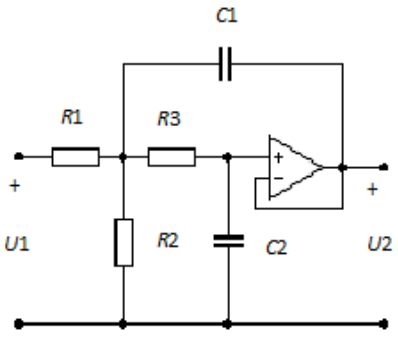
2.4. Рассчитайте параметры: добротность полюса  $Q_n$  и частоту полюса  $\omega_n$  реализуемой операторной передаточной функции  $H(p)$ .

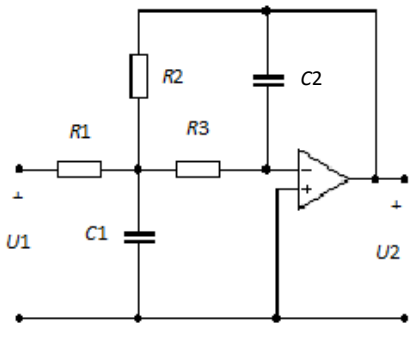
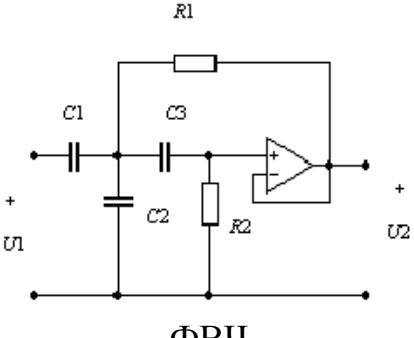
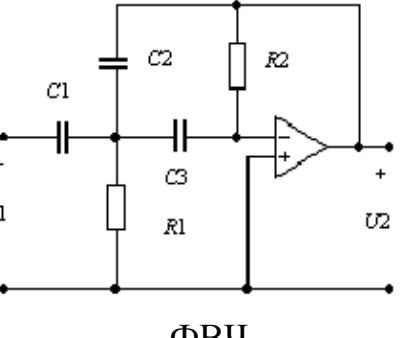
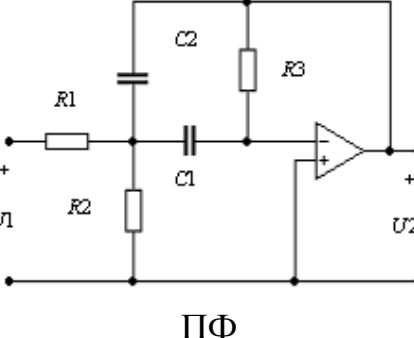
Например, для фильтра нижних частот (ФНЧ)

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

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 style="text-align: center;">ФНЧ</p>	$H(p) = \frac{1}{p^2 + \frac{1}{C1} \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) p + \frac{1}{C1C2} \frac{1}{R3} \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right)}$ <p>Положить <math>R1 = R2 = R3 = R</math>. Задать величину <math>R = 10^5</math> Ом. Рассчитать <math>C1, C2</math></p>

№	Схема звена	Передаточная функция. Указания к расчету
2	 <p style="text-align: center;">ФНЧ</p>	$H(p) = -\frac{1}{p^2 + \frac{1}{C1} \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) p + \frac{1}{C1 C2 R2 R3}}$ <p>Положить <math>R1 = R2 = R3 = R</math>. Задать величину <math>R = 10^5</math> Ом. Рассчитать <math>C1, C2</math></p>
3	 <p style="text-align: center;">ФВЧ</p>	$H(p) = \frac{\frac{C1}{C1+C2} p^2}{p^2 + \frac{1}{C3 R2} \cdot \frac{C1+C2+C3}{C1+C2} p + \frac{1}{(C1+C2) C3 R1 R2}}$ <p>Положить <math>C1 = C2 = C3 = C</math>. Задать величину <math>C = 10^{-9}</math> Ф. Рассчитать <math>R1, R2</math>.</p>
4	 <p style="text-align: center;">ФВЧ</p>	$H(p) = \frac{-\frac{C1}{C2} p^2}{p^2 + \frac{C1+C2+C3}{C2 C3 R2} p + \frac{1}{C2 C3 R1 R2}}$ <p>Положить <math>C1 = C2 = C3 = C</math>. Задать величину <math>C = 10^{-9}</math> Ф. Рассчитать <math>R1, R2</math></p>
5	 <p style="text-align: center;">ПФ</p>	$H(p) = \frac{-\frac{1}{R1 C2} p}{p^2 + \frac{1}{R3} \left( \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} \right) p + \frac{1}{R3} \left( \frac{1}{R2} + \frac{1}{R1} \right) \frac{1}{C1 C2}}$ <p>Положить <math>C1 = C2 = C</math>. Задать величину <math>C = 10^{-9}</math> Ф. Рассчитать <math>R1, R2, R3</math></p>

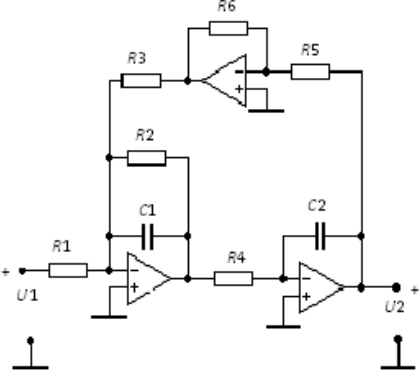
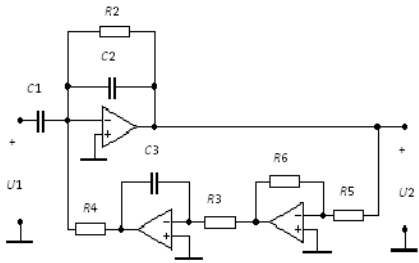
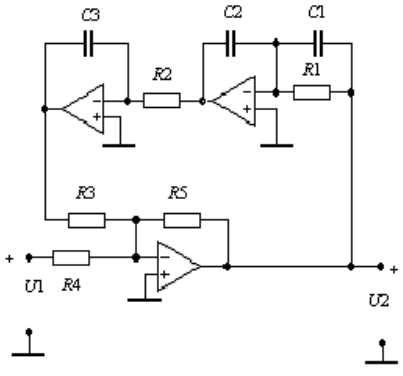
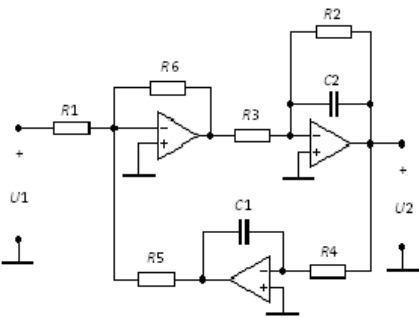
6		$H(p) = \frac{-\frac{C1}{R2(C1+C2)C3}p}{p^2 + \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}\right)\frac{1}{C1+C2}p + \frac{1}{R1R2C3(C1+C2)}}$ <p>Положить <math>R1 = R2 = R</math>  Задать величину <math>R=10^5</math> Ом.  Рассчитать <math>C1, C2, C3</math></p>
---	--	--

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		$H(p) = \frac{1}{\frac{R_1 R_4 C_1 C_2}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{R_5}{R_3 R_4 R_6 C_1 C_2}}}$ <p>Положить <math>R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R</math>  Задать величину <math>R=10^5</math> Ом.  Рассчитать <math>C_1, C_2</math></p>



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

6		$H(p) = \frac{p \frac{R_6}{R_1 R_5 C_1}}{p^2 + p \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{R_6}{R_3 R_4 R_5 C_1 C_2}}$ <p>Положить <math>R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R</math>;          Задать величину <math>R = 10^5 \text{ Ом}</math>.          Рассчитать <math>C_1, C_2, R_1</math></p>
---	--	--

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

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

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

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

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

### Пример расчета:

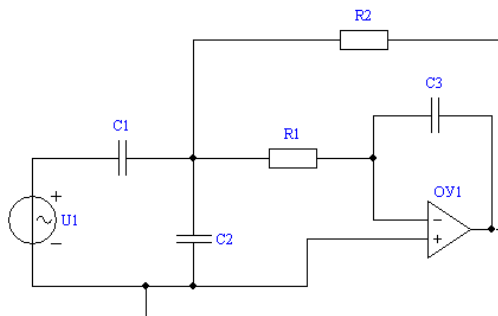
Пусть задана операторная передаточная функция ППФ:

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

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

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 уравнивания 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 уравнивания 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:

$$R_1 := 10^5 \quad R_2 := 10^5$$

Given

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

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

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

+

$$\text{Find}(C_1, C_2, C_3) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{200000000000} \\ \frac{3}{200000000000} \\ \frac{1}{800000000000} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \times 10^{-11} \\ 1.5 \times 10^{-10} \\ 1.25 \times 10^{-11} \end{pmatrix}$$

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

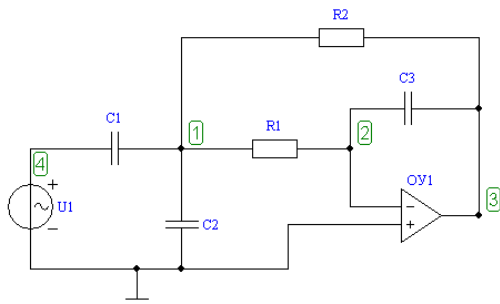
3.1. Загрузите программу FASTMEAN.

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.



**Частотные характеристики**

Параметры расчета

Начальная частота (fmin): 1 Гц

Конечная частота (fmax): 1M Гц

Число точек: 1000

Развертка по частоте: Линейная

OK

Отмена

Параметр ...

Установки IFT ...

Справка

№	График	Выражение по оси X	Выражение по оси Y
1	1	f	mag(U(3)/U(4))
2	2	f	phs(U(3)/U(4))
3		f	
4		f	
5		f	
6		f	
7		f	

Параметр

Установки IFT

График АЧХ

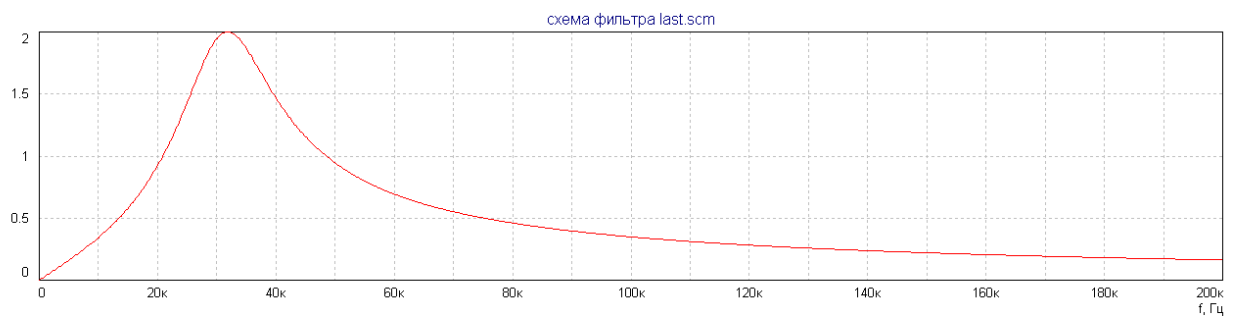
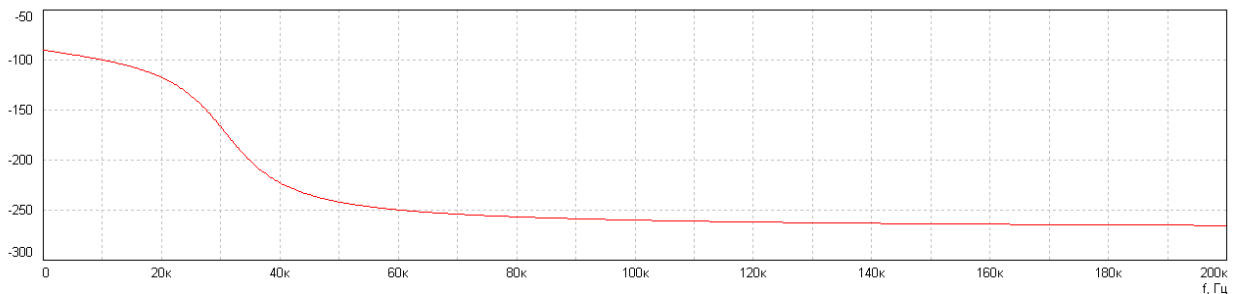


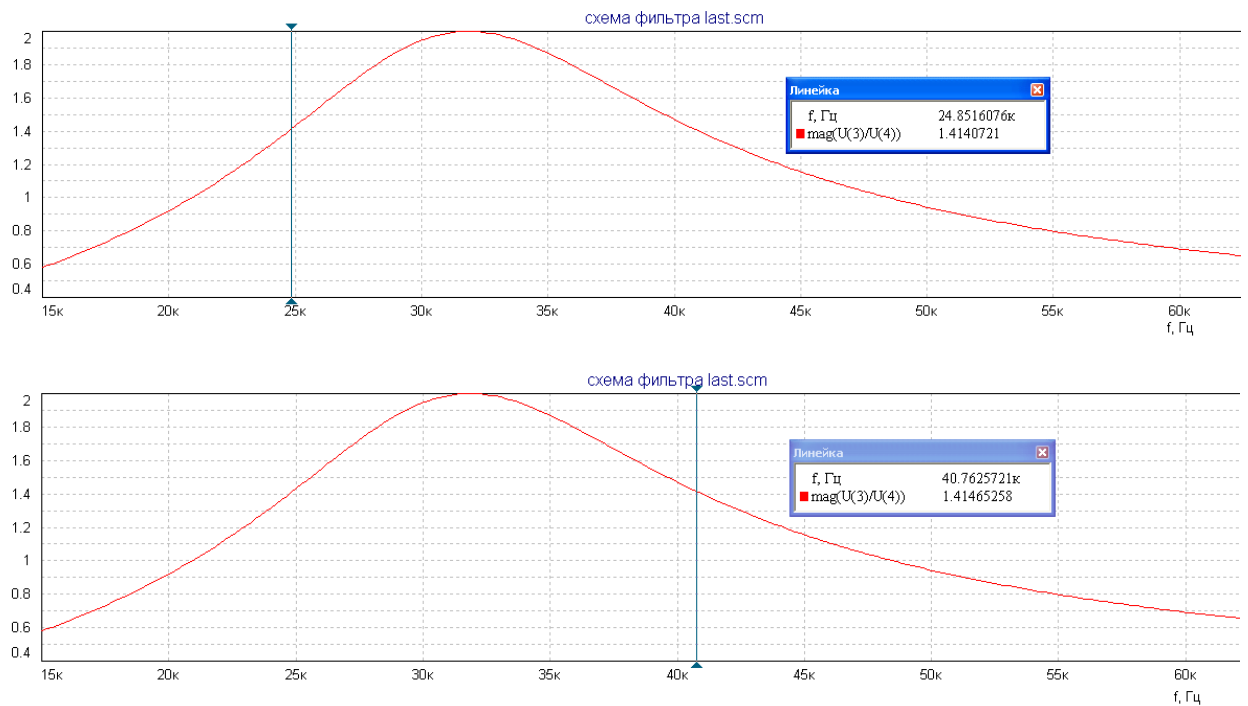
График ФЧХ



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

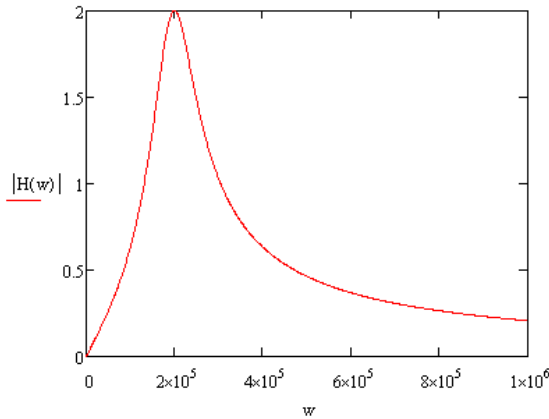
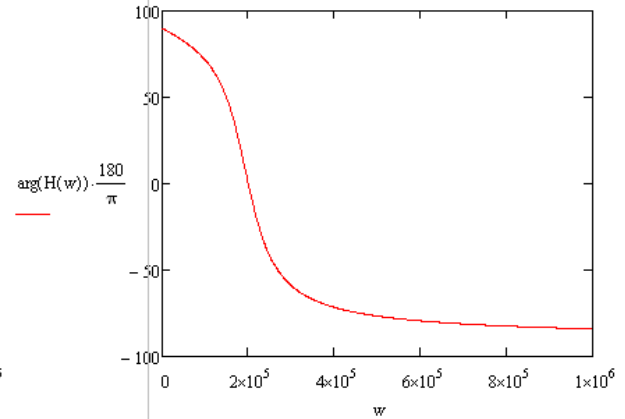


График ФЧХ



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

Найдите значение коэффициента  $\gamma$ :

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

где - заданная операторная передаточная функция;

$H_2(p)$  – 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  $\pi$ , 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  $H(p)$ ?