

Министерство науки и образования
Российской Федерации
Новосибирский государственный технический
университет

Кафедра ТОР
Лаборатория IV-238
Теоретические основы радиотехники

ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №2
«Типовые фильтры и их характеристики»

Факультет: РЭФ
Группа: РЭЗ-32
Студент: Гусейнов Э.Т.
Преподаватель: Зотов Л.Г.
Дата выполнения: 05.03.26
Отметка о защите:

Новосибирск 2026

1. Цель работы

Исследование воздействия детерминированных колебаний на фильтры нижних и верхних частот, а также на полосовой фильтр.

2. Предварительное задание

Предварительное задание выполняется для стенда №4 исходя из порядкового номера студента по списку учебной группы. Исходные данные:

RC-фильтр: $C = 800 \text{ пФ}$ $R = 99 \text{ кОм}$

RLC-фильтр: $C = 8.8 \text{ нФ}$ $L = 1.45 \text{ мГн}$ $R_{\text{п}} = 41 \text{ Ом}$ $R_{\text{ш}} = 7 \text{ кОм}$

2.1 RC-фильтры

2.1.1 Постоянная времени и граничная частота

Постоянная времени:

$$\tau = RC = 99 \cdot 10^3 \cdot 800 \cdot 10^{-12} = 7.92 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 79.2 \text{ мкс}$$

Граничная частота:

$$f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi \cdot 7.92 \cdot 10^{-5}} \approx 2.01 \text{ кГц}$$

2.1.2 АЧХ и ФЧХ RC-фильтров

АЧХ и ФЧХ определяются выражениями:

- Фильтр нижних частот (ФНЧ):

$$K_{\text{ФНЧ}}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\text{гр}})^2}}, \quad \varphi_{\text{ФНЧ}}(f) = -\arctg\left(\frac{f}{f_{\text{гр}}}\right)$$

- Фильтр верхних частот (ФВЧ):

$$K_{\text{ФВЧ}}(f) = \frac{f/f_{\text{гр}}}{\sqrt{1 + (f/f_{\text{гр}})^2}}, \quad \varphi_{\text{ФВЧ}}(f) = \arctg\left(\frac{f_{\text{гр}}}{f}\right)$$

В табл. 1 приведены расчётные значения для интервала частот $0 \dots 10f_{\text{гр}}$.

Таблица 1. Расчётные значения АЧХ и ФЧХ RC-фильтров

f , кГц	$K_{\Phi\text{НЧ}}$	$\varphi_{\Phi\text{НЧ}}$, °	$K_{\Phi\text{ВЧ}}$	$\varphi_{\Phi\text{ВЧ}}$, °
0	1.00	0	0	90
1.0	0.89	−26.6	0.45	63.4
2.01	0.707	−45.0	0.707	45.0
4.0	0.45	−63.4	0.89	26.6
6.0	0.32	−71.6	0.95	18.4
10.0	0.20	−78.7	0.98	11.3
20.0	0.10	−84.3	0.995	5.7

2.1.3 Переходные характеристики

Переходные характеристики RC-фильтров:

$$h_{\Phi\text{НЧ}}(t) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad h_{\Phi\text{ВЧ}}(t) = e^{-t/\tau}.$$

Время окончания переходного процесса (уровни 0,95 для ФНЧ и 0,05 для ФВЧ):

$$t_y = 3\tau = 237.6 \text{ мкс.}$$

В табл. 2 приведены расчётные значения.

Таблица 2. Расчётные значения переходных характеристик RC-фильтров

t , мкс	$h_{\Phi\text{НЧ}}$	$h_{\Phi\text{ВЧ}}$
0	0	1.000
40	0.395	0.605
79.2	0.632	0.368
120	0.779	0.221
160	0.867	0.133
200	0.920	0.080
237.6	0.950	0.050

2.1.4 Коэффициент прямоугольности ФНЧ

Ширина полосы по уровню 0,707:

$$\Delta f_{0.707} = f_{\text{гр}} = 2.01 \text{ кГц.}$$

Ширина полосы по уровню 0,1:

$$\Delta f_{0.1} = f_{\text{гр}} \sqrt{\frac{1}{0.1^2} - 1} = f_{\text{гр}} \sqrt{99} \approx 2.01 \cdot 9.95 = 20.0 \text{ кГц.}$$

Коэффициент прямоугольности:

$$K_{\text{п}0.1} = \frac{\Delta f_{0.1}}{\Delta f_{0.707}} = \sqrt{99} \approx 9.95.$$

2.1.5 Параметры RC-фильтров для таблицы 2.3

В табл. 3 сведены рассчитанные параметры RC-фильтров.

Таблица 3. Параметры RC-фильтров (к табл. 2.3)

Фильтр	$f_{гр}$, кГц	$\varphi_{гр}$, град	τ , мкс	t_y , мкс	$K_{п0.1}$
ФНЧ (расчёт) ФНЧ (эксперимент)	2.01	-45	79.2	238	9.95
ФВЧ (расчёт) ФВЧ (эксперимент)	2.01	+45	79.2	238	—

2.2 RLC-фильтр (параллельный колебательный контур)

2.2.1 Основные параметры контура

Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.45 \cdot 10^{-3} \cdot 8.8 \cdot 10^{-9}}} \approx 44.56 \text{ кГц.}$$

Характеристическое сопротивление:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1.45 \cdot 10^{-3}}{8.8 \cdot 10^{-9}}} \approx 405.9 \text{ Ом.}$$

2.2.2 Контур без шунта

Добротность:

$$Q = \frac{\rho}{R_{\Pi}} = \frac{405.9}{41} \approx 9.90.$$

Полоса пропускания:

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q} = \frac{44.56}{9.90} \approx 4.50 \text{ кГц.}$$

Граничные частоты:

$$f_{гр.н} = f_0 - \frac{f_0}{2Q} = 44.56 - 2.25 = 42.31 \text{ кГц,} \quad f_{гр.в} = f_0 + \frac{f_0}{2Q} = 44.56 + 2.25 = 46.81 \text{ кГц}$$

Фазовый сдвиг на граничных частотах:

$$\varphi(f_{гр.н}) = +45^\circ, \quad \varphi(f_{гр.в}) = -45^\circ.$$

Резонансное сопротивление:

$$Z_p = Q\rho = 9.90 \cdot 405.9 \approx 4018 \text{ Ом.}$$

Коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{R_{\Pi}}{2L} = \frac{41}{2 \cdot 1.45 \cdot 10^{-3}} \approx 14140 \text{ рад/с.}$$

Постоянная времени контура:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{1}{\alpha} \approx 70.7 \text{ мкс.}$$

Время установления переходного процесса:

$$t_y = 3\tau_{\text{к}} \approx 212 \text{ мкс.}$$

Напряжение на контуре при $I_m = 1 \text{ мА}$:

$$U_{\text{вых}} = I_m Z_p = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 4018 = 4.02 \text{ В.}$$

Ток для получения $U_{\text{вых}}(f_0) = 1 \text{ В}$:

$$I_{m \text{ н}} = \frac{1}{Z_p} \approx 0.249 \text{ мА.}$$

Амплитуда импульсов тока для наблюдения нормированной переходной характеристики ($U_{\text{уст}} = 1 \text{ В}$):

$$I_{m \text{ п}} = I_{m \text{ н}} = 0.249 \text{ мА.}$$

2.2.3 Контур с шунтом $R_{\text{ш}} = 7 \text{ кОм}$

Вносимое сопротивление:

$$R_{\text{вн}} = \frac{\rho^2}{R_{\text{ш}}} = \frac{405.9^2}{7000} \approx 23.5 \text{ Ом.}$$

Добротность:

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\rho}{R_{\text{п}} + R_{\text{вн}}} = \frac{405.9}{41 + 23.5} \approx 6.29.$$

Полоса пропускания:

$$2\Delta f_{0.7}^{\text{ш}} = \frac{f_0}{Q_{\text{ш}}} = \frac{44.56}{6.29} \approx 7.08 \text{ кГц.}$$

Граничные частоты:

$$f_{\text{гр.н}}^{\text{ш}} = f_0 - \frac{f_0}{2Q_{\text{ш}}} = 44.56 - 3.54 = 41.02 \text{ кГц}, \quad f_{\text{гр.в}}^{\text{ш}} = f_0 + \frac{f_0}{2Q_{\text{ш}}} = 44.56 + 3.54 = 48.10 \text{ кГц.}$$

Фазовый сдвиг на граничных частотах также равен $\pm 45^\circ$.

Резонансное сопротивление с шунтом:

$$Z_p^{\text{ш}} = \frac{Z_p R_{\text{ш}}}{Z_p + R_{\text{ш}}} = \frac{4018 \cdot 7000}{4018 + 7000} \approx 2553 \text{ Ом}.$$

Коэффициент затухания:

$$\alpha_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{ш}} + R_{\text{вн}}}{2L} = \frac{64.5}{2 \cdot 1.45 \cdot 10^{-3}} \approx 22240 \text{ рад/с}.$$

Постоянная времени:

$$\tau_{\text{к}}^{\text{ш}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ш}}} \approx 44.9 \text{ мкс}.$$

Время установления:

$$t_{\text{у}}^{\text{ш}} = 3\tau_{\text{к}}^{\text{ш}} \approx 135 \text{ мкс}.$$

Напряжение на контуре при $I_m = 1 \text{ мА}$:

$$U_{\text{вых}}^{\text{ш}} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2553 = 2.55 \text{ В}.$$

Ток для получения $U_{\text{вых}}^{\text{ш}}(f_0) = 1 \text{ В}$:

$$I_{m\text{н}}^{\text{ш}} = \frac{1}{Z_p^{\text{ш}}} \approx 0.392 \text{ мА}.$$

Амплитуда импульсов тока для наблюдения нормированной переходной характеристики:

$$I_{m\text{п}}^{\text{ш}} = I_{m\text{н}}^{\text{ш}} = 0.392 \text{ мА}.$$

2.2.4 Нормированные резонансные кривые

Нормированная резонансная характеристика:

$$n(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{f-f_0}{f_0}\right)^2}}, \quad n_{\text{ш}}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q_{\text{ш}} \frac{f-f_0}{f_0}\right)^2}}.$$

В табл. 4 приведены значения для нескольких частот.

Таблица 4. Нормированные резонансные кривые контура

$f, \text{ кГц}$	$\xi = 2Q \frac{f-f_0}{f_0}$	$n(f)$	$n_{\text{ш}}(f)$
40.0	-2.03	0.443	0.614
42.31	-1.00	0.708	0.845
44.56	0	1.000	1.000
46.81	+1.00	0.706	0.844
49.0	+1.97	0.452	0.623
41.02	-1.57	0.537	0.708
48.10	+1.58	0.536	0.707

2.2.5 ФЧХ контура

ФЧХ описывается выражением:

$$\varphi(f) = -\arctg\left(2Q \frac{f-f_0}{f_0}\right) \text{ (рад)}.$$

Значения на граничных частотах уже приведены выше.

2.2.6 Нормированные переходные характеристики

При воздействии единичного скачка тока нормированная переходная характеристика имеет вид:

$$h_{\text{н}}(t) \approx e^{-\alpha t} \sin(2\pi f_0 t).$$

Время установления соответствует затуханию огибающей до уровня 0,05 и уже вычислено.

2.2.7 Сводная таблица параметров RLC-фильтра

В табл. 5 сведены все рассчитанные параметры (соответствует табл. 2.4).

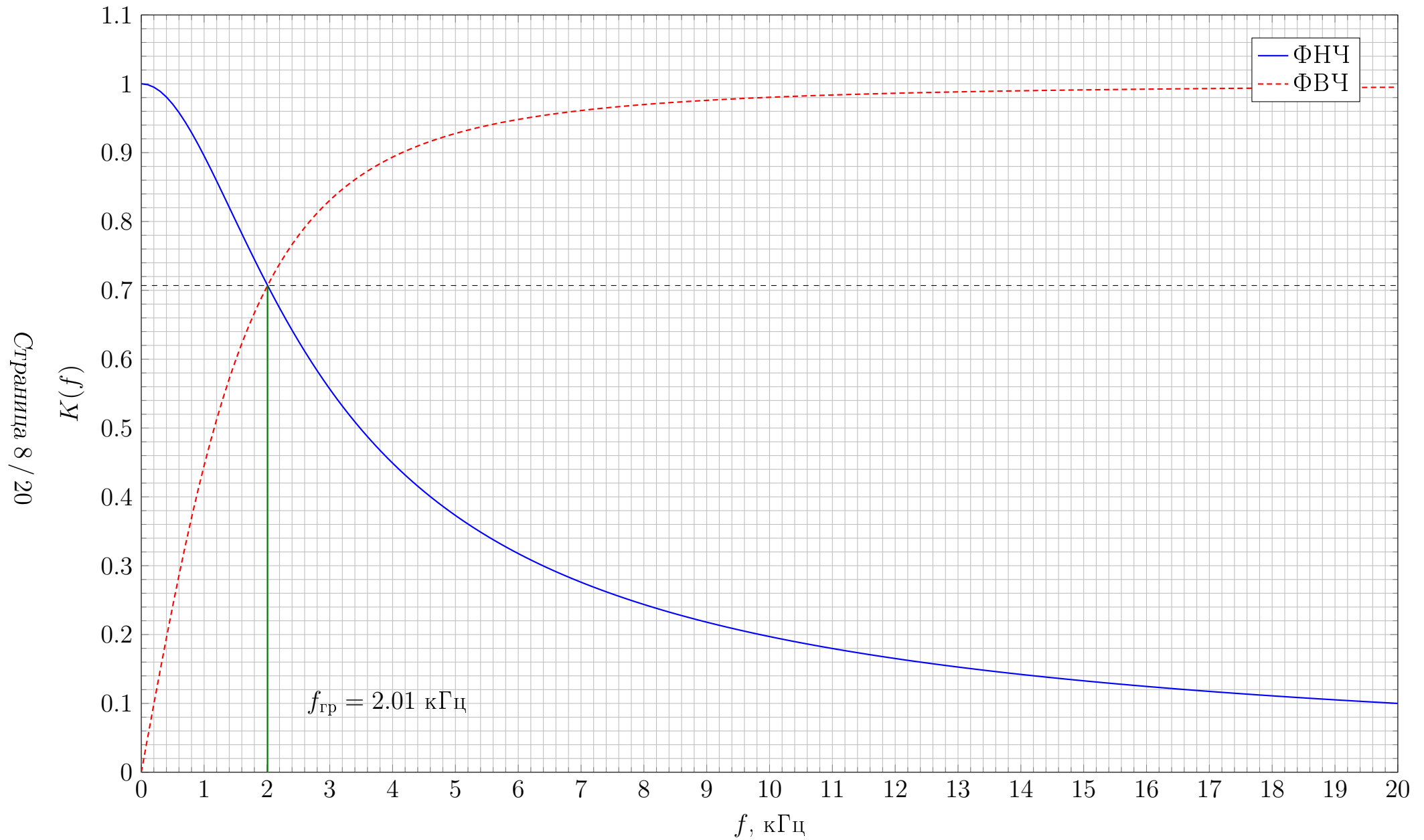
Таблица 5. Расчётные параметры RLC-фильтра (к табл. 2.4)

Параметр	Без шунта	С шунтом
f_0 , кГц	44.56	44.56
ρ , Ом	406	406
$R_{\text{вн}}$, Ом	—	23.5
Q	9.90	6.29
$2\Delta f_{0.7}$, кГц	4.50	7.08
$\varphi(f_{\text{гр.н}})$, °	+45	+45
$\varphi(f_{\text{гр.в}})$, °	−45	−45
Z_p , Ом	4018	2553
α , рад/с	14140	22240
τ_k , мкс	70.7	44.9
t_y , мкс	212	135
$U_{\text{вых}}$ при $I_m = 1$ мА, В	4.02	2.55
$I_{m\text{н}}$ (для 1 В), мА	0.249	0.392
$I_{m\text{п}}$, мА	0.249	0.392

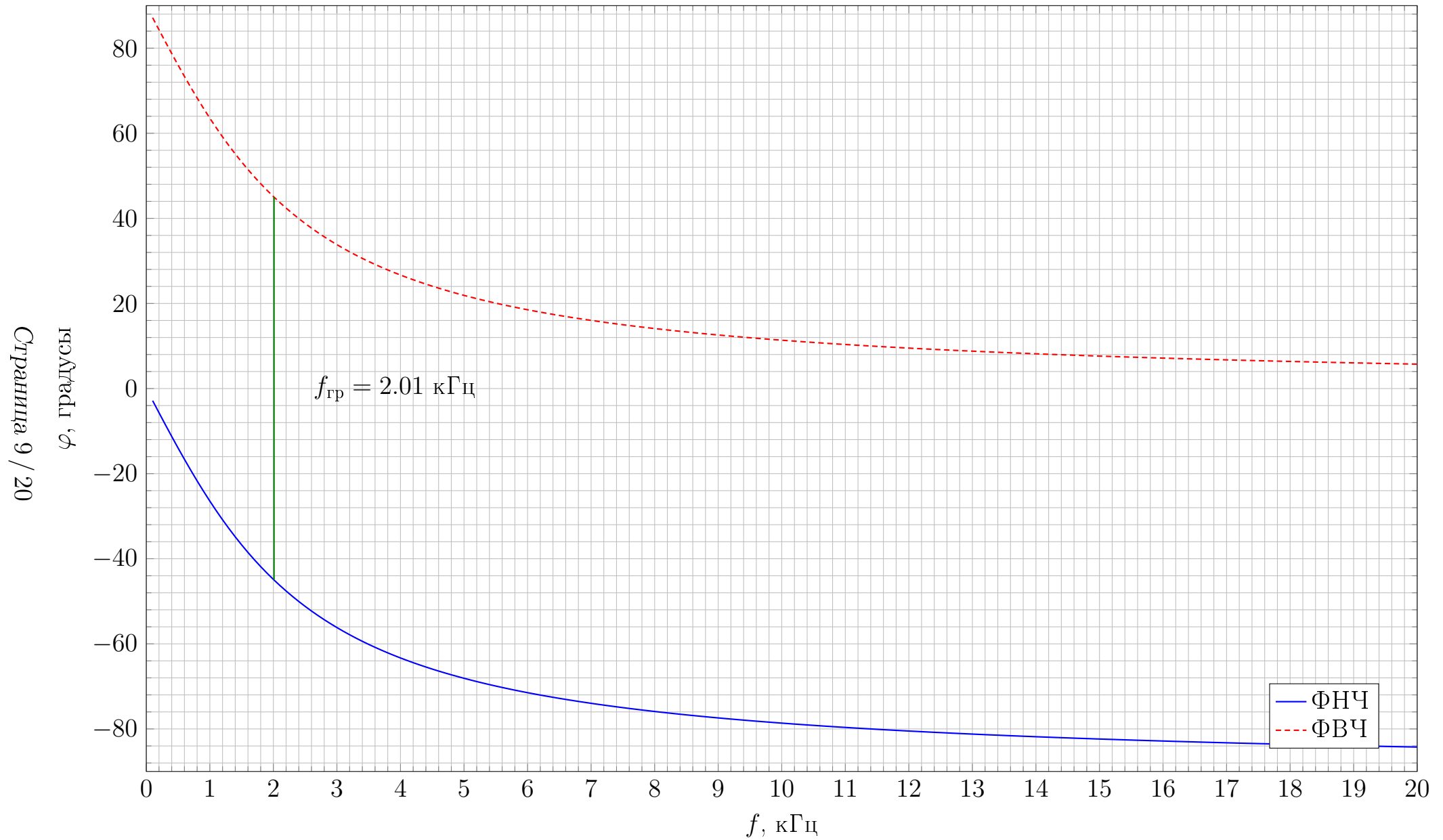
Таблица 6. Экспериментальные параметры RLC-фильтра (к табл. 2.4)

Параметр	Без шунта	С шунтом
f_0 , кГц		
ρ , Ом		
$R_{\text{вн}}$, Ом	—	
Q		
$2\Delta f_{0.7}$, кГц		
$\varphi(f_{\text{гр.н}})$, °		
$\varphi(f_{\text{гр.в}})$, °		
Z_p , Ом		
α , рад/с		
τ_k , мкс		
t_y , мкс		
$U_{\text{вых}}$ при $I_m = 1$ мА, В		
$I_{m\text{н}}$ (для 1 В), мА		
$I_{m\text{п}}$, мА		

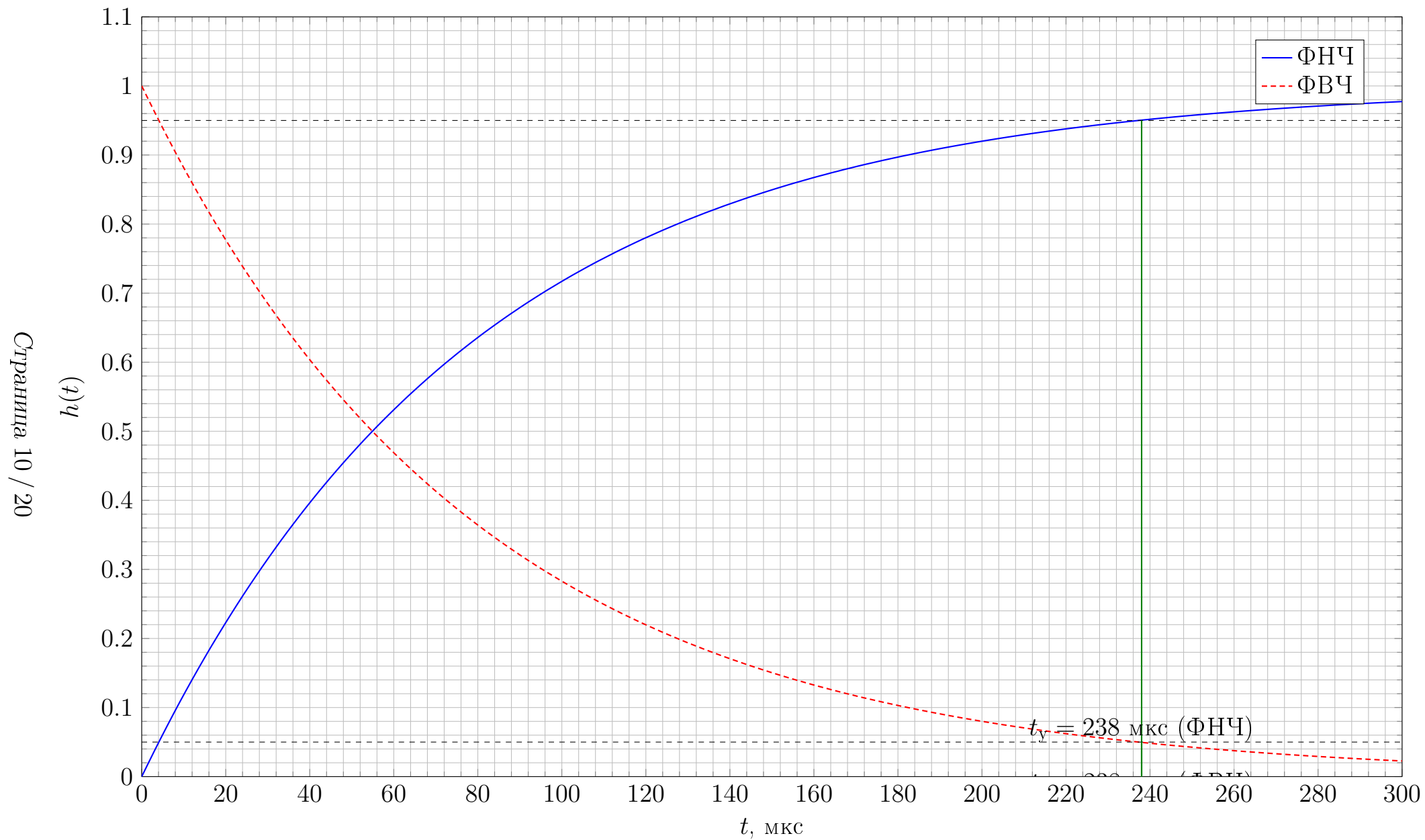
АЧХ RC-фильтров (ФНЧ и ФВЧ)



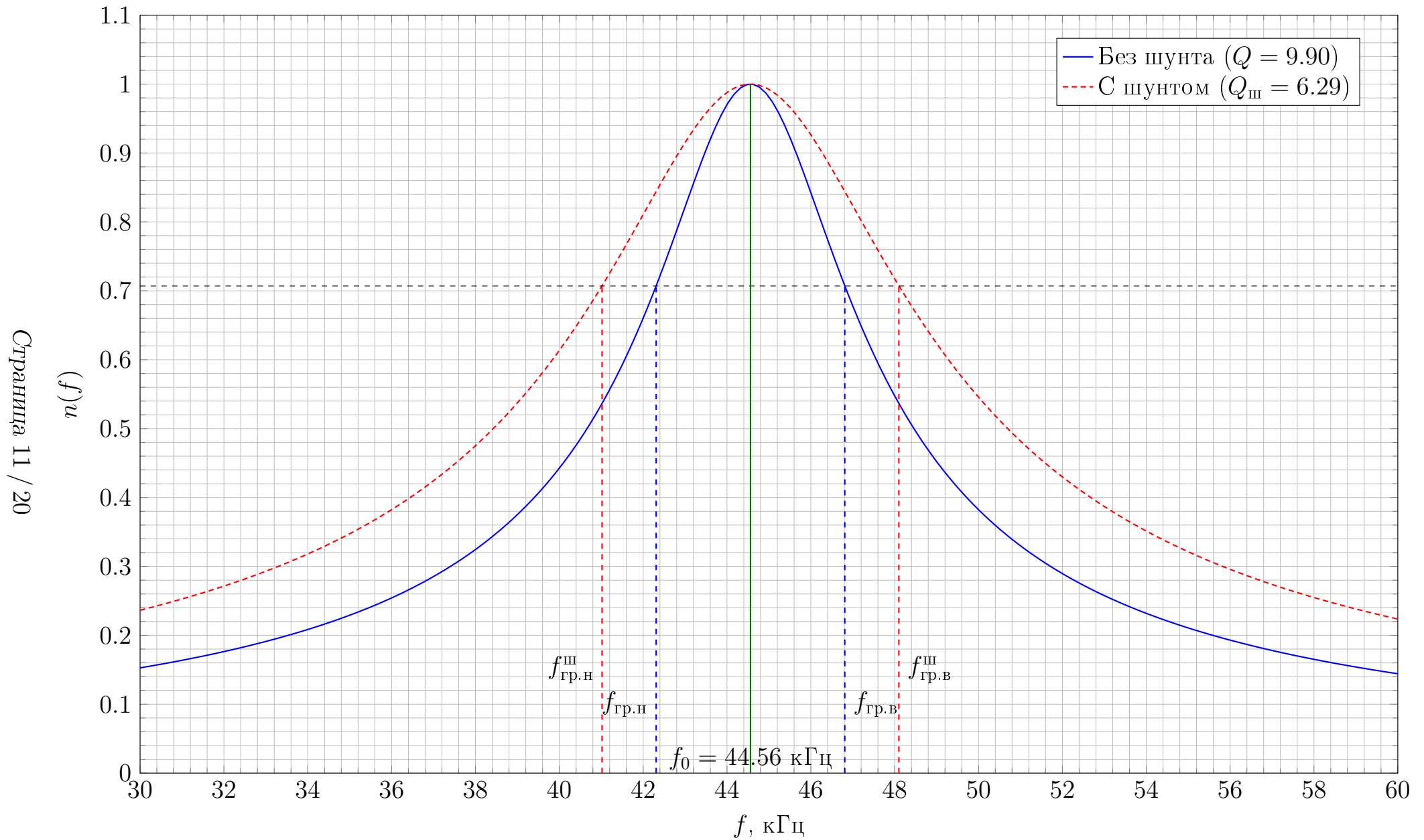
ФЧХ RC-фильтров (ФНЧ и ФВЧ)



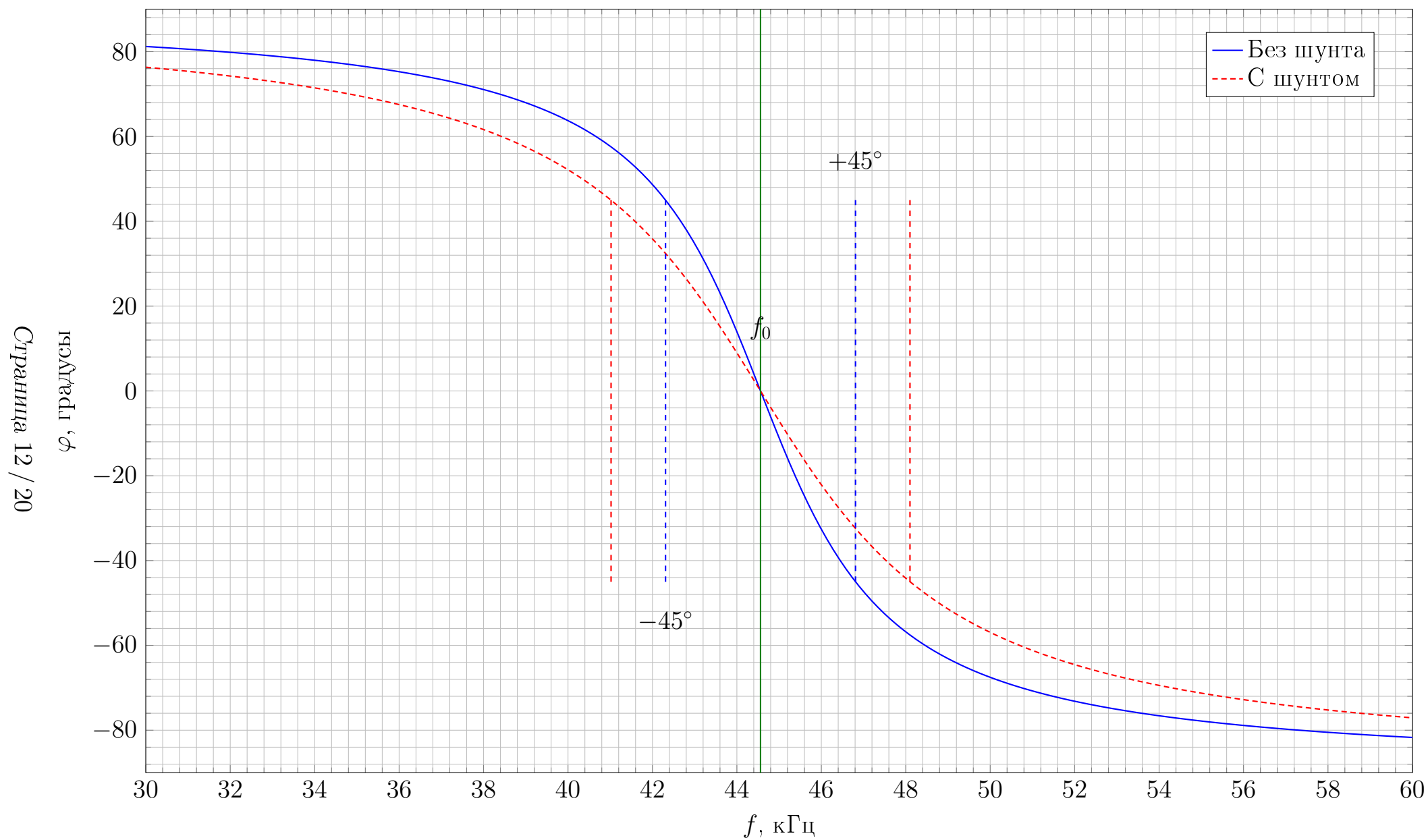
Переходные характеристики RC-фильтров



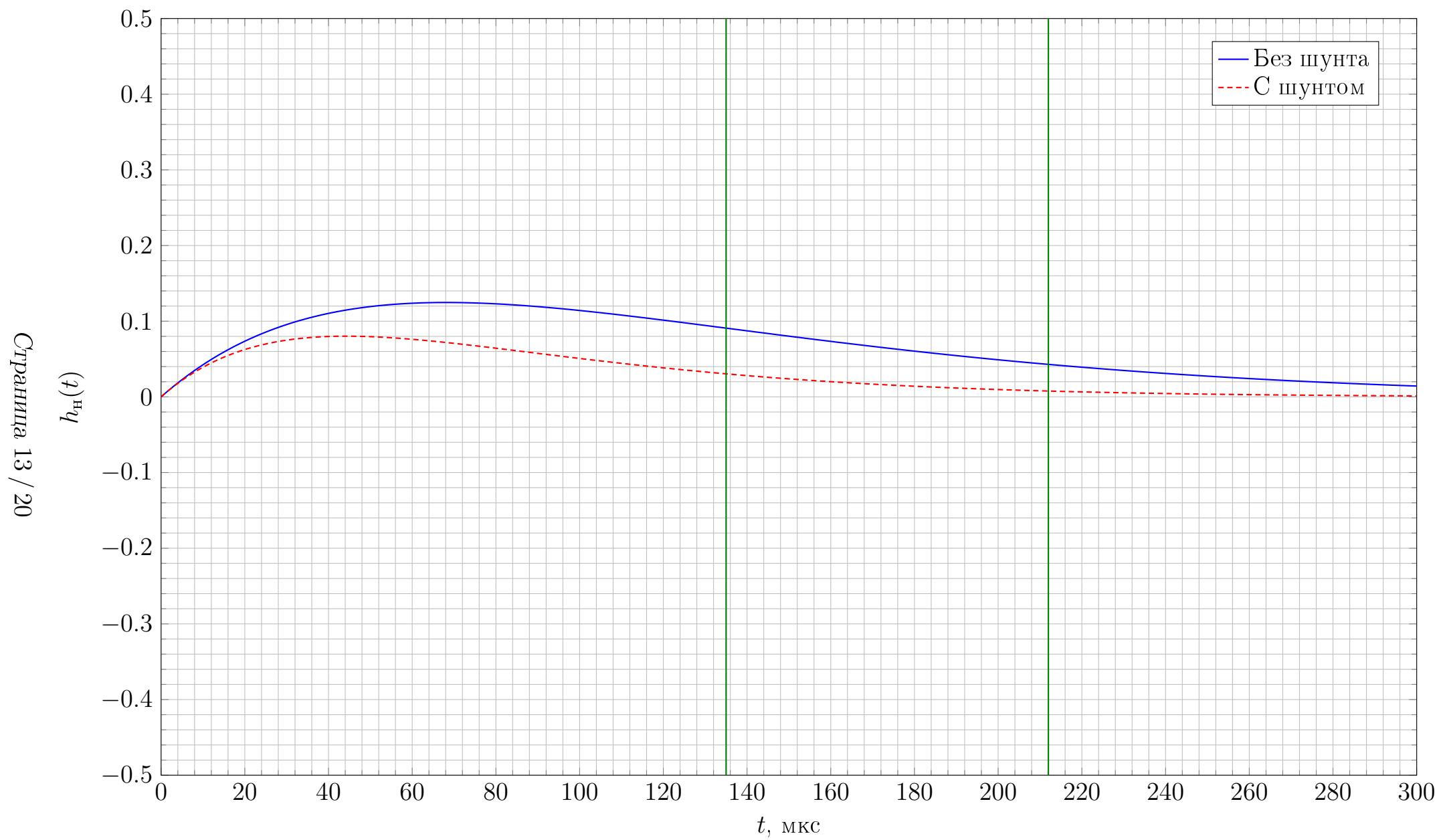
Нормированные резонансные кривые параллельного контура



ФЧХ параллельного контура



Нормированные переходные характеристики контура



3. Контрольные вопросы

1. **Что такое АЧХ? С помощью каких приборов можно измерить АЧХ?**

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — это зависимость модуля комплексного коэффициента передачи цепи от частоты. АЧХ показывает, как изменяется амплитуда гармонического сигнала при прохождении через цепь. Для измерения АЧХ можно использовать:

- измеритель амплитудно-частотных характеристик (например, построитель частотных характеристик ХВР1 в Multisim);
- генератор гармонических колебаний и вольтметр (измеряя выходное напряжение при изменении частоты);
- анализатор спектра (при подаче широкополосного сигнала).

2. **Изобразите качественно АЧХ RC-фильтра нижних частот, верхних частот, полосового RLC-фильтра. Сравните с АЧХ идеальных фильтров.**

На рисунке 1 приведены качественные графики АЧХ реальных и идеальных фильтров. Идеальные фильтры имеют прямоугольную форму (единичное усиление в полосе пропускания и нулевое — в полосе задерживания). Реальные фильтры обладают плавным спадом, конечной крутизной и неравномерностью в полосе пропускания.

3. **Можно ли использовать параллельный контур для построения режекторного фильтра? Предложите схему такого фильтра.**

Да, параллельный колебательный контур можно использовать для построения режекторного (заграждающего) фильтра, если включить его последовательно с нагрузкой. На резонансной частоте сопротивление контура максимально, поэтому падение напряжения на нём велико, а на нагрузке — минимально. Схема простейшего режекторного фильтра на основе параллельного контура показана на рис. 2.

4. **Что такое ФЧХ? Какой должна быть ФЧХ идеального (неискажающего) фильтра?**

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) — это зависимость аргумента комплексного коэффициента передачи цепи от частоты. Она показывает фазовый сдвиг, который приобретает гармонический сигнал при прохождении через цепь. Для неискажающей передачи сигнала (без фазовых искажений) ФЧХ должна быть линейной в полосе частот, занимаемой сигналом. Линейная ФЧХ обеспечивает одинаковое временное запаздывание для всех гармонических составляющих.

5. **Какие искажения называются линейными? Почему они возникают?**

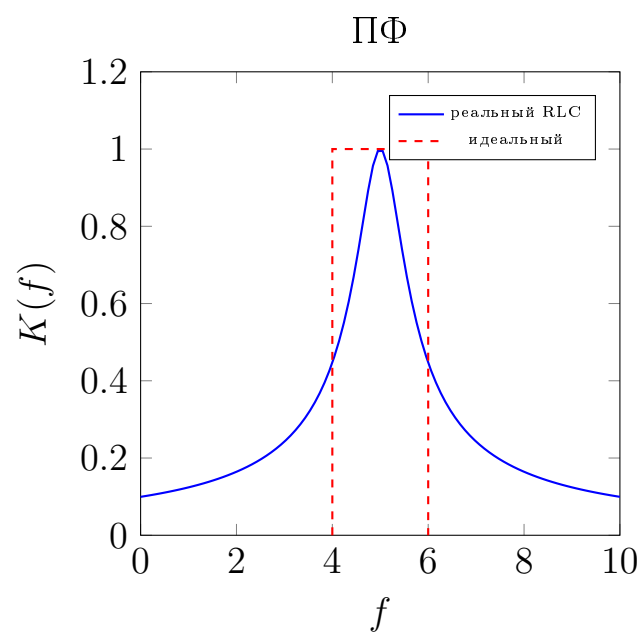
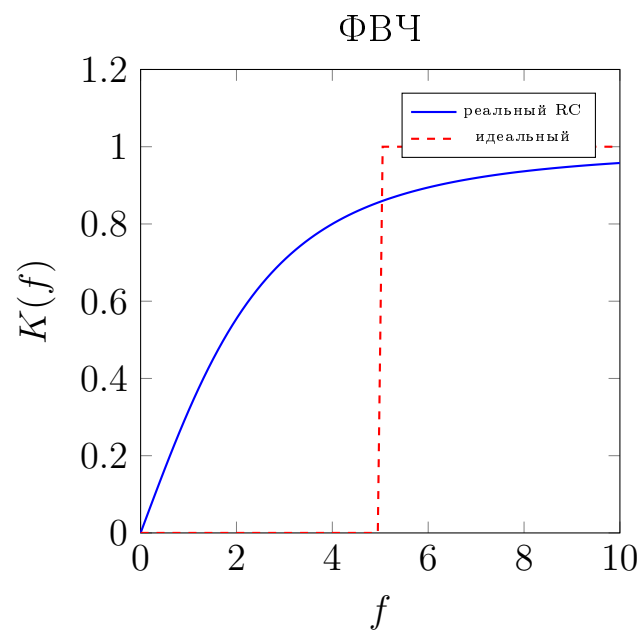
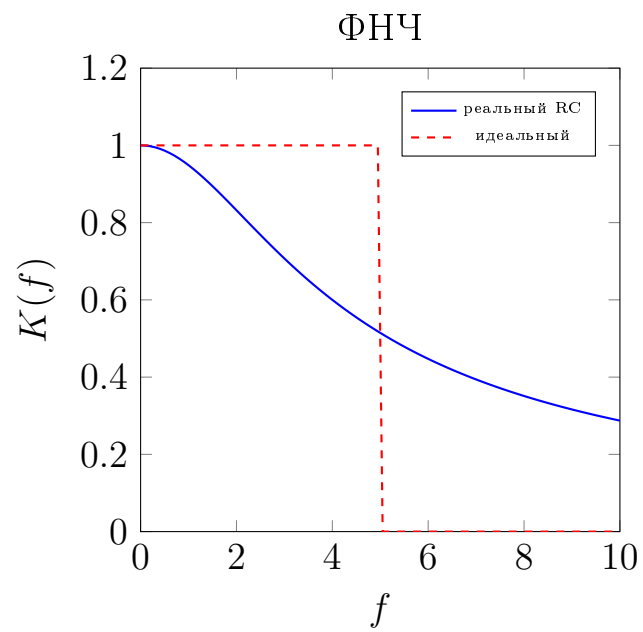


Рис. 1: Сравнение АЧХ реальных и идеальных фильтров

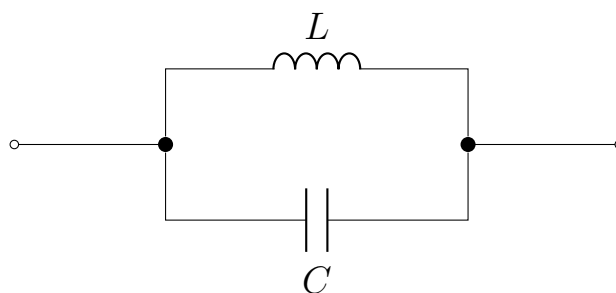


Рис. 2: Схема простейшего режекторного фильтра на основе параллельного LC-контура

Линейные искажения — это искажения формы сигнала, вызванные неидеальностью частотных характеристик линейной цепи (непостоянством АЧХ и нелинейностью ФЧХ в полосе частот сигнала). Они возникают потому, что различные спектральные компоненты сигнала ослабляются и сдвигаются по фазе по-разному, что приводит к изменению формы сигнала на выходе.

6. Изобразите ФЧХ RC-фильтра нижних частот, верхних частот, полосового RLC-фильтра.

Качественные графики ФЧХ приведены на рис. 3.

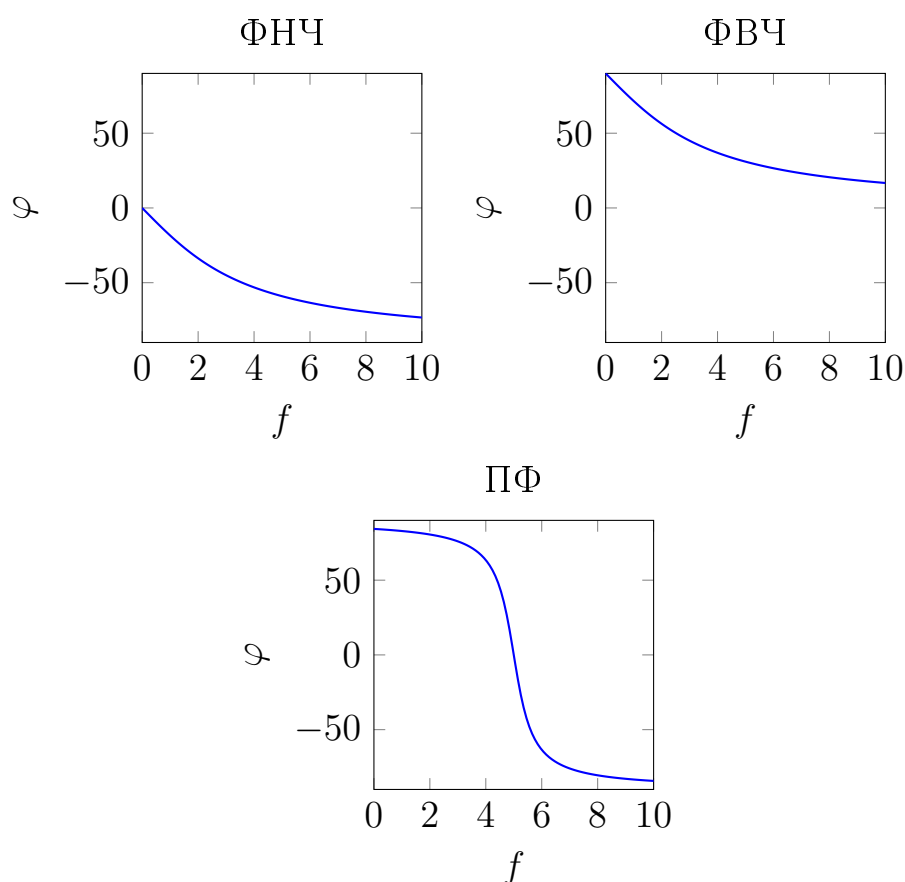


Рис. 3: ФЧХ реальных фильтров

7. Что такое полоса пропускания и полоса задерживания?

Полоса пропускания — диапазон частот, в котором АЧХ фильтра не меньше некоторого заданного уровня (обычно $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ от максимального значения). В этой полосе сигнал проходит с допустимым ослаблением. Полоса задерживания — диапазон частот, в котором АЧХ не превышает заданного малого уровня (например, 0,1 от максимума). Здесь сигнал подавляется.

8. Что такое граничные частоты? Чему они равны для RC-фильтров нижних и верхних частот?

Граничная частота $f_{\text{гр}}$ — это частота, на которой АЧХ уменьшается до уровня $1/\sqrt{2}$ от максимального значения. Для RC-фильтров первого порядка (как ФНЧ, так и ФВЧ) граничная частота определяется постоянной времени $\tau = RC$:

$$f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

9. Что происходит с формой АЧХ и ФЧХ RC-фильтров и RLC-фильтра при увеличении сопротивления R? Как при этом изменяются граничные частоты?

- Для RC-фильтров: увеличение R приводит к росту постоянной времени $\tau = RC$, следовательно, граничная частота $f_{\text{гр}} = 1/(2\pi RC)$ уменьшается. АЧХ и ФЧХ сжимаются по оси частот (становятся более низкочастотными).
- Для RLC-фильтра (параллельный контур): увеличение R (подразумевается $R_{\text{п}}$ — сопротивление потерь) уменьшает добротность $Q = \rho/R_{\text{п}}$, полоса пропускания $\Delta f = f_0/Q$ расширяется, а резонансный пик становится более пологим. Форма АЧХ и ФЧХ меняется (уменьшается крутизна).

10. Как изменятся АЧХ RC-фильтров и RLC-фильтра с уменьшением емкости конденсатора? Как изменятся при этом полосы пропускания?

Уменьшение ёмкости C :

- Для RC-фильтров: постоянная времени $\tau = RC$ уменьшается, поэтому граничная частота $f_{\text{гр}}$ увеличивается. АЧХ и ФЧХ растягиваются по оси частот в сторону высоких частот.
- Для RLC-фильтра: уменьшение C приводит к увеличению характеристического сопротивления $\rho = \sqrt{L/C}$ и росту резонансной частоты $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$. Добротность $Q = \rho/R_{\text{п}}$ также возрастает, полоса пропускания $\Delta f = f_0/Q$ может измениться (обычно уменьшается,

так как f_0 растёт, а Q растёт ещё быстрее). Резонансный пик становится более острым.

11. Что такое импульсная характеристика?

Импульсная характеристика (ИХ) $h(t)$ — это отклик линейной стационарной цепи на входное воздействие в виде дельта-функции $\delta(t)$. Она полностью описывает цепь во временной области и связана с комплексной частотной характеристикой преобразованием Фурье.

12. Изобразите импульсные характеристики ФНЧ, ФВЧ и ПФ.

Качественные графики импульсных характеристик приведены на рис. 4.

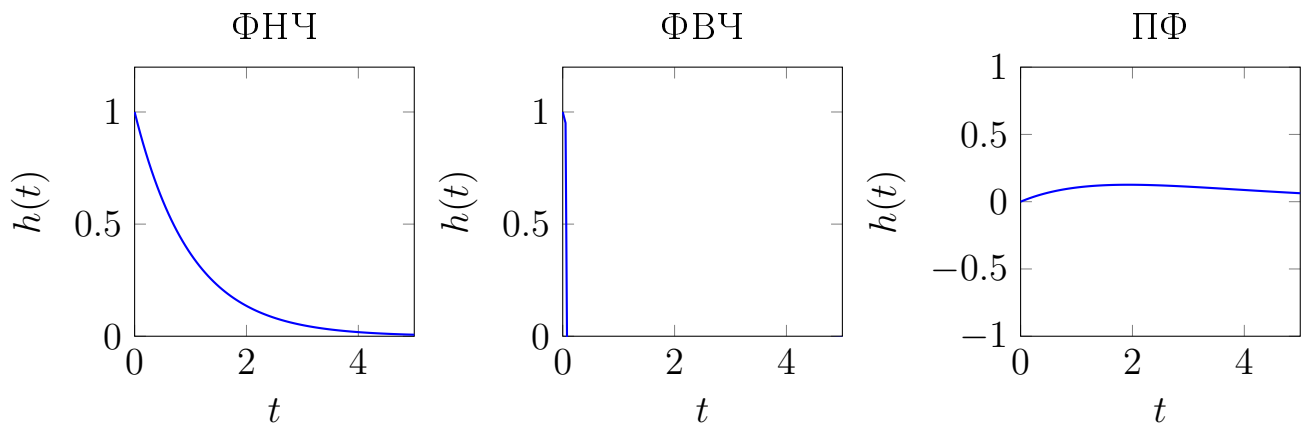


Рис. 4: Импульсные характеристики

13. Что такое переходная характеристика? Изобразите графики ПХ изучаемых в работе фильтров.

Переходная характеристика $g(t)$ — это отклик линейной стационарной цепи на единичное ступенчатое воздействие (функцию Хэвисайда). Она связана с импульсной характеристикой соотношением $g(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau$. Графики переходных характеристик для фильтров, исследованных в работе, представлены на рис. 5 (аналогично приведённым в предварительном задании, но здесь качественно).

14. Поясните влияние элементов схемы С, L, R на переходные характеристики ФНЧ, ФВЧ и ПФ.

- В RC-цепях постоянная времени $\tau = RC$ определяет скорость переходного процесса: чем больше τ , тем медленнее нарастает (ФНЧ) или спадает (ФВЧ) выходное напряжение.
- В RLC-контуре переходная характеристика представляет собой затухающую синусоиду. Параметры: R влияет на затухание (коэффициент $\alpha = R/(2L)$), L и C определяют резонансную частоту $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Увеличение R увеличивает затухание, колебания затухают быстрее; увеличение L или C уменьшает ω_0 и может изменить α .

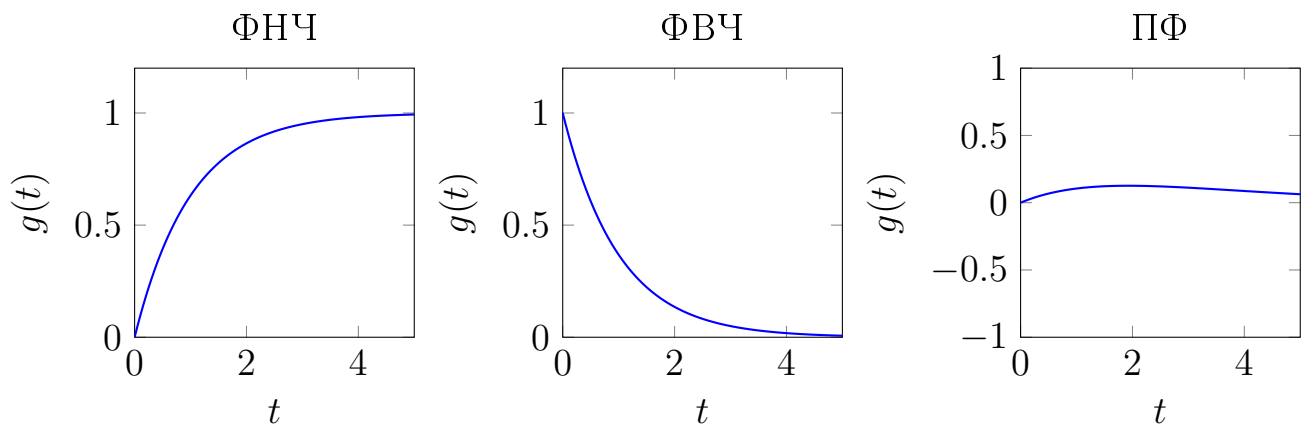


Рис. 5: Переходные характеристики

15. **Что такое время установления переходного процесса t_y и как оно связано с постоянной времени τ исследуемых цепей?**

Время установления t_y — это интервал времени, за который переходная характеристика достигает уровня, близкого к установившемуся значению (обычно 0,95 от него для ФНЧ и 0,05 для ФВЧ). Для цепей первого порядка (RC-фильтры) $t_y \approx 3\tau$. Для колебательного контура t_y примерно равно времени затухания огибающей до уровня 0,05 и связано с постоянной времени $\tau_k = 1/\alpha$ соотношением $t_y \approx 3\tau_k = 3 \cdot 2Q/\omega_0$.

16. **Изобразите реакции фильтров на прямоугольный импульс.**

Реакция на прямоугольный импульс (длительностью t_u) может быть получена как разность двух переходных характеристик, сдвинутых на t_u : $y(t) = g(t) - g(t - t_u)$. Качественно для ФНЧ выходной сигнал будет сглаженным, с затянутыми фронтами; для ФВЧ — с выбросами в начале и конце импульса (дифференцирование); для ПФ — затухающие колебания на частоте контура.

17. **Какова связь между импульсной характеристикой, переходной характеристикой и КЧХ цепи?**

Импульсная характеристика $h(t)$ и переходная характеристика $g(t)$ связаны интегро-дифференциальными соотношениями:

$$g(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau, \quad h(t) = \frac{dg(t)}{dt}.$$

Комплексная частотная характеристика $H(j\omega)$ является преобразованием Фурье импульсной характеристики:

$$H(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Таким образом, все три характеристики взаимно однозначно определяют друг друга.

18. Почему для измерения переходная характеристика удобнее импульсной?

Переходная характеристика удобнее для измерения, потому что сформировать достаточно близкое к идеальному ступенчатое воздействие (с малым временем нарастания) проще, чем дельта-импульс, который должен обладать бесконечно большой амплитудой и бесконечно малой длительностью. На практике ступенчатое воздействие реализуется с помощью генератора прямоугольных импульсов с достаточно большой длительностью (чтобы процесс установления завершился до окончания импульса).