

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО КУРСУ  
**«ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»**

для студентов специального заочного образования,  
обучающихся по направлениям 5222200 «Телекоммуникация» и  
5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)».

Ташкент 2008

Белова Л.Н., Козлов В.А. Задания и методические указания к выполнению курсовой работы по курсу «Теория электрических цепей» для студентов специального заочного образования, обучающихся по направлениям 5522200 «Телекоммуникация» и 5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)». - Ташкент: ТУИТ, 2008. - 50 с.

В пособии приведены 100 вариантов заданий на курсовую работу по дисциплине «Теория электрических цепей».

Методические указания включают в себя основы теории фильтров, порядок расчета полиномиальных пассивных LC- и активных RC-фильтров. Приведены примеры расчетов фильтров Баттерворта и Чебышева.

Для облегчения выполнения курсовой работы в приложении приводятся рекомендации - шаблоны по расчёту и построению графиков частотных характеристик рабочего ослабления электрических фильтров с помощью табличного процессора Excel.

Рассмотрены на заседании кафедры ТЭЦ и рекомендованы к печати  
Протокол № 22 от 11.02.2008

## Предисловие

Курсовая работа по дисциплине «Теория электрических цепей» (ТЭЦ) по теме «Расчет электрических фильтров» выполняется студентами на третьем курсе в пятом семестре.

При защите курсовой работы одновременно проводится опрос по всему разделу курса ТЭЦ «Электрические фильтры». Эти вопросы могут быть изучены по основному учебнику [1], задачнику [2] и другой литературе, указанной в списке [1...9].

В основной учебной литературе вопросы теории и расчета фильтров освещены достаточно кратко. В связи с этим, в методические указания включены основные теоретические положения и понятия, известные из теории формулы, а также приведены примеры расчетов различных фильтров.

При выполнении курсовой работы следует руководствоваться следующим.

Требуемые расчеты в работе должны приводиться достаточно подробно, с кратким словесным пояснением при расчете каждой величины. При этом должны приводиться промежуточные числовые значения.

Курсовые работы, в которых вычисления производятся крайне сокращенно, к защите не допускаются и возвращаются студентам на переработку.

Работа должна быть написана аккуратно, чернилами или шариковой ручкой на одной стороне листа формата А4 (размером 296x204 мм). Листы должны быть сшиты и пронумерованы. В конце курсовой работы необходимо указать использованную литературу, поставить дату и подпись. Курсовая работа регистрируется в деканате заочного факультета и передается на кафедру ТЭЦ для проверки не позднее, чем за неделю до срока защиты.

Опрос при защите курсовой работы проводится по вопросам для подготовки к защите курсовой работы, которые приведены на 48 с.

## 1. Задание на курсовую работу

Задание на курсовую работу составлено по 100-вариантной системе. Вариант задания определяется двумя последними цифрами в номере зачетной книжки студента. Курсовая работа включает в себя **три задачи**:

1. Расчет пассивного LC-фильтра верхних частот (ФВЧ) Баттерворта или Чебышева с использованием таблиц.
2. Расчет симметричного полосового LC фильтра (ПФ) Баттерворта или Чебышева с использованием таблиц.
3. Расчет активного RC-фильтра нижних частот (ФНЧ) Баттерворта или Чебышева аналитическим методом.

**Задача 1.** Рассчитать двухсторонне нагруженный LC ФВЧ Баттерворта или Чебышева по данным: в полосе пропускания (ПП)  $f > f_1$  ослабление не должно превышать  $\Delta A$ , а в полосе задерживания (ПЗ)  $0 < f < f_s$  ослабление должно быть не менее  $A_s$ . Сопротивления генератора и нагрузки одинаковы,  $R_{\Gamma} = R_{\text{н}} = R$ . Данные вариантов приведены в таблице 1. Для вариантов 01-25 и 51-75  $R = 1$  кОм, для вариантов 26-50 и 76-100  $R = 600$  Ом.

### Требуется

1. Определить порядок ФНЧ – прототипа (ФНЧП).
2. По таблицам определить нормированные значения параметров элементов ФНЧП.
3. Начертить схему LC ФНЧП и схему рассчитываемого LC ФВЧ.
4. Вычислить номинальные (истинные) значения параметров элементов ФВЧ.
5. Рассчитать ослабление  $A(f)$  ФВЧ на частотах:  $0,2 f_s, 0,5 f_s, f_s, f_c, f_1$ , где  $f_c$  - частота, соответствующая ослаблению 3 дБ фильтра Баттерворта.
6. Начертить график зависимости ослабления от частоты  $A(f)$ . По графику  $A(f)$  выполнить проверку правильности расчета фильтра.

**Задача 2.** Рассчитать симметричный LC ПФ Баттерворта или Чебышева, нагруженный двусторонне по данным: границы ПП нижняя  $f_{-1}$ , верхняя  $f_1$  (или  $f_0$  или ширина ПП  $\Delta f$ ), ослабление в этой полосе должно быть не более  $\Delta A$ , а при частоте  $f_{s2}$  ослабление должно быть не менее  $A_{s2}$ . Сопротивления генератора и нагрузки фильтра  $R_{\Gamma} = R_{\text{н}} = R$ . Для вариантов 01-25 и 51-75 сопротивления  $R_{\Gamma} = R_{\text{н}} = 1$  кОм, для вариантов, 26-50 и 76-100  $R_{\Gamma} = R_{\text{н}} = 600$  Ом. Данные всех вариантов приведены в табл. 2.

### Требуется

1. Определить порядок  $n$  ФНЧП.
2. По таблицам определить нормированные значения элементов ФНЧП.
3. Начертить схему LC ФНЧП и ПФ.
4. Вычислить номинальные значения элементов ПФ.
5. Рассчитать ослабление  $A(f)$  на частотах  $f_0, f_{-1}, f_1, f_{s1}, f_{s2}, 1,5 f_{s2}, 2 f_{s2}$ .
6. Начертить график зависимости ослабления от частоты  $A(f)$ . По графику  $A(f)$  выполнить проверку правильности расчета фильтра.

**Задача 3.** Рассчитать АРС ФНЧ Баттерворта или Чебышева по данным: в ПП  $0 < f < f_1$  ослабление не должно превышать  $\Delta A$ , а при частоте  $f_s$  и более высоких ослабление должно быть не менее  $A_s$ . Значения емкости равны  $C_1 = C_2 = C$ , при этом  $C = 0,1$  мкФ и  $m_R = R_1/R = 0,8$  для вариантов 01-50,  $m_R = 1$  и  $C = 0,08$  мкФ для вариантов 51-100. Данные всех вариантов приведены в таблице 3.

### Требуется

1. Рассчитать порядок  $n$  ФНЧП, число звеньев первого и второго порядков;
2. Определить нормированные значения «нулей» знаменателя передаточной функции фильтра.
3. Найти выражения нормированных трехчленов каждого звена второго порядка.
4. Определить выражение нормированной передаточной функции  $H(s)$  всего фильтра.
5. Найти выражение операторной передаточной функции для каждого звена  $H_k(p)$ .
6. Определить значения сопротивлений и коэффициента усиления  $K$  для каждого звена второго порядка.
7. Начертить полную схему фильтра.
8. Рассчитать ослабление фильтра  $A(f)$  на частотах  $f_1$ ,  $f_c$ ,  $f_s$ ,  $1,5 f_s$ ,  $2 f_s$ .
9. Начертить график  $A(f)$  и выполнить проверку правильности расчета фильтра.

## Требования к частотной характеристике A(f) ЛС-ФВЧ

Варианты	Фильтр Баттерворта				Варианты	Фильтр Чебышева			
	$f_s$ , кГц	$\Delta A$ , дБ	$f_1$ , кГц	$A_s$ , дБ		$f_s$ , кГц	$\Delta A$ , дБ	$f_1$ , кГц	$A_s$ , дБ
01 и 26	1	0,5	1,75	15	51 и 76	1	0,5	1,75	14
02 и 27	2	0,5	3,5	20	52 и 77	2	0,5	4,0	18
03 и 28	3	0,5	6,0	30	53 и 78	3	0,5	6,0	32
04 и 29	0,5	0,5	1,0	25	54 и 79	0,5	0,5	1,25	25
05 и 30	0,3	0,5	0,6	15	55 и 80	0,3	0,5	0,7	20
06 и 31	1	0,5	2,5	30	56 и 81	1	1,0	1,5	23
07 и 32	2	1	5,0	25	57 и 82	2	1,0	3,0	25
08 и 33	3	1	7,5	20	58 и 83	3	1,0	5,0	16
09 и 34	0,5	1	1,0	25	59 и 84	0,5	1,0	0,8	26
10 и 35	0,3	1	0,6	15	60 и 85	0,3	1,0	0,5	30
11 и 36	1	1	1,5	15	61 и 86	1	1,0	1,75	30
12 и 37	2	1	3,2	15	62 и 87	2	1,0	4,0	36
13 и 38	3	2	4,8	20	63 и 88	3	1,0	6,0	20
14 и 39	0,5	2	0,9	20	64 и 89	0,5	1,0	1,25	25
15 и 40	0,3	2	0,54	25	65 и 90	0,3	1,0	0,75	25
16 и 41	1	2	2,0	25	66 и 91	1	2,0	1,5	15
17 и 42	2	2	4,0	20	67 и 92	2	2,0	3,0	13
18 и 43	3	2	7,5	30	68 и 93	3	2,0	4,8	30
19 и 44	0,5	3	1,25	25	69 и 94	0,5	2,0	0,8	18
20 и 45	0,3	3	0,68	20	70 и 95	0,3	2,0	0,5	20
21 и 46	1	3	1,5	20	71 и 96	1	2,0	1,75	35
22 и 47	2	3	4,0	15	72 и 97	2	2,0	4,0	40
23 и 48	3	3	4,8	15	73 и 98	3	2,0	6,0	20
24 и 49	0,5	3	0,8	20	74 и 99	0,5	3,0	1,25	23
25 и 50	0,3	3	0,54	25	75 и 100	0,3	3,0	0,75	25

Таблица 2

Требования к частотной характеристике ослабления  $A(f)$  LC-ПФ

Вари- анты	Фильтр Чебышева							Вари- анты	Фильтр Баттерворта						
	$f_{-1}$ , кГц	$f_1$ , кГц	$\Delta f$ , кГц	$f_0$ , кГц	$f_{S2}$ , кГц	$A_{S2}$ , дБ	$\Delta A$ , дБ		$f_{-1}$ , кГц	$f_1$ , кГц	$\Delta f$ , кГц	$f_0$ , кГц	$f_{S2}$ , кГц	$A_{S2}$ , дБ	$\Delta A$ , дБ
01 и 26	8	12,5	-	-	16	16	0,5	51 и 76	10	14,4	-	-	16	14	1
02 и 27	-	12,5	-	10	16	20	0,5	52 и 77	10	-	4,4	-	16	13	1
03 и 28	8	-	4,5	-	16	36	0,5	53 и 78	-	14,4	-	12	16	12	1
04 и 29	10	14,4	-	-	16	26	0,5	54 и 79	10	14,4	-	-	16	12	0,5
05 и 30	10	-	-	12	16	22	0,5	55 и 80	10	-	4,4	-	16	13	0,5
06 и 31	10	-	4,4	-	16	28	0,5	56 и 81	-	14,4	-	12	16	14	0,5
07 и 32	9	16	-	-	18	20	0,5	57 и 82	10	-	4,4	-	16	13	2
08 и 33	-	16	-	12	18	22	0,5	58 и 83	-	14,4	-	12	16	15	2
09 и 34	8	12,5	-	-	16	18	1	59 и 84	8	12,5	-	-	18	15	0,5
10 и 35	-	12,5	-	10	16	22	1	60 и 85	8	-	4,5	-	18	19	0,5
11 и 36	10	14,4	-	-	16	26	1	61 и 86	-	12,5	-	10	18	19	1
12 и 37	-	16	-	12	20	36	1	62 и 87	8	12,5	-	-	18	22	1
13 и 38	9	16	-	-	20	32	1	63 и 88	8	12,5	-	-	18	22	2
14 и 39	9	-	-	12	20	40	1	64 и 89	-	12,5	-	10	18	28	2
15 и 40	9	-	7	-	20	35	2	65 и 90	8	12,5	-	-	18	28	3
16 и 41	8	12,5	-	-	16	20	2	66 и 91	9	16	-	-	20	20	0,5
17 и 42	8	-	4,5	-	16	24	2	67 и 92	9	16	-	-	20	20	1
18 и 43	-	12,5	-	10	16	28	2	68 и 93	9	16	-	-	20	20	2
19 и 44	9	16	-	-	18	28	2	69 и 94	9	16	-	-	20	20	3
20 и 45	16	25	-	-	30	22	2	70 и 95	9	-	12	-	20	20	0,5
21 и 46	-	25	-	20	30	20	2	71 и 96	16	25	-	-	30	25	0,5
22 и 47	16	-	-	20	30	36	2	72 и 97	16	25	-	-	30	25	1
23 и 48	8	12,5	-	-	16	25	3	73 и 98	-	25	-	20	30	25	2
24 и 49	9	16	-	-	20	22	3	74 и 99	16	-	20	-	30	22	2
25 и 50	10	14,4	-	-	16	25	0,5	75 и 100	16	25	-	-	30	23	3

Требования к частотной характеристике ослабления  $A(f)$  ARC-ФНЧ

Варианты	Фильтр Чебышева				Варианты	Фильтр Баттерворта			
	$f_s$ , Гц	$\Delta A$ , дБ	$f_l$ , Гц	$A_s$ , дБ		$f_s$ , Гц	$\Delta A$ , дБ	$f_l$ , Гц	$A_s$ , дБ
01 и 51	70	0,25	30	17	26 и 76	240	2	120	15
02 и 52	230	0,25	100	20	27 и 77	150	3	75	14
03 и 53	80	0,5	40	18	28 и 78	120	3	60	16
04 и 54	110	0,5	50	16	29 и 79	300	3	150	15
05 и 55	90	0,5	40	15	30 и 80	160	2	80	13
06 и 56	180	1	100	20	31 и 81	90	2	50	15
07 и 57	200	1	100	18	32 и 82	180	3	90	14
08 и 58	200	1	80	16	33 и 83	120	2	60	18
09 и 59	140	1	50	13	34 и 84	100	2	40	15
10 и 60	90	1	40	15	35 и 85	180	1	100	13
11 и 61	90	1	30	22	36 и 86	100	2	40	13
12 и 62	360	2	200	20	37 и 87	150	3	70	15
13 и 63	110	2	50	22	38 и 88	140	0,5	60	18
14 и 64	100	2	40	19	39 и 89	120	0,5	50	16
15 и 65	200	3	100	25	40 и 90	90	0,5	40	14
16 и 66	150	3	60	30	41 и 91	100	3	50	14
17 и 67	100	3	50	23	42 и 92	100	3	40	15
18 и 68	100	3	40	20	43 и 93	70	3	30	17
19 и 69	140	3	70	19	44 и 94	110	2	50	14
20 и 70	120	3	60	15	45 и 95	110	2	60	16
21 и 71	160	0,1	80	16	46 и 96	140	1	70	13
22 и 72	120	0,1	50	17	47 и 97	140	1	60	14
23 и 73	100	0,1	60	14	48 и 98	140	1	50	12
24 и 74	100	0,1	40	18	49 и 99	200	3	100	13
25 и 75	90	0,1	30	14	50 и 100	130	3	60	15

## 2. Методические указания к расчету фильтров

### 2.1. Основы теории фильтров

**Электрические фильтры (ЭФ)** - это линейные четырехполюсники, обладающие избирательными свойствами. Они предназначены для выделения из состава сложного электрического колебания, подведенного к его входу, частотных составляющих определенного спектра частот в заданной полосе частот с небольшим ослаблением (полоса пропускания - ПП) и подавления тех составляющих, которые расположены в других, также заданных полосах частот (полоса задерживания - ПЗ).

#### 2.1.1. Частотная классификация фильтров

Вся область частот от  $f = 0$  до  $f = \infty$  подразделяется на: а) области, где ослабление не превышает некоторое заданное значение ослабления  $\Delta A$  (полосы пропускания - ПП); б) области, где ослабление не менее некоторого заданного значения  $A_s$  (полосы задерживания - ПЗ); в) переходные области (ПО) между ПП и ПЗ, где требования к частотной характеристике ослабления не задаются.

По взаимному расположению ПП и ПЗ различают 4 типа фильтров: а) фильтры нижних частот (ФНЧ); б) фильтры верхних частот (ФВЧ); в) полосовые фильтры (ПФ); г) режекторные фильтры (РФ). Амплитудно-частотные передаточные характеристики идеальных фильтров приведены на рис. 1 (а - ФНЧ, б - ФВЧ, в - ПФ, г - РФ). Требования по ослаблению для всех четырех типов фильтров показаны на рис. 2.

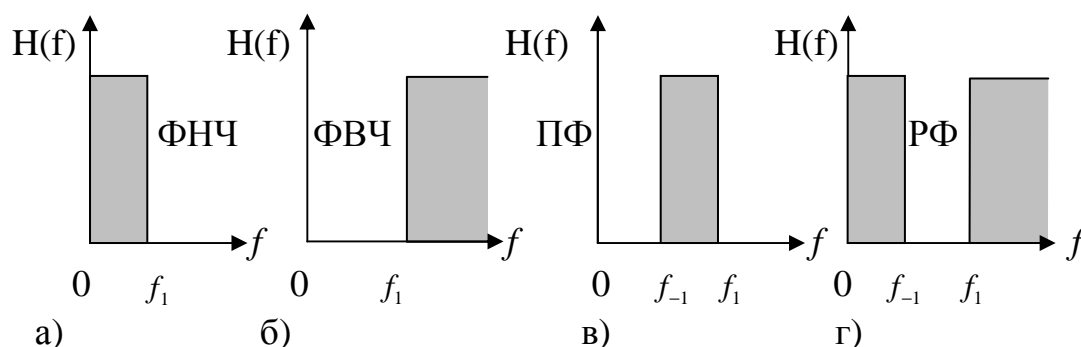


Рис. 1. Амплитудно-частотные передаточные характеристики идеальных фильтров

На этих рисунках  $f_1$  и  $f_{-1}$  - граничные частоты полос пропускания,  $f_{S1}$  и  $f_{-S1}$  - граничные частоты ПЗ,  $\Delta A$  - неравномерность характеристики ослабления фильтра в ПП.

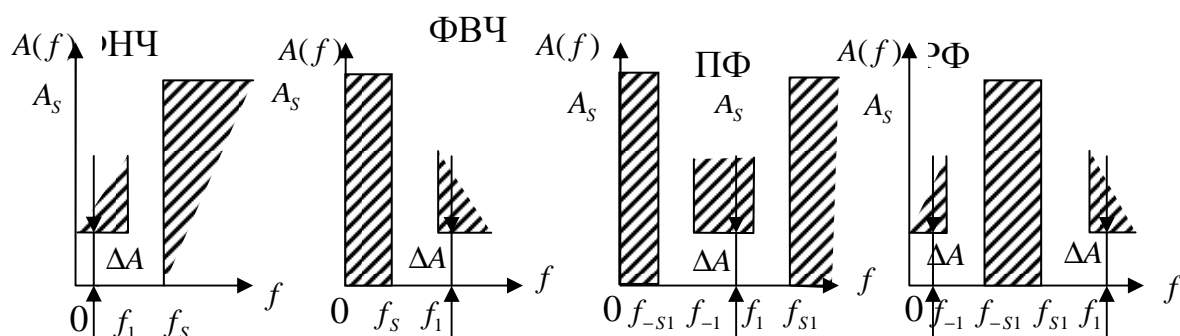


Рис. 2. Частотные характеристики ослабления идеальных фильтров

### 2.1.2. Нагрузка фильтров

Фильтры могут быть нагружены двухсторонне (рис. 3 а) и односторонне (рис. 3 б,в).

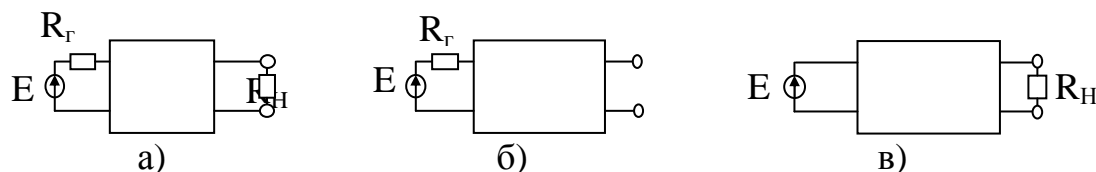


Рис. 3. Виды нагрузок фильтров

Операторная передаточная функция для схемы (рис.3,а) определяется вы-

$$H(p) = \frac{2U_2(p)}{E(p)} \sqrt{\frac{R_r}{R_H}} \quad (1,a)$$

ражением

$$\text{Для схем рис.3,б,в} \quad H(p) = \frac{U_2(p)}{E(p)}. \quad (1,б)$$

Ослабление фильтра для всех трех схем вычисляется по формуле

$$A = -20 \lg |H(p)|_{p=j\omega} \quad (2)$$

### 2.1.3. Нормирование

При синтезе фильтров широко используется нормирование по сопротивлению и частоте :

$s = p/\omega_0$  - нормированная комплексная частота;

$\hat{Z}(p) = Z(p)/R_0$  – нормированное сопротивление;

$\Omega = \omega / \omega_0$  – нормированная вещественная частота.

Нормирование по сопротивлению и частоте

$$\hat{Z}(\hat{p}) = Z(\hat{p})/R_0 \quad (3)$$

В этих формулах  $R_0$  и  $\omega_0$  - нормирующие сопротивление и частота.

ФПНЧ - это фильтр-прототип нижних частот с нормированными значениями сопротивления и частоты, равными единице.

Нормированные сопротивления  $r$ , индуктивности  $l$ , емкости  $c$  вычисляются по формулам

$$r = \frac{R}{R_0}; \quad l = \frac{2\pi f_0 L_0}{R_0}; \quad c = 2\pi f_0 C R_0. \quad (4)$$

### 2.1.4. Денормирование

Денормирование - это переход от нормированных величин к действительным (номинальным). Коэффициенты денормирования сопротивлений, индуктивностей и емкостей определяются по формулам

$$k_R = R_0; k_L = \frac{R_0}{2\pi f_0}; k_C = \frac{1}{2\pi f_0 R_0}. \quad (5)$$

Действительные номинальные сопротивления, индуктивности и емкости вычисляются через коэффициенты денормирования по формулам

$$R = r \cdot R_0; L = l \cdot k_L; C = c \cdot k_C. \quad (6)$$

### 2.1.5. Полиномиальные фильтры

Это такие фильтры, операторная передаточная функция которых определяется выражением

$$H(p) = \frac{b_0}{V(p)}, \quad (7)$$

здесь  $V(p)$  - полином Гурвица порядка  $n$ , постоянный множитель  $b_0$  определяет величину ослабления ФНЧП на частоте  $\Omega=0$ .

По расположению полос частот пропускания (ПП) и задерживания (ПЗ) фильтры разделяются на ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ.

**Ослабление полиномиального фильтра** (т.е. его АЧХ) является четной функцией нормированной частоты вида

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg (A_0 \Omega^{2n} + A_1 \Omega^{2n-1} + \dots + A_n) = 10 \lg f(\Omega^2)$$

Здесь  $|H(j\Omega)|$  - модуль передаточной функции фильтра.

Если  $A_{n-1}=A_{n-2}=\dots=A_1=0$ , а  $A_0=A_n=1$ , то

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg (1 + A_0 \Omega^{2n}) \quad (8)$$

где  $\Omega = f/f_1$ .

#### 2.1.5.1. Фильтры Баттерворта

Для полиномиальных фильтров с характеристикой Баттерворта принято частоту  $\omega$  нормировать по частоте  $\omega_c$ , при которой  $|H(j\omega)|$  уменьшается до  $1/\sqrt{2} = 0,707$  относительно максимального значения  $H(0)=1$ , т.е. когда ослабление составляет 3 дБ. При этом  $A_0=1$  и

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg (1 + \Omega^{2n}). \quad (9)$$

Такие фильтры называются фильтрами с максимально плоской характеристикой ослабления в ПП или **фильтрами с характеристиками Баттерворта**.

Передаточные функции этих фильтров определяются по формуле

$$|H(j\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^{2n}}} \quad (10)$$

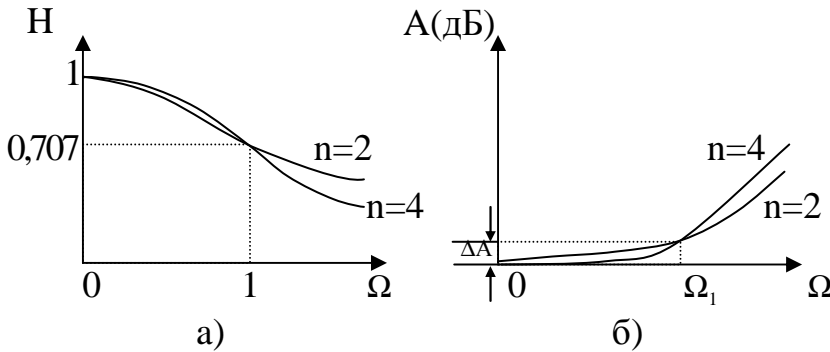


Рис.4. Зависимость модуля передаточной функции  $H(\Omega)$  и ослабления  $A(\Omega)$  от порядка фильтра Баттерворта

На рис.4а приведены графики частотной зависимости модуля передаточной функции  $|H(j\Omega)|$  таких фильтров для двух значений  $n$  при ослаблении на границе полосы пропускания  $\Delta A = 3$  дБ на уровне  $\Omega = 1$ , а на рис.4,б - кривые ослабления для тех же  $n$ .

Ослабление в этом случае определяется по формуле (9).

Если по условиям задачи ослабление в ПП на его граничной частоте  $f_1$  не должно превышать некоторой величины  $\Delta A$ , не равной 3 дБ, то нормирующая частота  $f_c$  вычисляется по формуле

$$f_c = f_1 / \sqrt[n]{10^{0,1\Delta A} - 1}, \quad \text{для ФНЧ} \quad (11,а)$$

$$f_c = f_1 \cdot \sqrt[n]{10^{0,1\Delta A} - 1}, \quad \text{для ФВЧ} \quad (11,б)$$

а ослабление рассчитывается по формуле

$$A = 10 \lg [1 + (10^{0,1\Delta A} - 1) \cdot \Omega^{2n}]. \quad (12)$$

Передаточная функция ФНЧ Баттерворта в нормированных величинах имеет вид

$$H(s) = \frac{b_0}{V(s)}, \quad (13)$$

где  $V(s) = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n$  – полином Гурвица, а  $s = p/\omega_c$ .

Нули полинома Баттерворта рассчитывают по формулам

$$\text{при } n - \text{четных } s_k = \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right) + j \sin\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right); \quad (13,а)$$

$$\text{при } n - \text{нечетных } s_k = \cos\left(\frac{\pi k}{n}\right) + j \sin\left(\frac{\pi k}{n}\right). \quad (13,6)$$

В этих формулах  $k = 1, 2, \dots, 2n$ . Из этих  $2n$  значений надо выбрать те  $n$  значений, которые для  $s_k$  имеют отрицательные вещественные части. Произведение сомножителей  $(s - s_k)$ , соответствующих всем  $s_k$  с отрицательными вещественными частями, образует полином

$$V(s) = \prod_{k=1}^n (s - s_k). \quad (14)$$

**2.1.5.2. Фильтры Чебышева** имеют равномерно-колебательную характеристику в ПП и монотонное возрастание в ПЗ. Для таких фильтров квадрат модуля передаточной функции

$$|H(j\Omega)|^2 = \frac{1}{[1 + (e^{2\Delta A} - 1)T_n^2(\Omega)]}, \quad (15)$$

где  $T_n(\Omega) = \cos(n \operatorname{Ar} \cos \Omega) = \operatorname{ch}(n \operatorname{Arch} \Omega)$  – полином Чебышева степени  $n$ , он является четным или нечетным.

Передаточная функция ФНЧ Чебышева имеет вид

$$H(s) = \frac{1}{2^{n-1} \sqrt{10^{0,1\Delta A} - 1} \cdot (s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n)} \quad (16)$$

Здесь произведение всех  $\prod_{k=1}^n (s - s_k)$  также полином Гурвица.

Полюсы передаточной функции фильтра Чебышева, расположенные в левой полуплоскости, рассчитываются по формулам

Оптимальные свойства чебышевской аппроксимации заключаются в том,

$$\left. \begin{aligned} s_k &= -\gamma \sin \frac{2k-1}{2^n} + j\beta \cos \frac{2k-1}{2n} \pi, \\ \text{где } \gamma &= \frac{1}{2} \left( E - \frac{1}{E} \right), \quad \beta = \frac{1}{2} \left( E + \frac{1}{E} \right), \\ E &= \sqrt[n]{\frac{10^{0,05\Delta A} + 1}{10^{0,05\Delta A} - 1}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

что из всех передаточных функций, все полюсы которых лежат в бесконечности, функция Чебышева имеет наименьшую сложность при заданной неравномерности в полосе пропускания и наибольшую крутизну ослабления при переходе к ПЗ.

Фильтры Чебышева целесообразно использовать в тех случаях, когда наиболее важным является равномерное прохождение частот во всей полосе пропускания. Однако эти фильтры обладают существенной нелинейной фазовой характеристикой, а, следовательно, и непостоянным временем задержки.

Зависимости модуля передаточной функции от нормированной частоты для фильтра Чебышева для  $n$  нечетного и четного приведены на рис. 5.

Ослабление фильтра Чебышева определяют по формуле

$$A = 10 \lg [1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)] = 10 \lg [1 + (10^{0,1\Delta A} - 1) T_n^2(\Omega)], \quad (18)$$

где  $T_n(\Omega) = ch(n \cdot \text{Arcch } \Omega)$  - полином Чебышева степени  $n$ ,

$\varepsilon$  – коэффициент неравномерности, который связан с  $\rho$ -коэффициентом отражения на границе полосы пропускания соотношением

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \rho^2}} = \sqrt{10^{0,1 \Delta A} - 1} \quad (19)$$

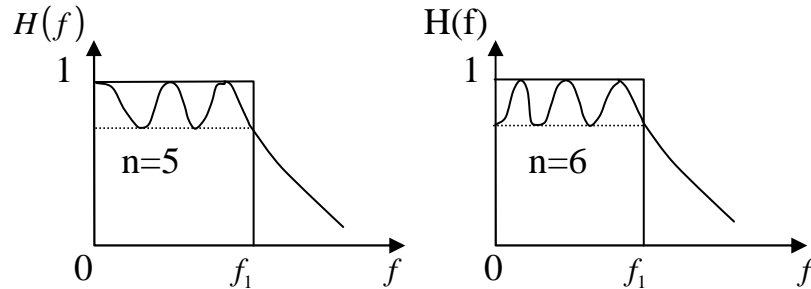


Рис. 5. Зависимость модуля передаточной функции от порядка фильтра

Так, например, для  $\rho = 0,1$   $\Delta A = 0,044$ дБ; для  $\rho = 0,15$   $\Delta A = 0,099$ дБ.

На рис. 6,а,б приведены соответствующие кривые ослабления ФНЧ для  $n$  нечетного и четного; на рис. 6в - для ПФ при  $n = 3$ .

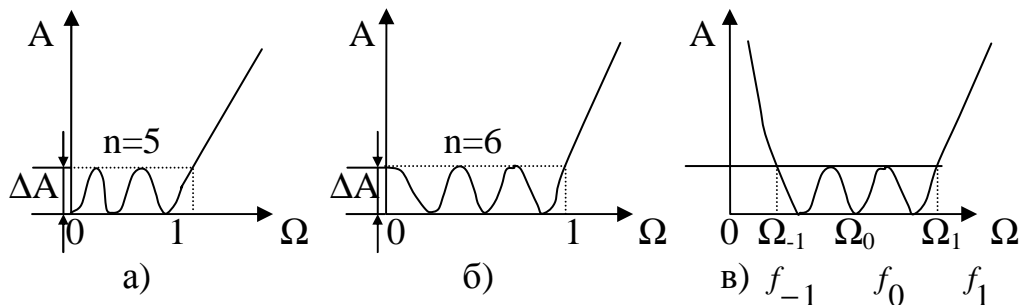


Рис. 6. Кривые ослабления для четного и нечетного порядков фильтра

## 2.2. Порядок расчета полиномиальных ЛС-фильтров табличным методом

**1. Определяется нормированная граничная частота  $\Omega_s$  ПЗ ФНЧП, т.е. исходные данные рассчитываемого фильтра преобразуются в низкочастотный прототип в соответствии с формулами табл. 4.**

Таблица 4

Определение нормированной граничной частоты ПЗ ФНЧП

Тип фильтра	ФНЧ	ФВЧ	ПФ	РФ
$\Omega_s$	$\frac{f_s}{f_1}$	$\frac{f_1}{f_s}$	$k \left( \frac{f_s}{f_0} - \frac{f_0}{f_s} \right)$	$\frac{1}{k \left( \frac{f_s}{f_0} - \frac{f_0}{f_s} \right)}$

В таблице 4 обозначены:

$f_1$  – граничные частоты ПП ФНЧ и ФВЧ;

$f_1$  и  $f_{-1}$  – граничные частоты ПП ПФ и РФ;

$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_{-1}} = \sqrt{f_{s1} \cdot f_{s2}}$  - среднегеометрическая частота ПФ и РФ; (20)

$$k = \frac{f_0}{f_1 - f_{-1}} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad - \text{коэффициент преобразования ширины ПП ПФ и РФ в}$$

ФНЧП; (21)

$$\Delta f = f_1 - f_{-1} \quad - \text{ширина ПП ПФ и РФ.} \quad (22)$$

## 2. Определяется порядок $n$ ФНЧП по одной из следующих формул:

а) для фильтра с плоской характеристикой в ПП (фильтра Баттерворта)

б) для фильтра с равномерно-колебательной характеристикой в ПП

$$n \geq \frac{A_s - 10 \lg(10^{0,1\Delta A} - 1)}{20 \lg \Omega_s} \quad (23)$$

(фильтр Чебышева) по одной из формул

$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1A_s} - 1}{10^{0,1\Delta A} - 1}}}{\text{Arch} \Omega_s} = \frac{A_s + 6 - 10 \lg(10^{0,1\Delta A} - 1)}{20 \lg(\Omega_s + \sqrt{\Omega_s^2 - 1})} \quad (24)$$

здесь  $\Delta A$  – максимально допустимое ослабление в ПП,

$A_s$  – минимально допустимое ослабление в ПЗ.

Гиперболический арка-косинус  $\text{Arch} \Omega_s$  при  $\Omega_s > 1$  вычисляется по формуле

Значения  $n$ , полученные по этим формулам, должны быть округлены до ближайшего большего целого числа.

$$\text{Arch} \Omega_s = \ln(\Omega_s + \sqrt{\Omega_s^2 - 1}) \quad (25)$$

**3. По известному порядку  $n$**  по табл. П2.1 и рис. 7 определяются схема и параметры элементов ФНЧП Баттерворта; по значениям  $n$  и  $\Delta A$  по табл.П2.2 и рис. 7 определяются схема и параметры элементов ФНЧП Чебышева. Обычно выбирается схема, содержащая меньшее количество индуктивных элементов.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** В табл.П2.2 для ФНЧП Чебышева приведены значения параметров только для нечетных значений  $n$ , в ней нет соответствующих значений для четных  $n$ . Это объясняется тем, что для этих случаев при  $r_\Gamma = r_H$  и всех значений неравномерности  $\Delta A$  диапазон значений элементов слишком велик, чтобы фильтр можно было физически осуществить.

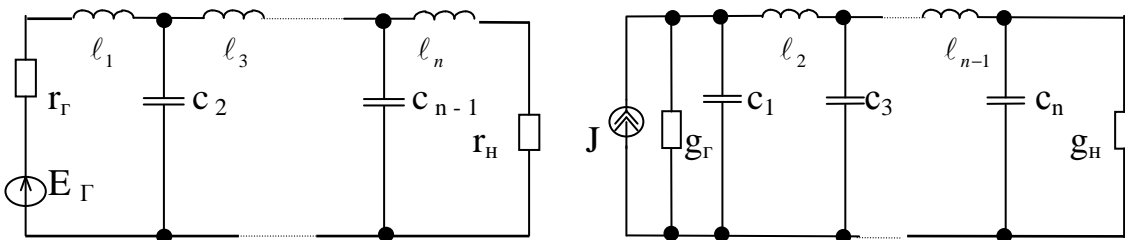




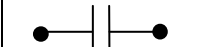
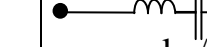
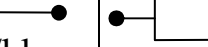
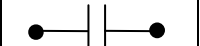
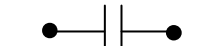

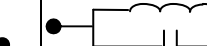

Рис. 7. Схемы ФНЧ - прототипа

4. Определяются по формуле (5) коэффициенты денормирования. Для ФНЧ и ФВЧ  $f_0 = f_1$ .

5. В соответствии с табл. 5 осуществляется преобразование нормированных элементов ФНЧП в элементы рассчитываемого фильтра.

Таблица 5

Преобразование схемы ФНЧ-прототипа в схему проектируемого фильтра.

ФНЧП	ФНЧ	ФВЧ	ПФ	РФ
$\ell_i$ 	$\ell_i k_L$ 	$k_C / \ell_i$ 	$k_L k \ell_i$  $k_C / k \ell_i$	$k_L \ell_i / k$  $k_C k / \ell_i$
$c_i$ 	$k_C c_i$ 	$k_L / c_i$ 	$k_L / k c_i$  $k_C k c_i$	$k_L k / c_i$  $k_C c_i / k$
№ формулы	(26,а)	(26,б)	(26,в)	(26,г)

В формулах (26,в,г)  $k$  определяется по формуле (21). Из табл. 5 видно, что преобразование ФНЧП в ФВЧ состоит в замене нормированных элементов обратными, т.е.  $\Omega_B = 1/\Omega_H$ . Отсюда вытекает связь между любой частотой  $f_H$  ФНЧ и соответствующей частотой  $f_B$  ФВЧ

$$f_H \cdot f_B = f_1^2, \quad (26)$$

где  $f_1$  - граничная частота ПП ФВЧ (см. примеры расчета  $LC$  ФВЧ).

Преобразование ФНЧП в ПФ основано на симметричном преобразовании частоты, при этом индуктивные элементы преобразуются в последовательное соединение индуктивности и емкости, а емкостные - в параллельное соединение индуктивности и емкости. При преобразовании ФНЧП в РФ происходит замена индуктивности параллельным соединением индуктивности и емкости, а емкости - последовательным соединением индуктивности и емкости (см. примеры расчета  $LC$  полосовых фильтров).

Для определения любой частоты  $f_i$  ФНЧП по заданным частотам  $f_{i1}$  и  $f_{i2}$  полосового фильтра используется следующая формула

$$f_i = f_{i2} - f_{-i1}. \quad (27)$$

Для обратного перехода от ФНЧП к ПФ существуют формулы

$$f_{i2} = \frac{f_i}{2} + \sqrt{f_0^2 + \left(\frac{f_i}{2}\right)^2},$$

$$f_{i2} = \frac{f_0^2}{f_{i2}}. \quad (28)$$

### 2.3. Полиномиальные ARC-фильтры на базе ИНУН

В устройствах техники связи наряду с пассивными LC-фильтрами используются активные RC(ARC)-фильтры. Это такие фильтры, которые содержат пассивные (резисторы и конденсаторы) и активные элементы (транзисторы, операционные усилители (ОУ))

В ряде случаев разработчику приходится отказываться от пассивных LC-фильтров из-за больших размеров катушек индуктивности и связанную с этим невозможность микроминиатюризации.

Тенденция к микроминиатюризации аппаратуры связи привела к широкому использованию ARC-фильтров, в которых используются известные преимущества технологии гибридных и интегральных схем.

Из числа активных фильтров в курсовой работе рассматриваются ARC-фильтры, выполненные на базе источников напряжения, управляемых напряжением (ИНУН) с конечным коэффициентом усиления, построенные на базе ОУ. Достоинством ARC-фильтров, построенных на базе ИНУН с ограниченным коэффициентом усиления, является их экономичность, достаточная стабильность при не слишком сложных требованиях, предъявляемых к избирательности, возможность получить фильтр с достаточно низкой частотой среза, что совершенно нереализуемо в пассивных LC-фильтрах из-за весьма больших значений индуктивностей..

### 2.4. Синтез ARC звена ФНЧ второго порядка

В качестве исходной рассмотрим ARC-цепь, представленную на рис. 8, у которой коэффициент усиления  $K > 0$  – неинвертирующий идеальный усилитель с высоким входным и малым выходным сопротивлением.

Найдем в операторной форме передаточную функцию цепи (рис. 8). Составим уравнение по методу узловых потенциалов (потенциал точки 1 равен нулю).

Узел а: 
$$\left( \frac{1}{R_2} + pC_2 \right) \cdot V_a(p) - \left( \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_b(p) = 0 \quad (26)$$

Узел в: 
$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_1 \right) \cdot V_b(p) - \left( \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_a(p) = U_{вых}(p) \cdot pC_1 + U_{вх}(p) \cdot \left( \frac{1}{R_1} \right) \quad (27)$$

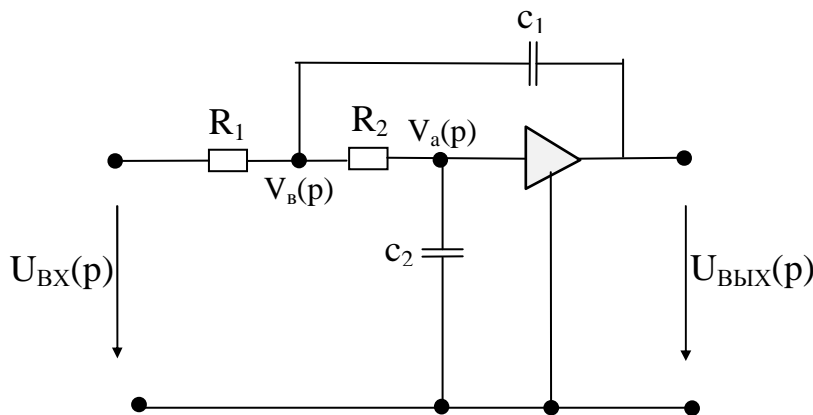


Рис. 8. Схема ARC-ФНЧ второго порядка

Коэффициент усиления  $k$  усилителя связан с его входным и выходным напряжениями соотношением

$$V_a(p) = \frac{U_{вых}(p)}{k}.$$

Подставляя выражение  $V_a(p)$  в (26) и (27) в результате совместного решения, получим выражение операторной передаточной функции

$$H(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{k}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 - k R_1 C_1) p + 1}. \quad (28)$$

Если обозначить

$$\beta_0 = 1; \quad \beta_1 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 - k R_1 C_1; \quad \beta_2 = R_1 R_2 C_1 C_2; \quad \alpha_0 = k, \quad (29)$$

то

$$H(p) = \frac{k}{\beta_2 p^2 + \beta_1 p + \beta_0}. \quad (30)$$

В ряде случаев формулу (28) удобно представить в ином виде, если вместо сопротивлений и емкостей ввести их отношение

$$m_R = \frac{R_1}{R_2}, \quad n_C = \frac{C_1}{C_2}.$$

Тогда

$$H(p) = \frac{k}{m_R n_C R_2^2 C_2^2 p^2 + R_2 C_2 (m_R n_C + 1 + m_R - k m_R n_C) p + 1}. \quad (32)$$

$$\text{При } R_1 = R_2 = R \text{ и } C_1 = C_2 = C, \quad m_R = 1 \text{ и } n_C = 1 \quad (33)$$

операторная передаточная функция равна

$$H(p) = \frac{k}{R^2 C^2 p^2 + R C (3 - k) p + 1}. \quad (34)$$

#### 2.4.1. Синтез ARC звена ФНЧ второго порядка по Баттерворту

Передаточная функция ФНЧ второго порядка с плоской характеристикой в нормированной форме имеет вид

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2} s + 1}. \quad (35,а)$$

Передаточная функция цепи (рис.8) второго порядка в операторной форме выражается формулой (28) или (32).

Для перехода от нормированных величин  $s$  к реальным  $p$  следует осуществить замену  $s = p / 2\pi f_c$ . Тогда формула (35) примет вид

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{p}{2\pi f_c}\right)^2 + \sqrt{2} \frac{1}{2\pi f_c} p + 1}. \quad (35,б)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях переменной  $p$  знаменателей функции (35) и (32), будем иметь систему уравнений:

$$m_R \cdot n_C \cdot R_2^2 \cdot C_2^2 = \left( \frac{1}{2\pi f_C} \right)^2, \quad (36,a)$$

или

$$\sqrt{m_R n_C} R_2 C_2 = \frac{1}{2\pi f_C}, \quad (36,b)$$

$$R_2 C_2 (m_R n_C + 1 + m_R - k m_R n_C) \sqrt{2} \frac{1}{2\pi f_C} \dots \quad (37)$$

Эта система содержит пять неизвестных  $R_2$ ,  $C_2$ ,  $m_R$ ,  $n_C$ ,  $k$ . Задавая значениями трех из них, находим  $R_2$  и  $k$ .

#### 2.4.2. Синтез ARC звена ФНЧ второго порядка по Чебышеву

Передаточная функция ФНЧ второго порядка ( $n=2$ ) с равноколебательной характеристикой зависит от ослабления  $\Delta A$  в полосе пропускания и полюсов ослабления передаточной функции. Последние зависят от  $\Delta A$  и порядка фильтра  $n$ . Передаточная функция по Чебышеву для  $n = 2$  в нормированных величинах имеет вид

$$H(s) = \frac{1}{2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(s - s_1)(s - s_2)}. \quad (38)$$

При  $n$  - четном  $s_1$  и  $s_2$  являются комплексно-сопряженными величинами  $s_{1,2} = -\delta \pm j\omega$  и передаточная функция будет иметь вид

$$H(s) = \frac{1}{2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(s + \delta + j\omega)(s + \delta - j\omega)} = \frac{1}{2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(s^2 + 2\delta s + \delta^2 + \omega^2)}. \quad (39)$$

Преобразуем выражение (39) так, чтобы свободный член в знаменателе был равен единице, и получим

$$H(s) = \frac{\left[ 2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(\delta^2 + \omega^2) \right]^{-1}}{\frac{1}{(\delta^2 + \omega^2)}s^2 + \frac{2\delta}{(\delta^2 + \omega^2)}s + 1}. \quad (40)$$

Заменив в (40)  $s$  на  $p/2\pi f_C$ , где для фильтра Чебышева  $f_C = f_\Gamma$ , и введя для сокращения обозначения

$$A = \frac{1}{(\delta^2 + \omega^2)} \frac{1}{4\pi^2}, \quad (41,a)$$

$$B = \frac{2\delta}{(\delta^2 + \omega^2)} \frac{1}{2\pi}, \quad (41,b)$$

$$D = \frac{1}{2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(\delta^2 + \omega^2)}, \quad (41,c)$$

получим передаточную функцию

$$H(S) = \frac{\left[2\sqrt{e^{2\Delta A} - 1}(\delta^2 + \omega^2)\right]^{-1}}{\frac{1}{(\delta^2 + \omega^2)}\left(\frac{1}{2\pi f_c}\right)^2 p^2 + \frac{2\delta}{(\delta^2 + \omega^2)}\frac{1}{2\pi f_c} p + 1} =$$

$$= \frac{D}{A\left(\frac{1}{f_c}\right)^2 p^2 + B\frac{1}{f_c} p + 1}. \quad (42)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $p$  знаменателей выражений (42) и (32), получим два компонентных уравнения

$$\sqrt{m_R n_C} R_2^2 C_2^2 = \frac{1}{\delta^2 + \omega^2} \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right)^2 = A \frac{1}{f_c^2}; \quad (43)$$

$$R_2 C_2 (m_R n_C + 1 + m - k m_R n_C) = \frac{2\delta}{\delta^2 + \omega^2} \frac{1}{2\pi f_c} = B \frac{1}{f_c}. \quad (44)$$

Эта система содержит пять неизвестных величин  $R_2$ ,  $C_2$ ,  $m_R$ ,  $n_C$ ,  $k$ , а уравнений имеется только два. Задаваясь тремя дополнительными условиями, находим остальные две неизвестные величины.

## 2.5. Каскадный синтез полиномиальных ARC ФНЧ высокого порядка на базе ИНУН

При реализации фильтров высокого порядка наибольшее применение имеют каскадно-развязанное соединение звеньев второго порядка. Такое соединение обеспечивается при весьма высоких входных и малых выходных сопротивлениях. Важным преимуществом каскадно-развязывающей реализации является возможность проводить независимую подстройку каждого звена фильтра. Кроме того, это почти всегда приводит к фильтрам структурам, обладающим меньшей чувствительностью к изменениям параметров по сравнению с фильтрами непосредственной реализации.

### Порядок расчетов фильтра

1. Определяется нормированная граничная частота ПЗ ФНЧП по формуле  $\Omega_s = f_s/f_1$ .

2. По формуле (23) для фильтра Баттерворта и по формуле (24) для фильтра Чебышева определяется порядок  $n$  ФНЧП.

3. Нормированная передаточная функция  $H(s)$  рассматривается в виде произведения передаточных функций отдельных звеньев второго и первого порядков. Если  $n$  - четное число, то фильтр состоит из  $k = n/2$  звеньев второго порядка. При  $n$  - нечетном в составе фильтра будет  $k = (n-1)/2$  звеньев второго порядка и одно звено первого порядка, которое обычно включают на выходе фильтра.

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) \dots H_k(s), \quad (45)$$

где  $H_k(s)$  - передаточные функции отдельных звеньев.

4. Определяются нормированные значения полюсов  $s_1, s_2, s_3 \dots s_n$  передаточных функций второго порядка:

- для фильтра Баттерворта по формуле (13,а) или (13,б);
- для фильтра Чебышева по формуле (17).

5. Для каждой пары комплексно-сопряженных полюсов  $s_k$  и  $s_k^*$  вычисляются выражения квадратного трехчлена

$$(s - s_k) \cdot (s - s_k^*) = s^2 + a_1 s + a_0 \quad (46)$$

и соответствующее выражение передаточной функции звена второго порядка

$$H_k(s) = \frac{1}{s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (47)$$

6. Путем замены  $s$  на  $p/2\pi f_c$  выполняется денормирование передаточной функции звена второго порядка

$$H_k(s) = \frac{1}{\left(\frac{p}{2\pi f_c}\right)^2 + a_1 \left(\frac{p}{2\pi f_c}\right) + a_0}. \quad (48)$$

7. Приравняются коэффициенты при одинаковых степенях переменного  $p$  знаменателей передаточных функций (28) или (33) и (48), соответствующей схеме рис. 8 ARC-фильтра. Эта система из двух уравнений содержит пять неизвестных. Это означает, что она не имеет однозначного решения. Для их определения обычно задаются дополнительные условия. С учетом этого вычисляют остальные неизвестные.

Если порядок фильтра  $n$  - нечетный, то схема будет содержать одно звено первого порядка. Для него передаточная функция будет иметь вид

$$H(p) = \frac{1}{(s - s_k)}. \quad (49)$$

Заменяя  $s$  на  $p/2\pi f_c$ , получим

$$H(s) = \frac{1}{\frac{1}{2\pi f_c} p - s_k} = \frac{2\pi f_c}{p - 2\pi f_c s_k}. \quad (50)$$

Схема звена ФНЧ первого порядка реализуется пассивной RC цепью (рис. 9). Ее передаточная функция равна

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{\frac{1}{pC}}{\left(R + \frac{1}{pC}\right)} = \frac{1}{RCp + 1}. \quad (51)$$

Сравнивая свободные члены знаменателей в (50) и (51), получаем значения

$$RC = \frac{-1}{2\pi f_c s_k}.$$

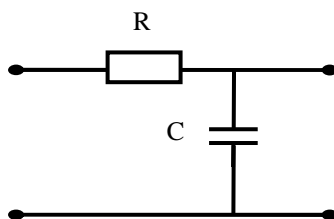


Рис. 9. Схема звена ФНЧ первого порядка.

### 3. Примеры расчетов электрических фильтров

#### 3.1. Расчет ФВЧ Баттерворта

Рассчитать с использованием таблиц фильтр верхних частот Баттерворта, нагруженный двухсторонне по данным: граничная частота ПП  $f_1 = 60$  Гц, неравномерность характеристики ослабления в ПП не должна превышать  $\Delta A = 2$  дБ, а при частотах  $0 \leq f \leq f_s = 30$  Гц ослабление фильтра должно быть не менее  $A_s = 15$  дБ,  $R_\Gamma = R_H = R = 75$  Ом. Определить ослабление фильтра на частотах:  $0,2 f_s$ ;  $0,5 f_s$ ;  $f_s$ ;  $f_0$ ;  $f_1$ .

#### Решение

Вычисляем нормированную граничную частоту полосы задерживания ФНЧП  $\Omega_s = f_1/f_s = 60/30 = 2$ . По формуле (23) или по программе Excel (см. приложение П.2.3.1) определяем порядок ФНЧП

$$n \geq \frac{15 - 10 \lg(10^{0,2} - 1)}{20 \lg 2} = \frac{17,329}{6,02} = 2,878.$$

Округляем полученный результат до большего целого числа. Принимаем  $n=3$ . По найденному значению порядка фильтра  $n = 3$  по табл. П.1.1 определяем нормированные значения параметров элементов ФНЧП

$$c_1 \cdot (l'_1) = 1; l_2 \cdot (c'_2) = 2; c_3(l'_3) = 1.$$

Схемы ФНЧ прототипа при  $n = 3$  приведены на рис.10.

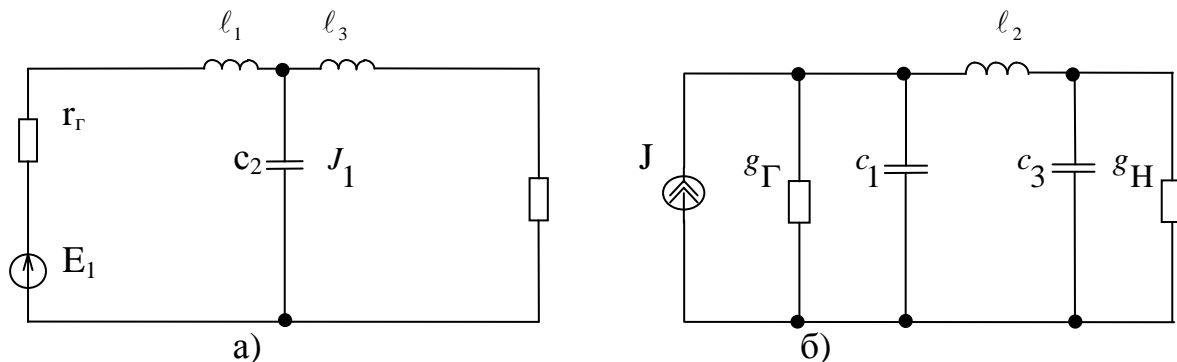


Рис. 10. Схемы ФНЧ прототипа при  $n=3$

Выберем для дальнейшего расчета схему рис.10,а.

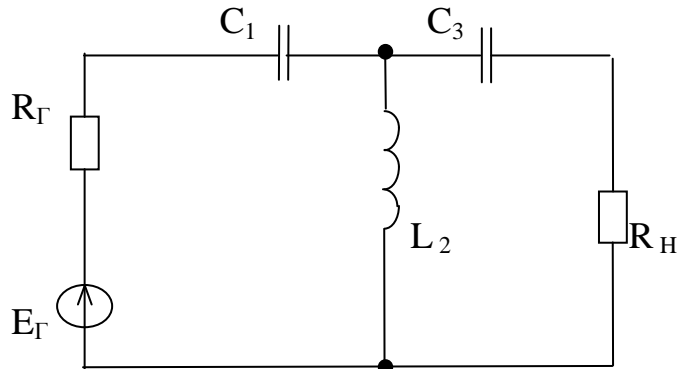


Рис. 11. Схема ФВЧ Баттерворта

Преобразуем полученную схему ФНЧП (рис.10,а) в схему требуемого ФВЧ (рис.11). Вычислим частоту, на которой ослабление фильтра равно 3 дБ.

$$f_c = f_1 \sqrt[2n]{10^{0,1\Delta A} - 1} = 60 \sqrt[6]{10^{0,2} - 1} = 54,8 \text{ Гц}$$

Определяем коэффициенты денормирования индуктивностей и емкостей

$$K_L = \frac{R}{2\pi f_1} = \frac{75}{6,28 \times 60} = 0,199 \text{ Гн},$$

$$K_C = \frac{1}{2\pi f_1 R} = \frac{1}{6,28 \times 60 \times 75} = 35,386 \times 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Рассчитаем номинальные значения элементов ФВЧ (табл. 5) по формулам

$$C_1 = C_3 = \frac{k_c}{\ell_1} = \frac{35,386 \times 10^{-6}}{1} = 35,386 \text{ мкФ},$$

$$L_2 = \frac{k_L}{c_2} = \frac{0,199}{2} = 0,0995 \text{ Гн} = 99,5 \text{ мГн}.$$

Расчет частотной характеристики ослабления  $A(f)$  проводим по формуле (9,а) или по программе Excel (см. приложение П.2.3, П.2.4)

Таблица 6

Результаты расчета  $A(f)$  LC ФВЧ Баттерворта порядка  $n=3$

$f$	$0,2 f_s$	$0,5 f_s$	$f_s$	$f_0$	$f_1$
$f$ , кГц	6	15	30	54.8	60
$\Omega = f_1/f$	10	4	2	1.1	1
$A$ , дБ	57,6	33,7	15,8	3	2

График зависимости ослабления от частоты  $A(f)$  приведен на рис.12.

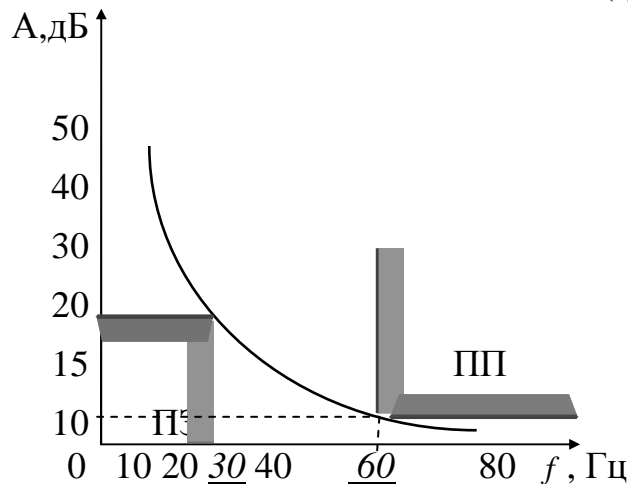


Рис. 12. Частотная характеристика ослабления ФВЧ

$$f_s = 30 \text{ Гц} \quad f_1 = 60 \text{ Гц}$$

Из графика рис. 12 и табл. 6 видно, что  $A(f_s) = 15,8 \text{ дБ} > A_s = 15 \text{ дБ}$ ,

$A(f_1) = 2 \text{ дБ} = \Delta A$ , что удовлетворяет заданным требованиям.

### 3.2. Расчет ФВЧ Чебышева

Рассчитать с использованием таблиц ФВЧ Чебышева, удовлетворяющий требованиям: граничная частота ПП  $f_1 = 5$  кГц, максимальное ослабление в этой полосе не должно превосходить  $\Delta A = 1$  дБ, а ослабление в ПЗ  $0 \leq f \leq f_s = 2,5$  кГц должно быть не менее  $A_s = 37$  дБ. Нагрузочные сопротивления:  $R_r = R_n = R = 75$  Ом. Рассчитать ослабление фильтра на частотах:  $0,2 f_s$ ;  $0,5 f_s$ ;  $f_s$ ;  $f_1$  и построить кривую ослабления  $A(f)$ .

#### Решение

Определяем нормированную граничную частоту ПЗ ФНЧП

$$\Omega_s = f_1 / f_s = 5 / 2,5 = 2.$$

По формуле (24) определяем порядок фильтра

$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1\Delta A} - 1}{10^{0,1\Delta A} - 1}}}{\text{Arch} \Omega_s} = \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{3,7} - 1}{10^{0,1} - 1}}}{\text{Arch} 2} = 4,27.$$

Так как порядок фильтра должен быть целым числом, округляем полученный результат до большего целого числа  $n = 5$ . По таблице П.1.2 определяем значения элементов ФНЧП при  $n = 5$  и  $\Delta A = 1$  дБ

$$c_1(\ell_1) = 2,135; c_3(\ell_3) = 3; c_5(\ell_5) = 2,135; \ell_2(c_2) = 1,091; \ell_4(c_4) = 1,091.$$

Схемы ФНЧП при  $n = 5$  приведены на рис. 13.

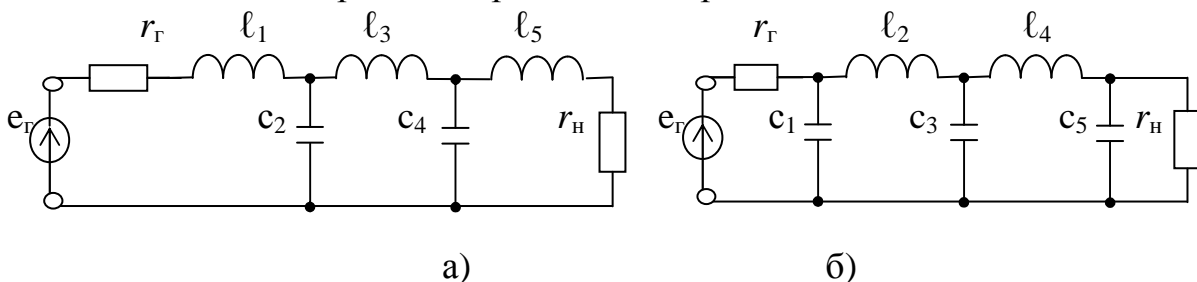


Рис. 13. Варианты схем ФНЧП Чебышева при  $n = 5$

Выберем для дальнейшего расчета схему рис.13,а. Преобразуем схему ФНЧП в схему ФВЧ путем замены индуктивного элемента емкостным, и наоборот (табл. 5).

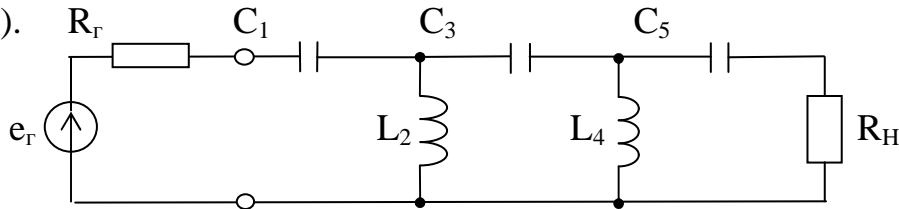


Рис. 14. Схема ФВЧ Чебышева при  $n = 5$

Определим коэффициенты денормирования индуктивностей и емкостей

$$k_L = \frac{R}{2\pi f_1} = \frac{75}{6,28 \cdot 5 \cdot 10^3} = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2,39 \text{ мГн},$$

$$k_c = \frac{1}{2\pi f_1 R} = \frac{1}{6,28 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 75} = 4,25 \cdot 10^{-7} \Phi = 0,425 \text{ мкФ.}$$

Рассчитаем номинальные значения элементов ФВЧ (табл. 5)

$$C_1 = C_5 = k_c / \ell_1 = 0,425 / 2,135 = 0,199 \text{ мкФ;}$$

$$L_2 = L_4 = k_L / c_2 = 2,39 / 1,091 = 2,19 \text{ мГн;}$$

$$C_3 = k_c / \ell_3 = 0,425 / 3 = 0,142 \text{ мкФ.}$$

Рассчитаем ослабление фильтра по формуле (18) . Результаты расчета сведем в табл. 7.

Таблица 7

$f$	$0,2 f_{s2}$	$0,5 f_{s2}$	$f_{s2}$	$f_1$
$f$ , кГц	0,5	1,25	2,5	5
$\Omega = f_1 / f$	10	4	2	1
А, Дб	118	77,7	45,3	1

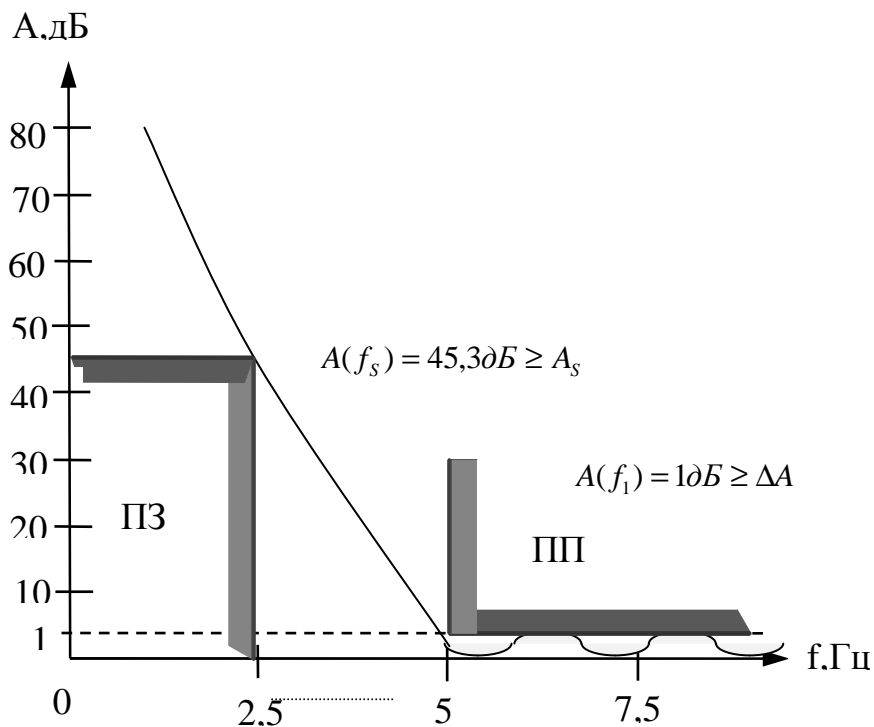


Рис. 15. График ослабления LC ФВЧ Чебышева

Для проверки правильности расчета фильтра сравним значения ослабления, рассчитанные и требуемые на частотах  $f_s$  и  $f_1$ .  $A(f_s) = 45,3 \text{ дБ} > A_s = 37 \text{ дБ}$ ;  $A(f_1) = 1 \text{ дБ} = \Delta A$ , что подтверждает правильность расчета.

### 3.3. Расчет ПФ Баттерворта

Рассчитать параметры симметричного двусторонне нагруженного LC ПФ Баттерворта по данным: граничные частоты ПП  $f_{-1} = 4$  кГц,  $f_1 = 9$  кГц, в этой полосе ослабление должно быть не более  $\Delta A = 3$  дБ, а на частоте  $f_{S2} = 12$  кГц ослабление должно быть не менее  $A_s = 20$  дБ. Сопротивление генератора и нагрузки фильтра  $R_r = R_n = R = 600$  Ом. Рассчитать ослабление фильтра при частотах  $f_{-1}$ ,  $f_1$ ,  $f_0$ ,  $f_{S1}$ ,  $f_{S2}$ ,  $1,5 f_{S2}$ ,  $2 f_{S2}$ . Начертить график зависимости  $A(f)$ .

#### Решение

Определяем среднюю геометрическую частоту ПФ

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_{-1}} = \sqrt{f_{S1} \cdot f_{S2}} = \sqrt{4 \cdot 9} = 6 \text{ кГц.}$$

Из этого выражения определяем нижнюю граничную частоту ПЗ

$$f_{S1} = \frac{f_0^2}{f_{S2}} = \frac{6^2}{12} = 3 \text{ кГц.}$$

Нормированная граничная частота ПЗ ФНЧП

$$\Omega_s = \frac{f_{S2} - f_{S1}}{f_1 - f_{-1}} = \frac{12 - 3}{9 - 4} = \frac{9}{5} = 1,8.$$

По формуле (23) определяем порядок ФНЧП

$$n \geq \frac{20 - 10 \lg(10^{0,3} - 1)}{20 \lg 1,8} = \frac{20}{5,1} = 3,92$$

Полученный результат округляем до большего целого  $n = 4$ . По таблице П.1.2 определяем нормированные значения элементов ФНЧП при  $n = 4$

$$c_1(\ell_1') = 0,7654; \ell_1(c_1') = 1,8478; c_3(\ell_3') = 1,8478; \ell_4(c_4') = 0,7654.$$

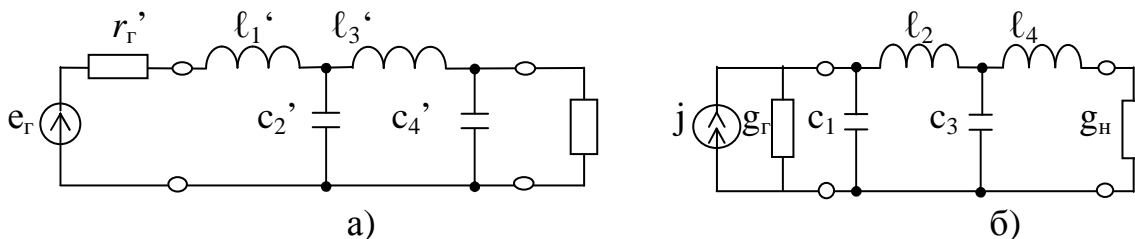


Рис. 16. Схемы ФНЧП при  $n = 4$

Выберем для дальнейшего расчета схему рис. 16,а. Преобразуем схему ФНЧП в схему ПФ, заменив каждую индуктивность на последовательный колебательный контур, а каждую емкость – на параллельный колебательный контур (табл. 5). В результате преобразования получим схему ПФ (рис. 17).

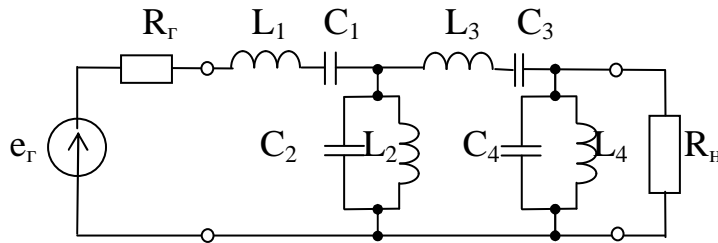


Рис. 17. Схема ПФ Баттерворта

Коэффициенты денормирования индуктивностей и емкостей равны

$$k_L = \frac{R}{2\pi f_0} = \frac{600}{6,28 \cdot 6 \cdot 10^3} = 15,915 \text{ мГн};$$

$$k_C = \frac{1}{2\pi f_0 R} = \frac{1}{6,28 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 600} = 4,42 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 44,2 \text{ нФ}.$$

Коэффициент преобразования ширины полосы пропускания ПФ в ФНЧП равен

$$k = \frac{f_0}{f_1 - f_{-1}} = \frac{6}{9 - 4} = \frac{9}{5} = 1,2.$$

По формулам табл.5 вычисляем номинальные значения параметров элементов ПФ

$$L_1 = k \cdot k_L \cdot \ell_1 = 1,2 \cdot 15,915 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7654 = 14,62 \text{ мГн};$$

$$C_1 = \frac{k_C}{k \cdot \ell_1} = \frac{4,42 \cdot 10^{-8}}{1,2 \cdot 0,7654} = 4,813 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 48,13 \text{ нФ};$$

$$L_2 = \frac{k_L}{k \cdot c_2} = \frac{15,915 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 1,8476} = 7,177 \text{ мГн};$$

$$C_2 = k \cdot k_C \cdot c_2 = 4,42 \cdot 10^{-8} \cdot 1,2 \cdot 1,8476 = 97,99 \text{ нФ};$$

$$L_3 = k \cdot k_L \cdot \ell_2 = 1,2 \cdot 15,915 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8476 = 35,285 \text{ мГн};$$

$$C_3 = \frac{k_C}{k \cdot \ell_3} = \frac{4,42 \cdot 10^{-8}}{1,2 \cdot 1,8476} = 19,93 \text{ нФ};$$

$$L_4 = \frac{k_L}{k \cdot c_4} = \frac{15,915 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 0,7654} = 17,33 \text{ мГн};$$

$$C_4 = k \cdot k_C \cdot c_4 = 1,2 \cdot 4,42 \cdot 10^{-8} \cdot 0,7654 = 40,6 \text{ нФ}.$$

При расчете ослабления ПФ следует иметь в виду, что его надо вести на соответствующих частотах ФНЧП. В табл.8 приведены пары частот  $f'$  и  $f''$  ПФ, связанные соотношением  $f_0 = \sqrt{f' \cdot f''}$ , и соответствующая им нормированная частота  $\Omega$  ФНЧП, определяемая по формуле  $\Omega = k(f/f_0 - f_0/f)$ . Расчет ослабления ведется по формуле (9,а). Расчёт  $A(f)$  существенно упрощается при использовании программы Excel (см. приложение П.2.4.4 и П.2.5) Результаты расчета сведены в табл. 8.

Таблица 8

$f$	$f_0$	$f_{-1}$ и $f_1$	$f_{S1}$ и $f_{S2}$	$f'$ и $1,5 f_{S2}$	$f''$ и $2 f_{S2}$
$f$ , кГц	6	4 и 9	3 и 12	2 и 18	1,5 и 24
$\Omega = f_1/f$	0	$\mp 1$	$\mp 1,8$	$\mp 3,4$	$\mp 4,5$
$A$ , дБ	0	3	20,44	42,5	52,24

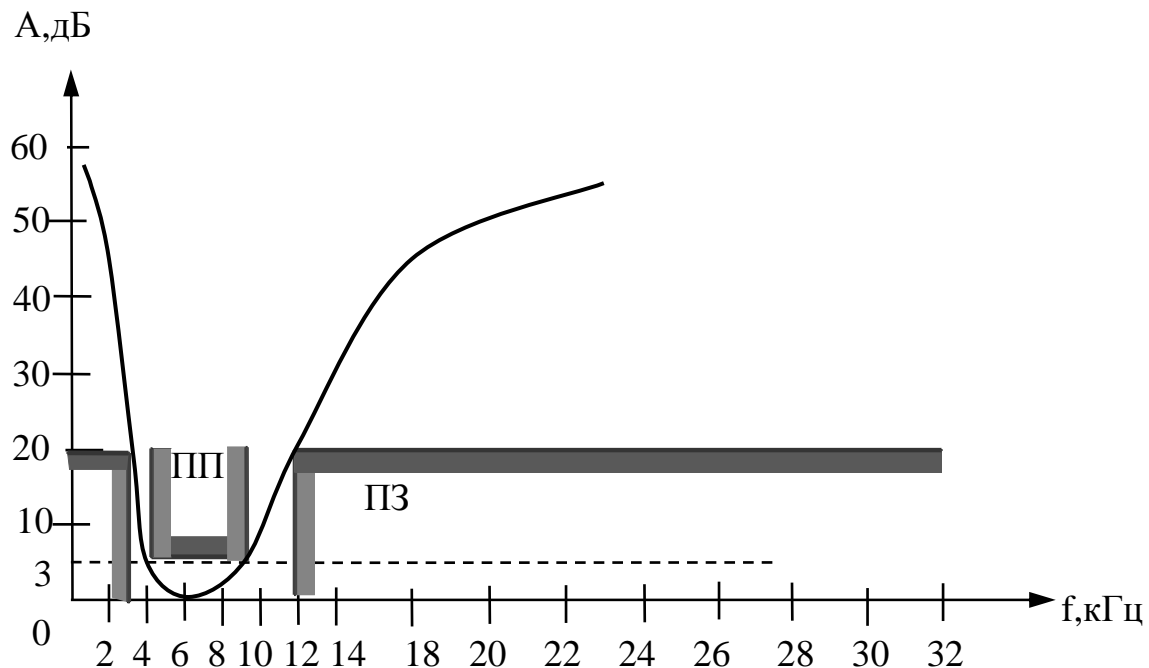


Рис. 18. График зависимости ослабления от частоты ПФ Баттерворта

Для проверки правильности расчета фильтра сравним расчетные и заданные ослабления на граничных частотах ПП и ПЗ:  $A(f_S) = 20,44 \text{ дБ} > A_s = 20 \text{ дБ}$ ;  $A(f_1) = 3 \text{ дБ} = \Delta A$ , что подтверждает правильность расчета.

### 3.4. Расчет ЛС ПФ Чебышева

Рассчитать параметры симметричного двусторонне нагруженного ЛС ПФ Чебышева по данным: ширина ПП  $\Delta f = 4,5 \text{ кГц}$ , верхняя граничная частота ПП  $f_1 = 12,5 \text{ кГц}$ , в этой полосе ослабление должно быть не более  $\Delta A = 1 \text{ дБ}$ , а при частоте  $f_{S2} = 16 \text{ кГц}$  и более ослабление должно быть не менее  $A_s = 18 \text{ дБ}$ . Сопротивления нагрузок фильтра  $R_r = R_H = R = 600 \text{ Ом}$ . Рассчитать ослабление фильтра при частотах  $f_0, f_{-1}, f_1, f_{S1}, f_{S2}, 1,5 f_{S2}, 2 f_{S2}$ . Начертить кривую ослабления в зависимости от частоты  $A(f)$ .

#### Решение

Определим нижнюю граничную частоту ПП

$$f_{-1} = f_1 - \Delta f = 12,5 - 4,5 = 8 \text{ кГц}.$$

Средняя геометрическая частота ПФ равна

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_{-1}} = \sqrt{f_{S1} \cdot f_{S2}} = \sqrt{8 \cdot 12,5} = 10 \text{ кГц}.$$

Из этого выражения определяем нижнюю граничную частоту ПЗ

$$f_{S1} = \frac{f_0^2}{f_{S2}} = \frac{10^2}{16} = 6,25 \text{ кГц}.$$

Определяем нормированную граничную частоту ПЗ ФНЧ - прототипа

$$\Omega_s = k \left( \frac{f_{s2}}{f_0} - \frac{f_0}{f_{s2}} \right) = 2,22 \left( \frac{16}{10} - \frac{10}{16} \right) = 2,167, \text{ где } k = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{10}{4,5} = 2,22.$$

По формуле (24) определяем порядок ФНЧП

$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1 \cdot 18} - 1}{10^{0,1 \cdot 1} - 1}}}{\text{Arch } 2,167} = \frac{\text{Arch } 15,5}{\text{Arch } 2,167} = \frac{3,43}{1,41} = 2,44$$

Округлив результат до ближайшего большего целого, принимаем  $n = 3$ .

По табл. П.1.2 для  $\Delta A = 1$  дБ и  $n = 3$  нормированные элементы ФНЧП имеют значения  $c_1(\ell_1) = 2,024$ ;  $\ell_2(c_2) = 0,994$ ;  $c_3(\ell_3) = 2,024$ .

Схемы ФНЧП третьего порядка представлены на рис. 19.

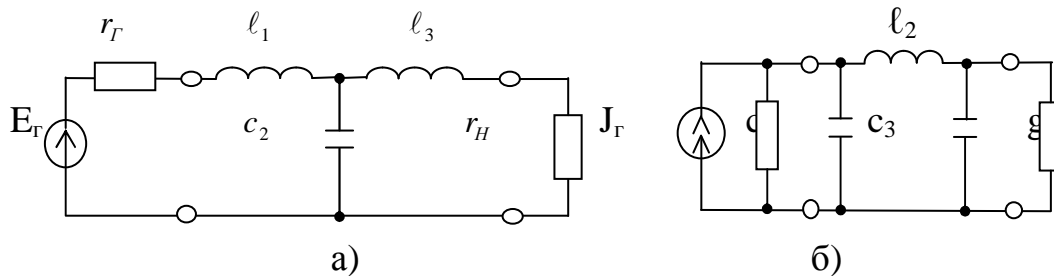


Рис. 19. Варианты схем ФНЧП Чебышева третьего порядка

Выберем для дальнейшего расчета схему рис. 19,а. От схемы ФНЧП перейдем к схеме ПФ, воспользовавшись таблицей П.1.2.

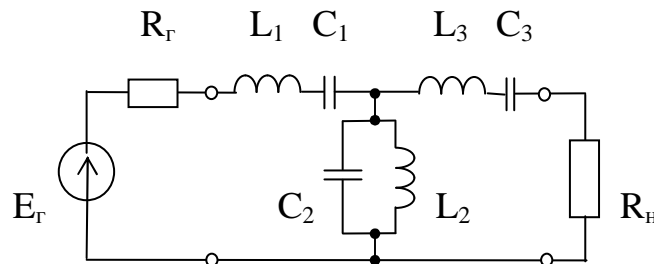


Рис. 20. Схема ПФ Чебышева при  $n=3$

Коэффициенты денормирования индуктивностей и емкостей равны

$$k_L = \frac{R}{2\pi f_0} = \frac{600}{6,28 \cdot 10 \cdot 10^3} = 9,55 \text{ мГн},$$

$$k_c = \frac{1}{2\pi f_0 R} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^4 \cdot 600} = 2,65 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

По формулам таблицы 5 вычисляем номинальные значения элементов ПФ

$$L_1 = L_3 = k \cdot k_L \cdot \ell_1 = 2,22 \cdot 9,55 \cdot 10^{-3} \cdot 2,024 = 42,9 \text{ мГн};$$

$$C_1 = C_3 = \frac{k_c}{k \cdot \ell_1} = \frac{2,65 \cdot 10^{-8}}{2,22 \cdot 2,024} = 5,89 \text{ нФ};$$

$$L_2 = \frac{k_L}{k \cdot c_2} = \frac{9,55 \cdot 10^{-3}}{2,22 \cdot 0,994} = 4,32 \text{ мГн};$$

$$C_2 = k \cdot k_c \cdot c_2 = 2,22 \cdot 2,65 \cdot 10^{-8} \cdot 0,994 \text{ нФ}.$$

Расчет ослабления проводим по формуле (18). Нормированная частота определяется по формуле  $\Omega = k(f/f_0 - f_0/f)$ . Расчет существенно упрощается при использовании программы Excel (см. приложение П.2.7). Результаты расчета сведены в табл. 9.

Таблица 9

$f$	$f_0$	$f_{-1}$ и $f_1$	$f_{s1}$ и $f_{s2}$	$f'$ и $1,5 f_{s2}$	$f''$ и $2 f_{s2}$
$f$ , кГц	10	8 и 12,5	6,25 и 16	4,1 и 24	3,1 и 32
$\Omega$	0	$\mp 1$	$\mp 2,167$	$\mp 4,4$	$\mp 6,4$
$A$ , дБ	0	1	24,8	44,4	54,4

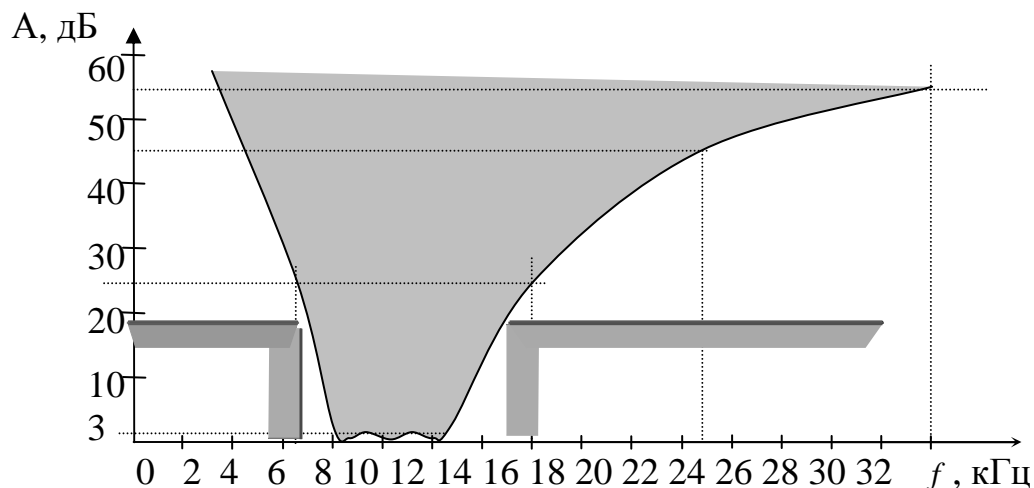


Рис. 21. График зависимости ослабления от частоты ПФ Чебышева при  $n = 3$

Из выше приведенного расчета видно, что  $A(f_s) = 24,8 \text{ дБ} > A_s = 20 \text{ дБ}$  и  $A(f_1) = 1 \text{ дБ} = \Delta A$ , что подтверждает правильность расчета.

### 3.5. Расчет ARC ФНЧ Баттерворта

Рассчитать активный RC фильтр нижних частот Баттерворта, удовлетворяющий требованиям:  $f_1 = 175 \text{ Гц}$ ;  $\Delta A = 2,5 \text{ дБ}$ ;  $f_s = 350 \text{ Гц}$ ;

$A_s = 21 \text{ дБ}$ ;  $C_1 = C_2 = C_{10} = 70 \text{ нФ}$ ;  $R_1 = R_2 = R_{10}$ . Рассчитать частотную характеристику ослабления на частотах:  $f_1$ ,  $f_c$ ,  $f_s$ ,  $1,5 f_s$ ,  $2 f_s$ .

#### Решение

Определяем нормированную граничную частоту ПЗ  $\Omega_s = \frac{f_s}{f_1} = \frac{350}{175} = 2$ .

Порядок ФНЧП определяется по формуле (23).

$$n \geq \frac{21 - 10 \lg(10^{0,1 \cdot 2,5} - 1)}{20 \lg 2} = 3,67$$

Полученное значение округляем до ближайшего большего целого числа, т.е. принимаем  $n = 4$ .

Рассчитаем нули полинома знаменателя передаточной функции Баттерворта при  $n = 4$  по формуле (13,а)

$$s_k = \cos \frac{2k-1}{n} \cdot \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{2k-1}{n} \cdot \frac{\pi}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, 2n$$

$$\text{при } n=4, k=1; s_1 = \cos\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,9238 + j0,3827;$$

$$\text{при } n=4, k=2; s_2 = \cos\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,3827 + j0,9238;$$

$$\text{при } n=4, k=3; s_3 = \cos\left(\frac{5}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{5}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = -0,3827 + j0,9238;$$

$$\text{при } n=4, k=4; s_4 = \cos\left(\frac{7}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{7}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = -0,9238 + j0,3827;$$

$$\text{при } n=4, k=5; s_5 = \cos\left(\frac{9}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{9}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = -0,9238 - j0,3827;$$

$$\text{при } n=4, k=6; s_6 = \cos\left(\frac{11}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{11}{4} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = -0,3827 - j0,9238.$$

Выберем те  $s_k$ , у которых вещественные части отрицательные. Вычислим квадратные трехчлены:

$$(s - s_3)(s - s_6) = (s + 0,3827 - j0,9238)(s + 0,3827 + j0,9238) = s^2 + 0,7654s + 1;$$

$$(s - s_4)(s - s_5) = (s + 0,9238 - j0,3827)(s + 0,9238 + j0,3827) = s^2 + 1,8476s + 1.$$

Передаточная функция ФНЧ - прототипа имеет вид

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{(s - s_3)(s - s_6)(s - s_4)(s - s_5)} = \frac{1}{(s^2 + 0,7654s + 1)(s^2 + 1,8476s + 1)} = \\ &= \frac{1}{s^2 + 0,7654s + 1} \times \frac{1}{s^2 + 1,8476s + 1} = H_1(s) \times H_2(s). \end{aligned}$$

Таким образом, схема фильтра будет состоять из двух звеньев 2-го порядка.

Определим частоту среза ФНЧ Баттерворта по формуле (11 а)

$$f_C = \frac{f_1}{2n \sqrt[10]{0,1 \cdot \Delta A} - 1} = \frac{175}{8 \sqrt[10]{0,25} - 1} = 180,6 \text{ Гц}.$$

Выполним денормирование передаточной функции путем замены  $s = p/2\pi f_c$ . Тогда передаточная функция первого звена примет вид

$$H_1(s) = \frac{1}{\left(\frac{p}{2\pi f}\right)^2 + 0,7654 \frac{p}{2\pi f_C} + 1} = \frac{1}{\left(\frac{p}{6,28 \cdot 180,6}\right)^2 + 0,7654 \frac{p}{6,28 \cdot 180,6} + 1} =$$

$$= \frac{1}{7,7687 \cdot 10^{-7} p^2 + 6,746 \cdot 10^{-4} p + 1} = \frac{1}{\alpha_1 p^2 + \beta_1 p + 1};$$

$$H_1(p) = \frac{K_1}{C_{10}^2 R_{10}^2 p^2 + C_{10} R_{10} (3 - K_1) p + 1}.$$

Приравнявая коэффициенты при равных степенях  $p$  знаменателей, составим систему уравнений

$$\begin{cases} C_{10}^2 R_{10}^2 = 7,7687 \cdot 10^{-7} \\ C_{10} R_{10} (3 - K) = 6,746 \cdot 10^{-4} \end{cases}.$$

Так как

$$C_{10} = 70 \text{ нФ}, \text{ то } C_{10} R_{10} = 8,814 \cdot 10^{-4},$$

$$R_{10} = \frac{8,814 \cdot 10^{-4}}{70 \cdot 10^{-9}} = 12591 \text{ Ом} = 12,591 \text{ кОм},$$

$$3 - K_1 = \frac{6,746 \cdot 10^{-4}}{C_{10} R_{10}} = \frac{6,746 \cdot 10^{-4}}{70 \cdot 10^{-9} \cdot 12,591 \cdot 10^3} = 0,765,$$

$$K_1 = 3 - 0,765 = 2,235.$$

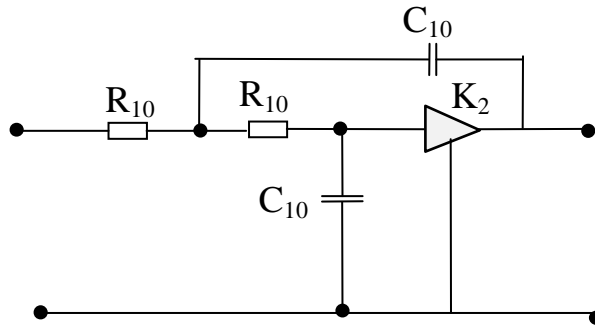


Рис. 22. Схема первого звена ФНЧ Баттерворта

Выполним аналогичные действия с передаточной функцией второго звена  $H_2(s)$  и получим

$$H_2(p) = \frac{1}{\left(\frac{p}{2\pi f_c}\right)^2 + 1,8476 \frac{p}{2\pi f_c} + 1} = \frac{1}{\left(\frac{p}{6,28 \cdot 180,6}\right)^2 + 1,8476 \frac{p}{6,28 \cdot 180,6} + 1} =$$

$$= \frac{1}{7,7687 \cdot 10^{-7} p^2 + 1,6286 \cdot 10^{-3} p + 1} = \frac{1}{\alpha_2 p^2 + \beta_2 p + 1};$$

по формуле (34)

$$H_2(p) = \frac{K_2}{C_{20}^2 R_{20}^2 p^2 + C_{20} R_{20} (3 - K_2) p + 1},$$

$$\begin{cases} C_{20} R_{20}^2 = 7,7687 \cdot 10^{-7} \\ C_{20} R_{20} (3 - K_2) = 1,6286 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Так как  $C_{20} = 70 \text{ нФ}$ , то  $R_{20} = 12,591 \text{ кОм}$ .

$$3 - K_2 = \frac{1,6286 \cdot 10^{-3}}{C_{20} R_{20}} = \frac{1,6286 \cdot 10^{-3}}{70 \cdot 10^{-9} \cdot 12,591 \cdot 10^3} = 1,848, \quad K_2 = 3 - 1,848 = 1,152.$$

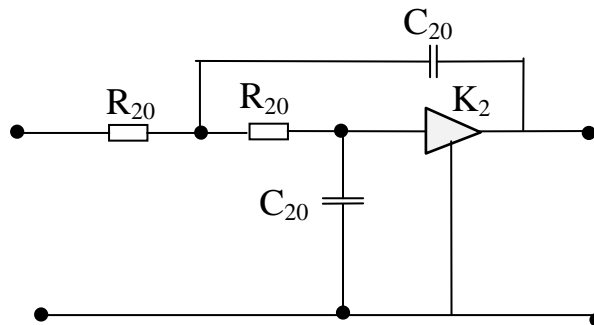


Рис. 23. Схема второго звена ФНЧ

При каскадном соединении звеньев схема фильтра будет иметь вид рис.24.

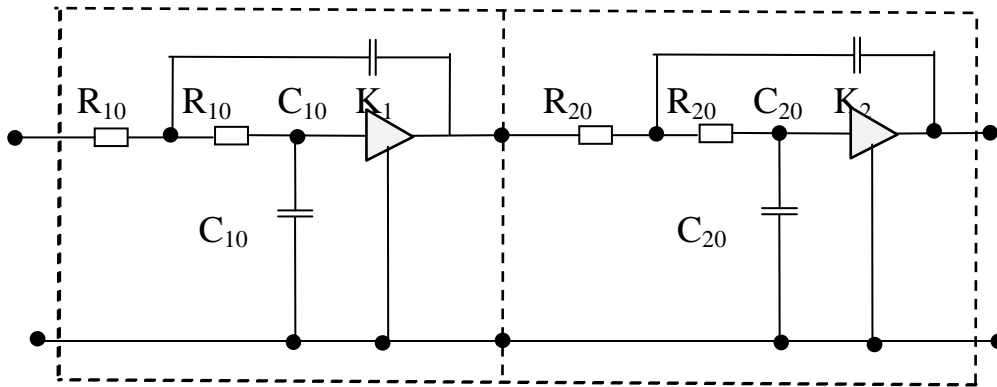


Рис. 24. Схема АРС ФНЧ Баттерворта четвертого порядка

Расчет частотной характеристики ослабления  $A(f)$  фильтра производится по формулам

$$H(p) \Big|_{p=j\omega} = H(j\omega) = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)};$$

$$A = 20 \lg \frac{1}{H(\omega)} = 20 \lg \left[ \sqrt{\left(1 - \alpha_1 \omega^2\right)^2 + \left(\omega \beta_1\right)^2} \times \sqrt{\left(1 - \alpha_2 \omega^2\right)^2 + \left(\omega \beta_2\right)^2} \right].$$

Расчёт частотной характеристики ослабления  $A(f)$  существенно упрощается при использовании табличного процессора Excel (см. приложение П.2.8)

Результаты расчета сведены в табл. 10.

Таблица 10

$f$	$f_1$	$f_c$	$f_s$	$1,5 f_s$	$2 f_s$
$f$ , кГц	175	180,6	350	525	700
$A$ , дБ	2,5	3	23	37	47

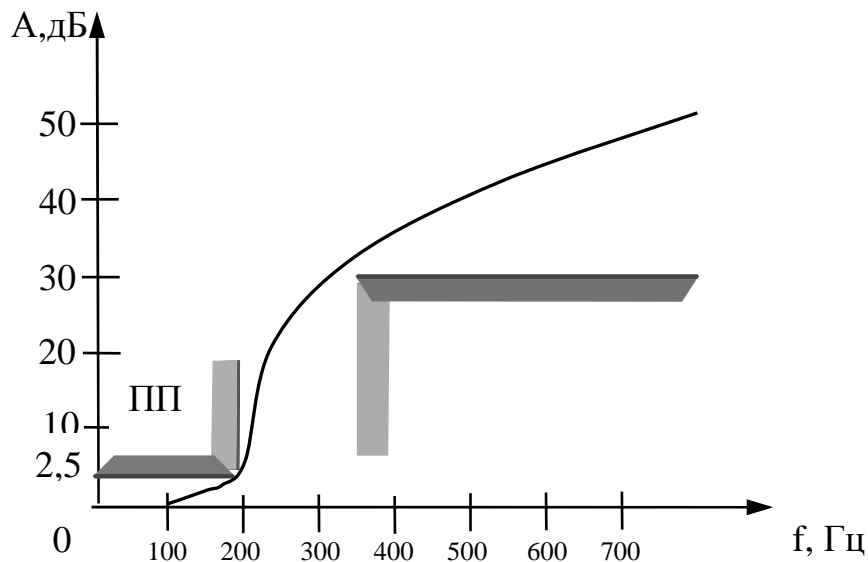


Рис. 25. Частотная характеристика ослабления  $A(f)$  ARC ФНЧ Баттерворта четвертого порядка

Из таблицы 10 и графика рис.25 видно, что  $A(f_s) = 23 \text{ дБ} > A_s = 21 \text{ дБ}$  и  $A(f_1) = 2,5 \text{ дБ} = \Delta A$ , следовательно, рассчитанный фильтр удовлетворяет заданным требованиям.

### 3.5. Расчет ARC ФНЧ Чебышева

Рассчитать активный RC фильтр нижних частот Чебышева, удовлетворяющий требованиям:  $f_1 = 40 \text{ Гц}$ ;  $\Delta A = 1,5 \text{ дБ}$ ;  $f_s = 100 \text{ Гц}$ ;  $A_s = 30 \text{ дБ}$ ;  $C_1 = C_2 = C_{10}$ ;  $R_1 = R_2 = R_{10} = 10 \text{ кОм}$ .

Рассчитать частотную характеристику ослабления на частотах  $f_1$ ,  $f_s$ ,  $1,5 f_s$ ,  $2 f_s$ .

#### Решение

Нормированная граничная частота ПЗ равна

$$\Omega_s = f_s / f_1 = 100 / 40 = 2,5.$$

Порядок фильтра определяется по формуле (24)

$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1 \cdot 30} - 1}{10^{0,1 \cdot 1,5} - 1}}}{\text{Arch} 2,5} = 2,93.$$

Принимаем  $n=3$ , т.е. необходимо синтезировать фильтр, схема которого состоит из одного звена второго порядка и одного звена первого порядка.

Расчет коэффициентов полинома знаменателя функции Чебышева проводим по формулам

$$E = 2^n \sqrt{\frac{10^{0,05 \cdot \Delta A} + 1}{10^{0,05 \cdot \Delta A} - 1}} = 6 \sqrt{\frac{10^{0,075} + 1}{10^{0,075} - 1}} = 1,5;$$

$$\gamma = 0,5 \left( E - \frac{1}{E} \right) = 0,5 \left( 1,5 - \frac{1}{1,5} \right) = 0,417;$$

$$\beta = 0,5 \left( E + \frac{1}{E} \right) = 0,5 \left( 1,5 + \frac{1}{1,5} \right) = 1,08.$$

Нормированные значения полюсов передаточной функции определяются по формуле (17)

$$S_k = -\gamma \sin \frac{2k-1}{2n} \pi + j\beta \cos \frac{2k-1}{2n} \pi.$$

$$\text{При } n = 3 \text{ и } k = 1: S_1 = -0,417 \sin \frac{1}{6} \pi + j1,08 \cos \frac{1}{6} \pi = -0,2085 + j0,9353;$$

$$\text{при } n = 3 \text{ и } k = 2: S_2 = -0,417 \sin \frac{3}{6} \pi + j1,08 \cos \frac{3}{6} \pi = -0,417;$$

$$\text{при } n = 3 \text{ и } k = 3: S_3 = -0,417 \sin \frac{5}{6} \pi + j1,08 \cos \frac{5}{6} \pi = -0,2085 - j0,9353.$$

Вычислим выражение квадратного трехчлена, соответствующего паре сопряженных полюсов  $s_1$  и  $s_3$

$$(s - s_1)(s - s_3) = (s + 0,2085 - j0,9353)(s + 0,2085 + j0,9353) = s^2 + 0,417s + 0,91826.$$

Синтез фильтра осуществим на основе каскадного соединения двух звеньев - первого и второго порядков. Передаточная функция ФНЧ -прототипа имеет вид

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) = \frac{1}{(s - s_1)(s - s_3)(s - s_2)} =$$

$$= \frac{1}{(s - s_1)(s - s_3)} \cdot \frac{1}{(s - s_2)} = \frac{1}{s^2 + 0,417s + 0,91826} \cdot \frac{1}{s + 0,417}$$

Передаточная функция звена второго порядка ФНЧП равна

$$H_1(s) = \frac{1}{s^2 + 0,417s + 0,91826}.$$

Поделим числитель и знаменатель  $H_1(s)$  на 0,91826 и получим

$$H_1(s) = \frac{1,089}{1,089s^2 + 0,454s + 1}.$$

Выполним денормирование передаточных функций путем замены  $s$  на  $p/2\pi f_1$  (для фильтра Чебышева  $f_1 = f_c$ )

$$H_2(p) = \frac{1,089}{1,089 \left( \frac{p}{2\pi \cdot 40} \right)^2 + 0,454 \frac{p}{2\pi \cdot 40} + 1} = \frac{1,089}{1,724 \cdot 10^{-5} p^2 + 1,806 \cdot 10^{-3} p + 1} = \frac{N_1}{\alpha_1 p^2 + \beta_1 p + 1}.$$

Передаточная функция звена второго порядка при условии  $R_1 = R_2 = R_{10}$  и  $C_1 = C_2 = C_{10}$  имеет вид  $H_1(p) = \frac{K_1}{C_{10}^2 R_{10}^2 p^2 + C_{10} R_{10} (3 - K_1) p + 1}.$

Приравняем коэффициенты при равных степенях  $p$  в знаменателях двух последних выражений и получим систему двух уравнений

$$\begin{cases} C_{10}^2 R_{10}^2 = 1,724 \cdot 10^{-5} \\ C_{10} R_{10} (3 - K_1) = 1,806 \cdot 10^{-3} \end{cases}.$$

Совместное решение этих двух уравнений дает следующий результат:

$$C_{10} R_{10} = 4,152 \cdot 10^{-3}; R_{10} = 10 \text{ кОм};$$

$$C_{10} = \frac{4,152 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3} = 4,152 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} = 0,415 \text{ мкФ};$$

$$3 - K_1 = \frac{1,806 \cdot 10^{-3}}{4,152 \cdot 10^{-3}} = 0,435; K_1 = 3 - 0,435 = 2,265.$$

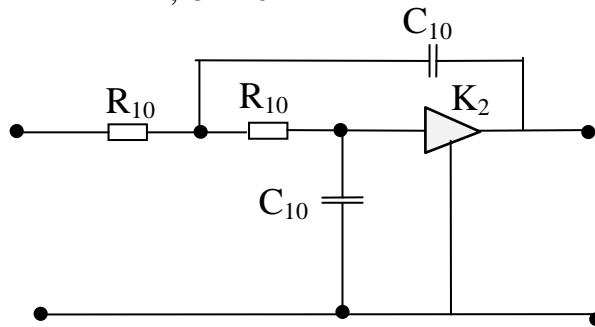


Рис. 26. Схема ARC звена ФНЧ второго порядка  
Аналогично произведем расчет второго звена фильтра

$$H_2(s) = \frac{1}{s + 0,417}.$$

$$H_2(p) = \frac{1}{\frac{p}{2\pi \cdot 40} + 0,417} = \frac{1}{3,9788 \cdot 10^{-3} p + 0,417} = \frac{2,398}{9,5417 \cdot 10^{-3} p + 1} = \frac{N_2}{\beta_2 p + 1}$$

Эта передаточная функция может быть реализована пассивной схемой ФНЧ первого порядка, передаточная функция которого равна

$$H_2(p) = \frac{1}{R_{20} C_{20} p + 1}.$$

Приравняв коэффициенты при одинаковых степенях  $p$ , получим

$$R_{20} C_{20} = 9,5417 \cdot 10^{-3}; R_{20} = 10 \text{ кОм};$$

$$C_{20} = \frac{9,5417 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3} = 9,5417 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} = 0,934 \text{ мкФ}.$$

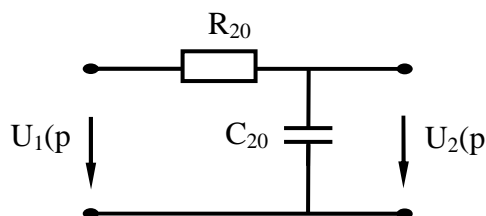


Рис. 27. Схема звена ФНЧ первого порядка

Схема ФНЧ состоит из каскадного соединения рассчитанных звеньев и представлена на рис. 28.

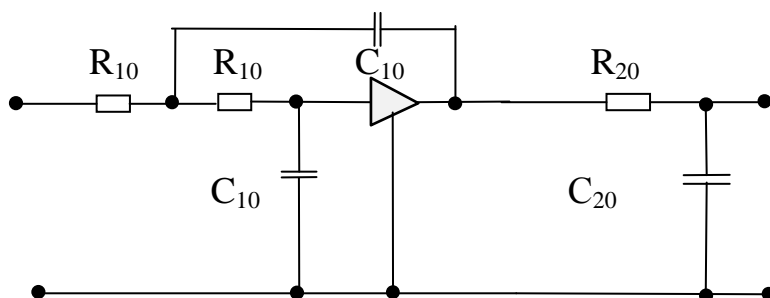


Рис. 28. Схема ARC ФНЧ Чебышева при n=3

Расчет частотной характеристики ослабления производится по формуле (9).

$$A = 20 \lg \frac{1}{H(\omega)} = 20 \lg \left[ \sqrt{\left(1 - \alpha_1 \omega^2\right)^2 + \left(\omega \beta_1\right)^2} \times \sqrt{\left(1 - \alpha_2 \omega^2\right)^2 + \left(\omega \beta_2\right)^2} \right]$$

Расчёт  $A(f)$  можно выполнить с помощью программы Excel (см. прилож. П.2.9). При  $n = 3$  результаты расчета сведены в табл. 11

Таблица 11

$f$	$f_1$	$f_s$	$1,5 f_s$	$2 f_s$
$f$ , Гц	40	100	150	200
$A$ , дБ	1,5	31,1	42,3	50

По результатам расчета (табл.11) построим график частотной характеристики ослабления  $A(f)$  (рис.29).

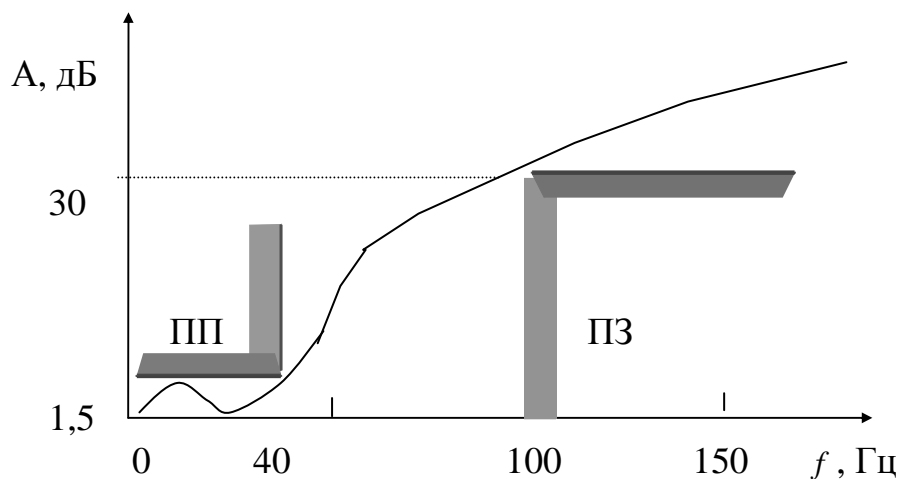


Рис.29. Частотная характеристика  $A(f)$  ARC ФНЧ Чебышева при  $n = 3$  и  $K_1 = 1$

Из рис.29 видно, что  $A(f_s) = 31,1 \text{ дБ} > A_s = 30 \text{ дБ}$ ,  $A(f_1) = 1,5 \text{ дБ} = \Delta A$ , следовательно, рассчитанный фильтр удовлетворяет заданным требованиям.

## Приложение П.1. Таблицы нормированных элементов ФНЧП

Таблица П.1.1

### Нормированные LC элементы ФНЧП Баттерворта

n	c <sub>1</sub> или $\ell_1$	$\ell_2$ или c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub> или $\ell_3$	$\ell_4$ или c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub> или $\ell_5$	$\ell_6$ или c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub> или $\ell_7$	$\ell_8$ или c <sub>8</sub>
1	2,0000	—	—	—	—	—	—	—
2	1,4142	1,4142	—	—	—	—	—	—
3	1,0000	2,0000	1,0000	—	—	—	—	—
4	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654	—	—	—	—
5	0,6180	1,6180	2,0000	1,6180	0,6180	—	—	—
6	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176	—	—
7	0,4450	1,2470	1,8019	2,0000	1,8019	1,2470	0,4450	—
8	0,3902	1,1111	1,6629	1,9616	1,9616	1,6629	1,1111	0,3902

Таблица П.1.2

### Нормированные LC элементы ФНЧП Чебышева

$\Delta A$	Порядок фильтра n	c <sub>1</sub> или $\ell_1$	$\ell_2$ или c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub> или $\ell_3$	$\ell_4$ или c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub> или $\ell_5$	$\ell_6$ или c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub> или $\ell_7$
0,5	3	1,596	1,097	1,596	—	—	—	—
	5	1,706	1,230	2,541	1,230	1,706	—	—
	7	1,737	1,258	2,638	1,344	2,638	1,258	1,737
1,0	3	2,024	0,994	2,024	—	—	—	—
	5	2,135	1,091	3,001	1,091	2,135	—	—
	7	2,167	1,112	3,094	1,174	3,094	1,112	2,167
2,0	3	2,711	0,833	2,711	—	—	—	—
	5	2,831	0,899	3,783	0,899	2,831	—	—
	7	2,865	0,912	3,877	0,954	3,877	0,912	2,865
3,0	3	3,349	0,712	3,349	—	—	—	—
	5	3,481	0,762	4,538	0,762	3,481	—	—
	7	3,519	0,772	4,639	0,804	4,639	0,772	3,519

## ПРИЛОЖЕНИЕ П.2. Применение программы Excel к расчёту ЭФ

Табличный процессор **Excel** установлен на каждом персональном компьютере (ПК) и может с успехом использоваться не только для экономических, но и инженерных расчётах. Особенно эффективно его использование при расчётах и построении графиков амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), фазо-частотных характеристик (ФЧХ) а также частотных характеристик рабочего ослабления  $A(f)$  электрических фильтров (ЭФ).

После запуска программы **Excel** на экране монитора появляется окно программы, содержащее рабочий лист состоящий из ячеек. Строки таблицы пронумерованы целыми числами **1...65536**, а столбцы обозначены буквами **A, B,..., IV**.

Вводя числа, формулы или текст в эти ячейки, можно произвести необходимые вычисления и получить наглядное представление этих данных в виде графиков.

### П.2.1. Ввод формул

*Все формулы в Excel начинаются со знака «=». Один из возможных способов ввода формулы в ячейки заключается в следующем:*

- установить курсор на ячейку, в которую необходимо ввести формулу;
- ввести знак равенства «=»;
- ввести нужную формулу;
- нажать клавишу Enter.

**Замечание.** Одну и ту же формулу можно ввести сразу в несколько ячеек. Для этого необходимо выделить мышкой ячейки, ввести формулу, а затем одновременно нажать клавиши Ctrl-Enter.

### П.2.2. Методика построения графика функции $y=f(x)$

При построении «гладких» функций в Excel принята следующая терминология:

- $y$  – «значения»;
- $x$  – «подписи оси X»;
- индикатор кривой – «легенда»;
- подпись индикатора кривой – «имя»;

Для построения кривой выполняется следующая последовательность действий:

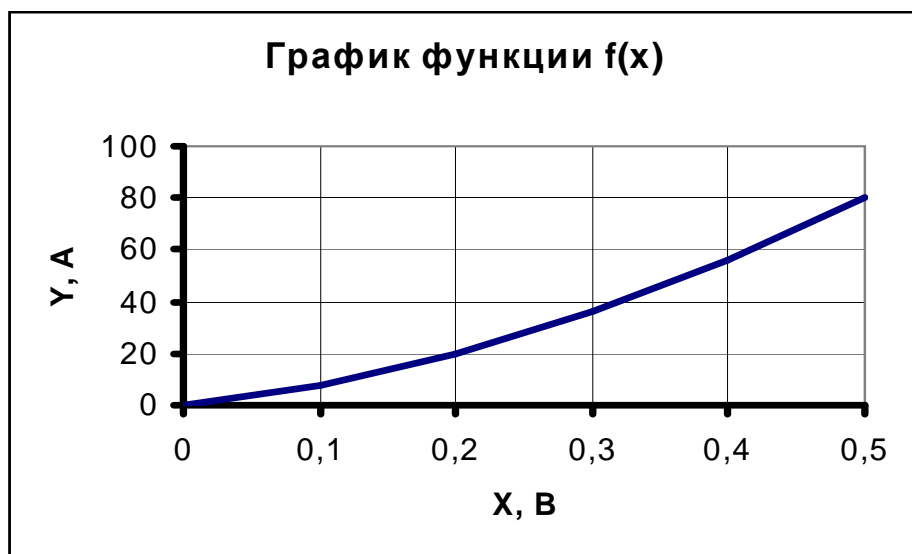
1. Запустить Excel. Установить шрифт **Times New Roman Cyr**.
2. Представить функцию  $y=f(x)$  в виде таблицы следующей структуры

	A	B	C	D	E	F	G
1	X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
2	Y	0	8	20	36	56	80

В ячейки строки **Y** могут быть помещены как значения, так и формулы.

3. Выделить при помощи мыши область значений **Y(B2:G2)**.
4. Щёлкнуть кнопку **Мастер диаграмм** на стандартной панели.
5. В появившемся меню щёлкнуть закладку **Нестандартные**, выдать **Гладкие графики** и нажать кнопку **Далее**.

6. Щёлкнуть закладку **Ряд**.
7. Щёлкнуть на правой кнопке **Подписи оси X:**, выделить область определения **X(B1:G1)** и снова щёлкнуть на правой кнопке. На графике появятся значения оси X. Введите **Имя**, например F. Нажмите кнопку **Далее**.
8. Выбрав закладку **Заголовки**, ввести **Название диаграммы**, т.е. графика. Подписать **Ось X** и **Ось Y**, не забывая указать их размерности.
9. Щёлкнув закладку **Линии сетки**, установите галочки у **основные линии** **Ось X** (категорий) и основные линии **Ось Y** (значений).
10. Щёлкните на закладке **Легенда**. Если она вам не нужна, уберите флажок **Добавить легенду**. Нажмите клавишу **Далее**.
11. Выберите **Поместить** диаграмму на листе **имеющемся**. Нажмите кнопку **Готово**.
12. Растяните область диаграммы до нужных размеров с помощью мыши.
13. Найдите мышкой область построения диаграммы (рис. 8). Щёлкните два раза.
14. В появившемся окне **Формат области построения** выберите белую заливку. Нажмите **ОК**.
15. Найдите мышкой **Ось категорий**. Щёлкните два раза. В появившемся окне **Формат оси Вид толщина** выберите более толстую линию. Нажмите кнопку **ОК**.
16. Найдите мышкой **Ось значений** и аналогично увеличьте толщину оси Y.
17. Выделите кривую графика и щёлкните на нём два раза. В появившемся окне **Формат ряда данных Вид** выберите желаемую толщину кривой графика. Нажмите кнопку **ОК**.
18. Выделите мышкой внешнюю рамку графика и щёлкните два раза. В появившемся окне **Формат области диаграммы. Вид. Рамка** установите галочку с тенью. Нажмите кнопку **ОК**.
19. График готов.



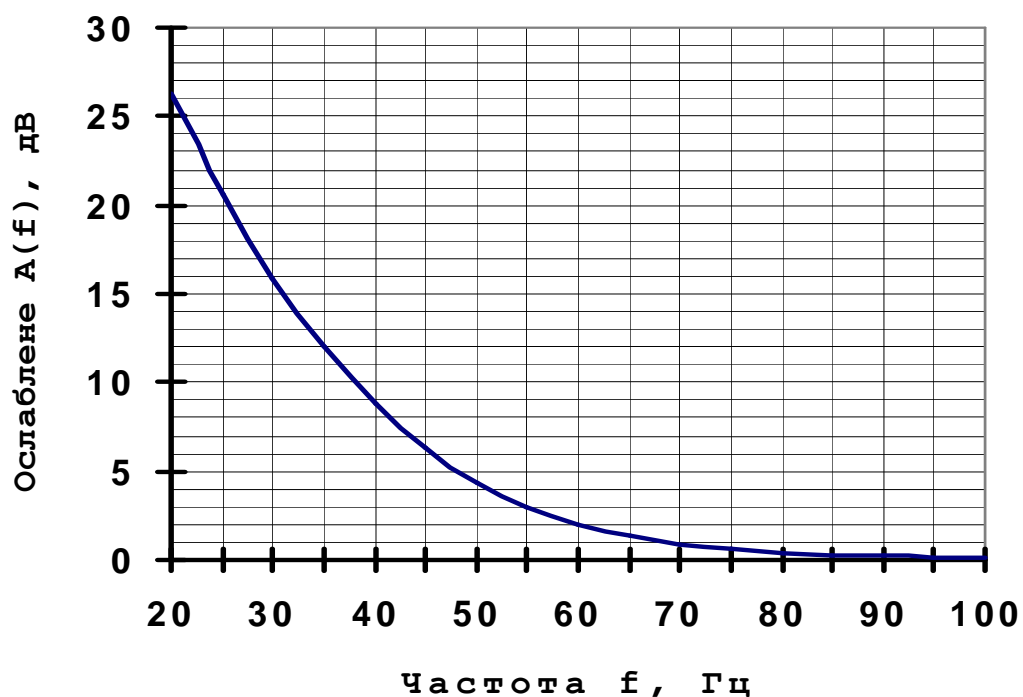
<b>П.2.3. Определение порядка n и ослабления A(Ω) ФНЧП на фиксированных нормированных частотах Ω.</b>								
Порядок фильтра нижних частот прототипа (ФНЧП) Баттерворта:								
$n > [A_s - 20Lg(\epsilon)] / [20Lg(\Omega_s)]$ , где $\epsilon = [10^{(0.1\Delta A)} - 1]^{0.5}$ .								
Порядок ФНЧП Чебышева определяется по формуле:								
$n > [A_s + 6 - 20Lg(\epsilon)] / [20Lg(\Omega_s + (\Omega_s^2 - 1)^{0.5})]$ .								
Для расчёта n достаточно после знака "=" в следующие справа								
ячейки ввести соответствующие значения: A <sub>s</sub> , ΔA, Ω <sub>s</sub> и нажать								
клавишу "Enter"								
<b>1. Расчёт порядка n ФНЧП Баттерворта</b>								
A <sub>s</sub> =	20,00	ΔA =	1,00	Ω <sub>s</sub> =	1,50	n =	5,35	6
<b>2. Расчёт порядка n ФНЧП Чебышева</b>								
						n =	3,812	4
<b>3. Расчёт ослабления ФНЧП Баттерворта</b>								
Для расчёта ослабления ФНЧП на нормированной частоте Ω								
достаточно ввести её значение в ячейку справа от ячейки								
"Ω=" и нажать клавишу "Enter".								
Ω =	2,00	A =	30,26	дБ				
<b>4. Расчёт ослабления ФНЧП Чебышева в ПЗ (Ω&gt;1)</b>								
		A =	33,87	дБ				
A <sub>s</sub> -минимально допустимое ослабление в ПЗ, дБ								
ΔA - макс. допустимое ослабление в ПП, дБ								
Ω <sub>s</sub> = - нормированная граничная частота ПЗ ФНЧП								
n - порядок ФНЧП								
Ω = - нормированная частота ФНЧП								
A <sub>s</sub> -минимально допустимое ослабление в ПЗ, дБ								
A - ослабление ФНЧП на нормированной частоте Ω, дБ								

### П.2.4. Расчёт построение графика $A(f)$ LC ФВЧ Баттерворта

1. Вводятся значения  $f_1$ ,  $f_s$ ,  $\Omega_s$ ,  $\Delta A$ ,  $n$ .
2. Вводятся частоты  $f$ , на которых необходимо выполнить расчёт  $A(f)$ .
3. Выполняется запуск программы на расчёт путем нажатия на клавишу "Enter".

$f$ , Гц	$\Omega=f_1/f$	$A$ , дБ					
20	3,0000	26,308		$f_1=$	60,00	Гц	
25	2,4000	20,522		$f_s=$	30,00	Гц	
30	2,0000	15,847		$\Omega_s=$	2,00		
35	1,7143	11,999		$\Delta A=$	2,00	дБ	
40	1,5000	8,8436		$A_s=$	15	дБ	
45	1,3333	6,3208		$n=$	3		
50	1,2000	4,3878		$\varepsilon=$	0,7648		
55	1,0909	2,9794					
60	1,0000	2					
65	0,9231	1,3412					
70	0,8571	0,9059					
75	0,8000	0,6195					
80	0,7500	0,4301					
85	0,7059	0,3034					
90	0,6667	0,2175					
95	0,6316	0,1583					
100	0,6000	0,1169					

$A(f)$  ФВЧ Бат.  $n=3$ , LC

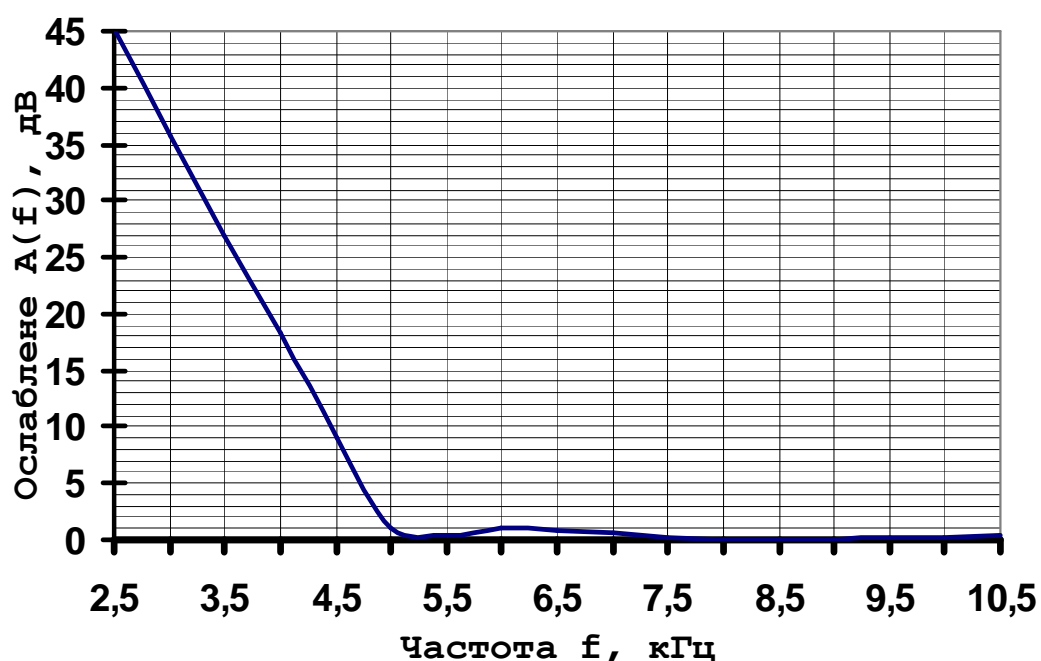


### П.2.5. Расчёт построение графика $A(f)$ LC ФВЧ Чебышева

1. Вводятся значения  $f_1$ ,  $f_s$ ,  $\Omega_s$ ,  $\Delta A$ ,  $n$ .
2. Вводятся частоты  $f$ , на которых необходимо выполнить расчёт  $A(f)$ .
3. Выполняется запуск программы на расчёт путем нажатия на клавишу "Enter".

$f$ , кГц	$\Omega=f_1/f$	$A(f)$ , дБ				
2,50	2,0000	45,306	1).	$f_1=$ 5,00	кГц	
3	1,6667	35,825	2).	$f_s=$ 2,50	кГц	
3,5	1,4286	27,016		$\Omega_s=$ 2,00		
4	1,2500	18,288	3).	$\Delta A=$ 1,00	дБ	
4,5	1,1111	9,0562	4).	$A_s=$ 37	дБ	
5	1,0000	1		$n=$ 4,2721		5
5,5	0,9091	0,323		$\epsilon=$ 0,5088		
6	0,8333	0,9598				
6,5	0,7692	0,9084				
7	0,7143	0,5791				
7,5	0,6667	0,2574				
8	0,6250	0,0601				
8,5	0,5882	9E-06				
9	0,5556	0,0426				
9,5	0,5263	0,1448				
10	0,5000	0,2724				
10,5	0,4762	0,4034				

$A(f)$  ФВЧ Чеб.  $n=3$ , LC



### П.2.6. Расчёт построение графика $A(f)$ LC ПФ Баттерворта

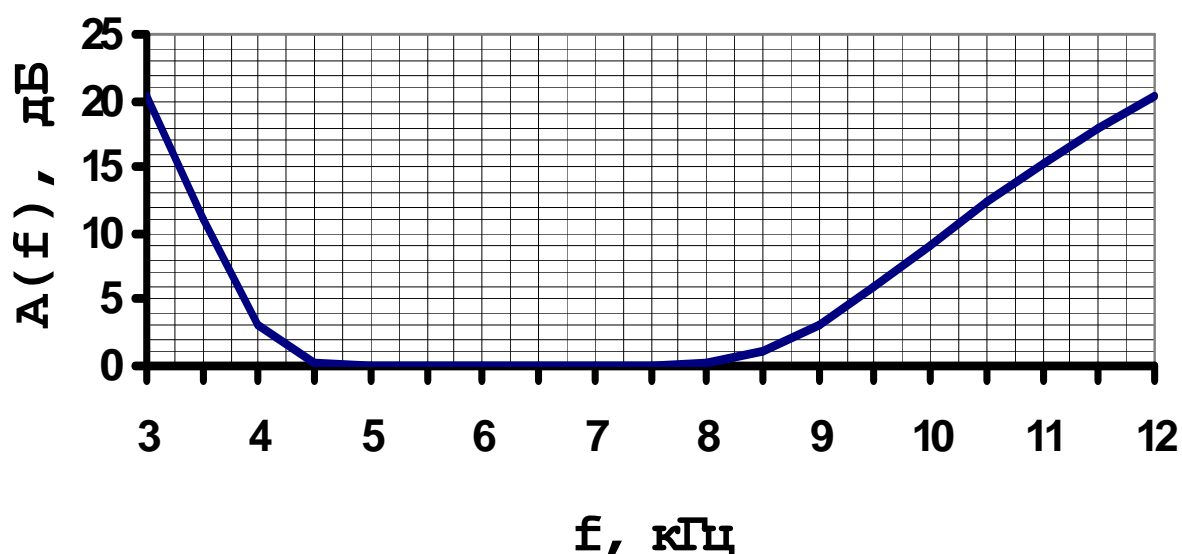
1. Вводятся значения  $f_1, f_2, f_{s1}, f_{s2}, \Delta A, A_s$ .

2. Вводятся частоты  $f$ , на которых необходимо выполнить расчёт  $A(f)$ .

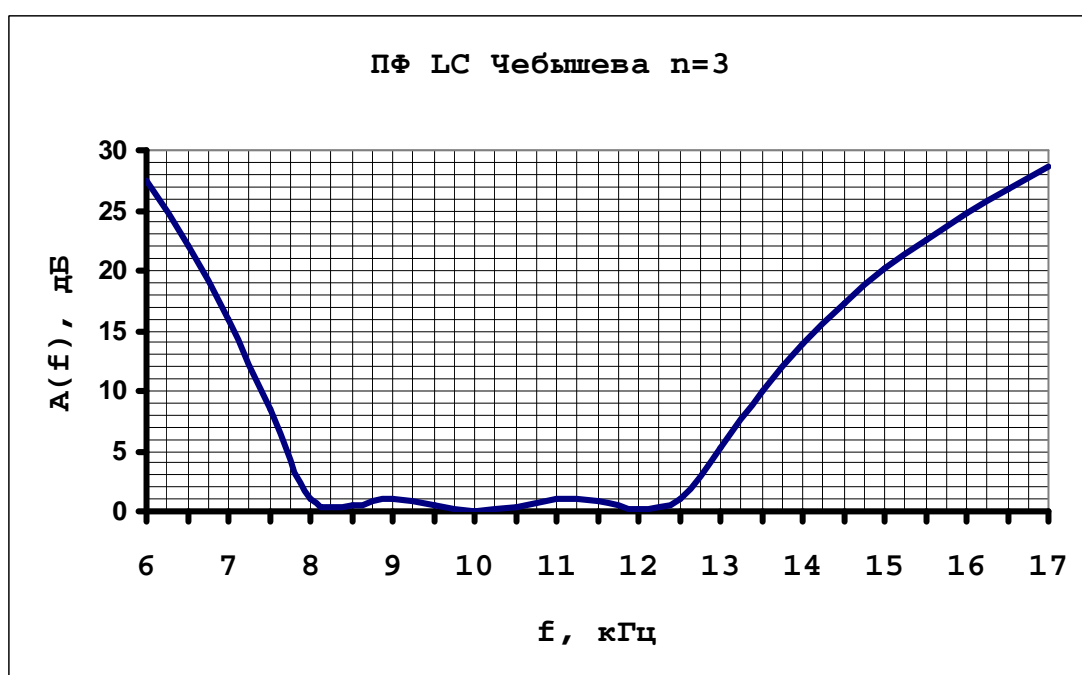
3. Выполняется запуск программы на расчёт путем нажатия на клавишу "Enter"

$f, \text{кГц}$	$\Omega$	$A, \text{дБ}$					
3	-1,8000	20,4406		$f_2=$	9	кГц	
3,5	-1,3571	10,9529		$f_1=$	4	кГц	
4	-1,0000	3,0000		$f_0=$	6	кГц	
4,5	-0,7000	0,2423		$f_{s1}=$	3	кГц	
5	-0,4400	0,0061		$f_{s2}=$	12	кГц	
5,5	-0,2091	0,0000		$k=$	1,2		
6	0,0000	0,0000		$\Omega_s=$	1,80		
6,5	0,1923	0,0000		$\Delta A=$	3,00	дБ	
7	0,3714	0,0016		$A_s=$	20	дБ	
7,5	0,5400	0,0311		$n=$	3,9214	4	
8	0,7000	0,2423		$\varepsilon=$	0,9976		
8,5	0,8529	1,0680					
9	1,0000	3,0000					
9,5	1,1421	5,8898					
10	1,2800	9,1231					
10,5	1,4143	12,2867					
11	1,5455	15,2359					
11,5	1,6739	17,9482					
12	1,8000	20,4406					

ПФ LC Баттерворта  $n=4$



П.2.7. Расчёт и построение графика $A(f)$ LC-ПФ Чебышева порядка						
$f$ , кГц	$\Omega$	$A$ , дБ				
6	-2,37	27,43				
6,5	-1,97	22,07	1. Вводится диапазон частот $f$ , в котором надо выполнить расчет в ячейки.			
7	-1,62	15,91				
7,5	-1,30	8,47	2. Рассчитываются значения $\Omega$ нормированных частот ФНЧП и вводятся в ячейки.			
8	-1,00	1,00	3. Вводятся значения $f_1$ , $f_2$ , $f_{s1}$ , $f_{s2}$ , $\Delta A$ , $A_s$ в ячейки, справа после знака «=».			
8,5	-0,73	0,45				
9	-0,47	0,99	4. Запускается расчёт путём нажатия на клавишу «Enter»			
9,5	-0,23	0,43				
10	0,00	0,00				
10,5	0,22	0,40				
11	0,42	0,94	Данные для расчёта $A(f)$			
11,5	0,62	0,83	$f_1=$	8	кГц	
12	0,81	0,09	$f_2=$	12,50	кГц	
12,5	1,00	1,00	$f_{s1}=$	6,25	кГц	
13	1,18	5,28	$f_{s2}=$	16	кГц	
13,5	1,35	9,96	$\Delta A$	1,00	дБ	
14	1,52	13,94	$A_s=$	18	дБ	
14,5	1,69	17,28	Результаты расчёта			
15	1,85	20,13	$f_0=$	10	кГц	
15,5	2,01	22,62	$k=$	2,2222		
16	2,17	24,82	$\Omega_s=$	2,1667		
16,5	2,32	26,81	$\varepsilon=$	0,5088		
17	2,47	28,61	$n=$	2,9174	3	



### П.2.8. Расчёт и построение графика $A(f)$ ARC- ФНЧ Баттерворта

1. Ввести значения  $f_1$ ,  $f_s$ ,  $\Delta A$ ,  $A_s$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ .

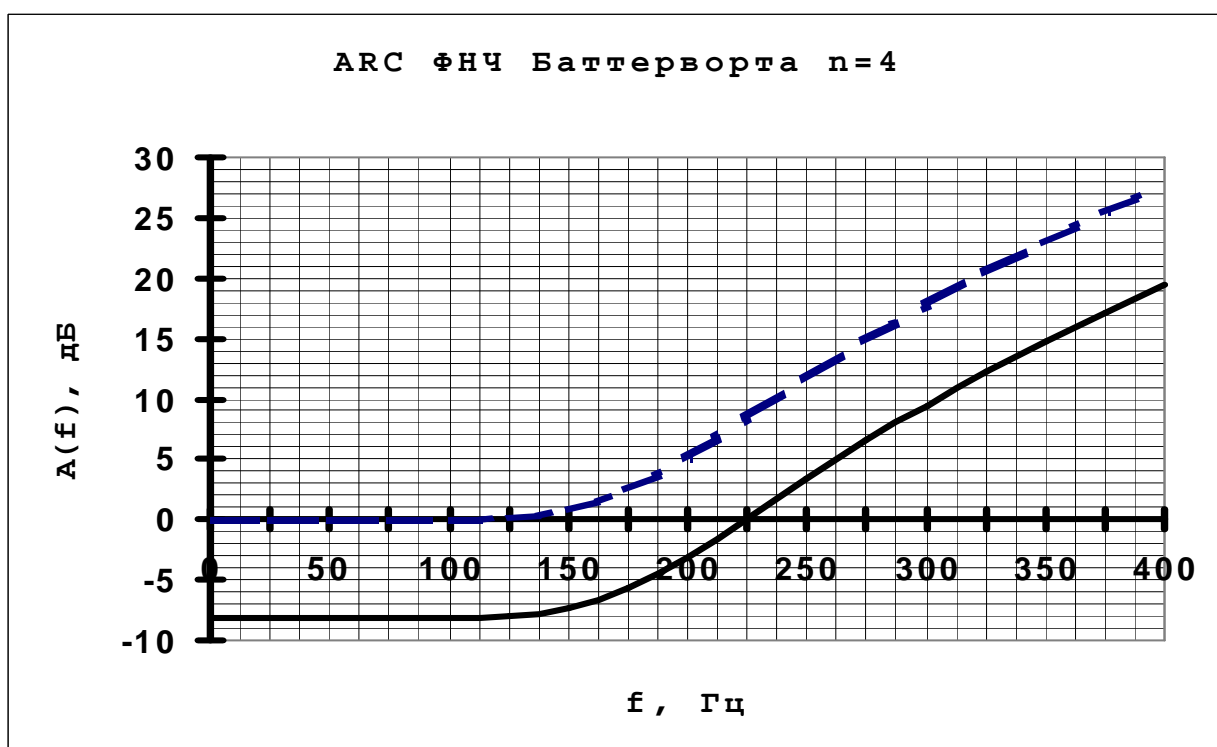
2. Ввести частоты  $f$ , на которых требуется выполнить расчёт

3. Запустить программу на расчёт путём нажатия на клавишу "Enter". (Пунктирной линией обозначена частотная

характеристика ослабления  $A_1(f)$  при  $K_1=K_2=1$ , т.е. без

учёта усиления усилителей).

$f$ , Гц	$\Omega=f/f_1$	$A_1(f)$ , дБ	$A_2(f)$ , дБ				
0	0,0000	0,0000	-8,2146	$f_1=$	175,00	Гц	
25	0,1429	0,0000	-8,2146	$f_s=$	350,00	Гц	
50	0,2857	0,0002	-8,2145	$\Omega_s=$	2,00		
75	0,4286	0,0038	-8,2108	$\Delta A=$	2,50	дБ	
100	0,5714	0,0383	-8,1763	$A_s=$	21	дБ	
125	0,7143	0,2232	-7,9914	$n=$	3,6688	4	
150	0,8571	0,8876	-7,3270	$\varepsilon=$	0,8822		
175	1,0000	2,5000	-5,7146	$K_1=$	2,235		
200	1,1429	5,1389	-3,0757	$K_2=$	1,152		
225	1,2857	8,3325	0,1179	$S=$	8,2146		
250	1,4286	11,6138	3,3992				
275	1,5714	14,7625	6,5479				
300	1,7143	17,7122	9,4976				
325	1,8571	20,4582	12,2436				
350	2,0000	23,0155	14,8009				
375	2,1429	25,4033	17,1887				
400	2,2857	27,6406	19,4260				

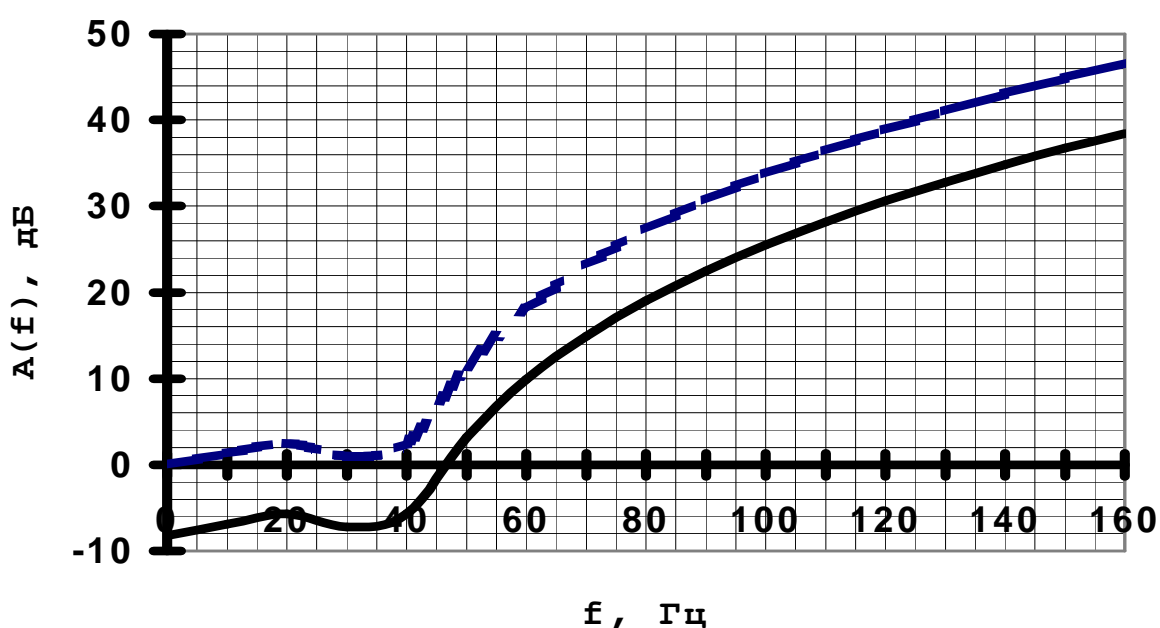


### П.2.9. Расчёт и построение графика $A(f)$ АРС- ФНЧ Чебышева

1. Ввести значения  $f_1$ ,  $f_s$ ,  $\Delta A$ ,  $A_s$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ .
2. Ввести частоты  $f$ , на которых требуется выполнить расчёт
3. Запустить программу на расчёт путём нажатия на клавишу "Enter". (Пунктирной линией обозначена частотная характеристика ослабления  $A_1(f)$  при  $K_1=K_2=1$ , т.е. без учёта усиления усилителей).

$f$ , Гц	$\Omega=f/f_1$	$A_1$ , дБ	$A_2$ , дБ				
0	0,0000	0,0000	-8,2146	$f_1=$	40,00	Гц	
10	0,2500	1,3604	-6,85419	$f_s=$	100,00	Гц	
20	0,5000	2,5000	-5,7146	$\Omega_s=$	2,50		
30	0,7500	0,9561	-7,25854	$\Delta A=$	2,50	дБ	
40	1,0000	2,5000	-5,7146	$A_s=$	21	дБ	
50	1,2500	11,4128	3,19822	$n=$	2,7754	3	
60	1,5000	18,0646	9,849956	$\varepsilon=$	0,8822		
70	1,7500	23,1162	14,90159	$K_1=$	2,235		
80	2,0000	27,2191	19,00447	$K_2=$	1,152		
90	2,2500	30,6945	22,47989	$S=$	8,2146		
100	2,5000	33,7205	25,50585				
110	2,7500	36,4063	28,19173				
120	3,0000	38,8246	30,61003				
130	3,2500	41,0262	32,81156				
140	3,5000	43,0481	34,83349				
150	3,7500	44,9185	36,70391				
160	4,0000	46,6592	38,44465				

АРС ФНЧ Чебышева  $n=3$



## Вопросы для подготовки к защите курсовой работы

1. Дайте определение электрического фильтра.
2. Как классифицируются фильтры по диапазону пропускаемых ими частот?
3. На какие области разделяется весь частотный диапазон фильтров? Дайте определение каждой из них.
4. Что называется передаточной функцией фильтра? Записать ее выражение в виде дробно-рациональной функции комплексного переменного  $p$ .
5. Какие полиномы называются полиномами Гурвица?
6. Что называется порядком фильтра?
7. Что значит осуществить нормирование по частоте; по сопротивлению? В чем сущность денормирования?
8. Дайте определение, какие фильтры называются полиномиальными.
9. Какая связь между порядком фильтра и числом реактивных элементов фильтра-прототипа?
10. Начертить графики зависимостей кривой ослабления и модуля передаточной функции от нормированной частоты  $\Omega$  для фильтра с плоской характеристикой (фильтра Баттерворта). Каково влияние на него порядка фильтра  $n$ ?
11. То же для фильтра с равноволновой характеристикой (фильтра Чебышева) в полосе пропускания для  $n$  четных и нечетных.
12. В чем состоит сущность преобразования частоты? Как перейти от НЧ-прототипа к фильтру ВЧ? К полосовому фильтру?
13. Какие ПФ называются фильтрами с геометрически симметричной характеристикой?
14. Какова связь между средней и граничными частотами ПФ?
15. Как вычисляются частота среза ФНЧ-прототипа и частоты среза ПФ?
16. Начертить графики ослабления  $LC$  ПФ с плоской и с равноволновой характеристикой ослабления в полосе пропускания для фильтров Баттерворта и Чебышева.
17. Какие фильтры называются активными? Из каких элементов состоит ARC-фильтр?
18. Какова методика расчета ARC-ФНЧ высокого порядка?
19. Каковы достоинства и недостатки ARC-фильтров в сравнении с пассивными  $LC$ -фильтрами?

## Литература

1. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.: Связь, 1967. - 544с.
2. Атабеков Г. И., Теоретические основы электротехники (в 3 частях). Ч.1: Линейные электрические цепи. М.: Энергия, 1978. - 592с.
3. Шебес М.Р., Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высш. шк., 1982. - 488с.
4. Альбац М.Е. Справочник по расчету фильтров и линий задержки. - М.: Госэнергоиздат, 1963. -200 с.
5. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. – М.: Высш. шк., 1976. - 208с.
6. Хьюлсман Л.П. Активные фильтры. – М.: Мир, 1972. - 516с.
7. Хьюлсман Л.П. Теория и расчет активных RC-цепей. – М.: Связь, 1973. - 240с.
8. Справочник по расчету и проектированию ARC-схем под ред. А.А.Ланнэ. М.: Радио и связь, 1984.
9. Воробиенко П.П. Теория линейных электрических цепей. (Учебное пособие для вузов). Сборник задач и упражнений. – М.: Радио и связь, 1989. - 328 с.

## Содержание

Предисловие.....	3
1. Задания на курсовую работу.....	4
2. Методические указания к расчету фильтров.....	9
2.1. Основы теории фильтров.....	9
2.1.1. Частотная классификация фильтров.....	9
2.1.2. Нагрузка фильтров.....	10
2.1.3. Нормирование.....	10
2.1.4. Денормирование.....	11
2.1.5. Полиномиальные фильтры.....	11
2.1.5.1. Фильтры Баттерворта.....	11
2.1.5.2. Фильтры Чебышева.....	13
2.2. Порядок расчета полиномиальных LC фильтров табличным методом.....	14
2.3. Полиномиальные ARC - фильтры на базе ИНУН.....	17
2.4. Синтез ARC ФНЧ второго порядка.....	17
2.4.1. Синтез ARC ФНЧ второго порядка по Баттерворту.....	18
2.4.2. Синтез ARC ФНЧ второго порядка по Чебышеву.....	19
2.5. Каскадный синтез полиномиальных ARC ФНЧ высокого порядка.....	20
3. Примеры расчета электрических фильтров.....	21
3.1. Расчет LC ФВЧ Баттерворта.....	21
3.2. Расчет LC ФВЧ Чебышева.....	24
3.3. Расчет LC ПФ Баттерворта.....	26
3.4. Расчет LC ПФ Чебышева.....	28
3.5. Расчет ARC ФНЧ Баттерворта.....	31
3.6. Расчет ARC ФНЧ Чебышева.....	34
Приложение П.1. Таблицы нормированных элементов ФНЧП.....	38
Таблица П.1.1. Нормированные LC элементы ФНЧП Баттерворта.....	38
Таблица П.1.2. Нормированные LC элементы ФНЧП Чебышева.....	38
Приложение П.2. Применение Excel для расчёта ЭФ.....	39
П.2.1. Ввод формул.....	39
П.2.2. Методика построения графиков функции $y=f(x)$ .....	39
П.2.3. Определение порядка $n$ и ослабления $A(\Omega)$ ФНЧП Баттерворта и Чебышева на фиксированной нормированной частоте $\Omega$ .....	41
П.2.4. Расчёт и построение графика $A(f)$ LC ФВЧ Баттерворта.....	42
П.2.5. Расчёт и построение графика $A(f)$ LC ФВЧ Чебышева.....	43
П.2.6. Расчёт и построение графика $A(f)$ LC ПФ Баттерворта.....	44
П.2.7. Расчёт и построение графика $A(f)$ LC ПФ Чебышева.....	45
П.2.8. Расчёт и построение графика $A(f)$ ARC ФНЧ Баттерворта.....	46
П.2.9. Расчёт и построение графика $A(f)$ ARC ФНЧ Чебышева.....	47
Вопросы для подготовки к защите курсовой работы.....	48
Литература.....	49

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО КУРСУ  
**«ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»**

для студентов специального заочного образования,  
обучающихся по направлениям 5222200 «Телекоммуникация» и  
5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)».

Составители: Белова Л.Н., Козлов В.А.

Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ТЭЦ  
Протокол № 22 от 11.02.2008

Ответственный редактор д.ф-м.н., профессор Арипов Х.К.

Корректор: Яковлева Т.М.