

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный Исследовательский Университет ИТМО»



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
ПРЕДМЕТ «ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ»
ТЕМА «АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ
УСИЛИТЕЛЯХ»

Вариант №10

Преподаватель:
Жданов В. А.

Выполнил:
Румянцев А. А.

Факультет: СУиР
Группа: R3341
Поток: ЭлУСУ R22 бак 1.2

Санкт-Петербург
2025

Содержание

1	Цель работы	2
2	Исходные данные	2
2.1	Активные фильтры первого порядка	2
2.1.1	ФНЧ инвертирующий	2
2.1.2	ФВЧ неинвертирующий	2
2.2	Активные фильтры второго порядка	3
2.2.1	ФВЧ Салена-Ки	3
2.2.2	ПФ многопетлевая ОС	3
2.2.3	Режекторный фильтр с Т-мостом	4
3	Исследование активных фильтров первого порядка	4
3.1	Схема инвертирующего ФНЧ	4
3.2	ЛАФЧХ характеристика инв. ФНЧ	4
3.3	Схема неинвертирующего ФВЧ	5
3.4	ЛАФЧХ характеристика неинв. ФВЧ	5
4	Исследование активных фильтров второго порядка	6
4.1	ФВЧ Салена-Ки	6
4.2	ЛАФЧХ характеристика ФВЧ Салена-Ки	6
4.3	ПФ многопетлевая ОС	7
4.4	ЛАФЧХ характеристика ПФ многопетлевая ОС	7
4.5	Режекторный фильтр	8
4.6	ЛАФЧХ характеристика РФ с Т-мостом	9
5	Вывод	9

Цель работы

Цель работы – исследование схем активных фильтров.

Исходные данные

Операционный усилитель берем как в лабораторной работе №3 – LT1037.

Активные фильтры первого порядка

ФНЧ инвертирующий

Исходные данные ФНЧ инвертирующий

R_1 , Ом	R_2 , Ом	C_1 , нФ	K_U^*	f_{cp}^* , кГц
442.1	2650	10	6	6

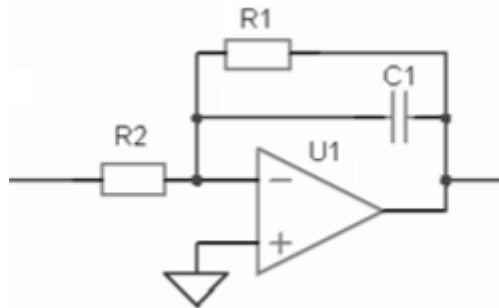


Рис. 1: Схема ФНЧ инвертирующий

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{2650}{442.1} \approx -6,$$
$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 2650 \cdot 10^{-8}} \approx 6 \text{ кГц};$$

ФВЧ неинвертирующий

Исходные данные ФВЧ неинвертирующий

R_1 , Ом	R_2 , кОм	R_3 , кОм	C_1 , нФ	K_U^*	f_{cp}^* , кГц
3180	1	4	10	5	5

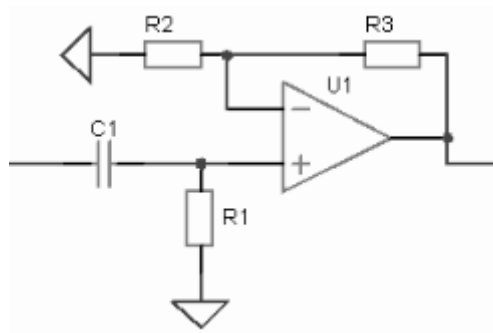


Рис. 2: Схема ФВЧ неинвертирующий

$$K_U = 1 + \frac{R_3}{R_2} = 1 + \frac{4000}{1000} = 5,$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 3180 \cdot 10^{-8}} \approx 5 \text{ кГц};$$

Активные фильтры второго порядка

ФВЧ Салена-Ки

Исходные данные ФВЧ Салена-Ки

C_1 , нФ	C_2 , нФ	R_1 , Ом	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	K_U^*	f_{cp}^* , кГц
100	100	292.2	0.8766	1	3	4	4

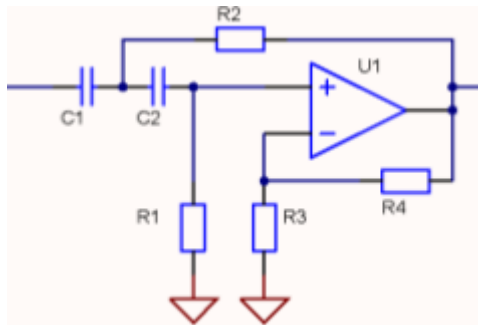


Рис. 3: Схема ФВЧ Салена-Ки

$$K_U = 1 + \frac{R_4}{R_3} = 1 + \frac{3}{1} = 4,$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(R_1 R_2 C_1 C_2)}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(292.2 \cdot 876.6 \cdot 10^{-14})}} \approx 3.145 \text{ кГц};$$

ПФ многопетлевая ОС

Исходные данные ПФ многопетлевая ОС

C_1 , нФ	C_2 , нФ	R_1 , Ом	R_2 , кОм	R_3 , кОм	K_U^*	f_{cp}^* , кГц	Δf^* , кГц
10	10	530.5	4.78	5.3	5	10	6

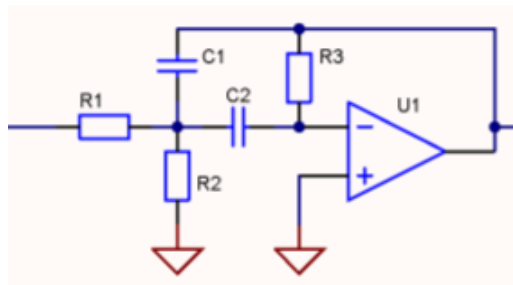


Рис. 4: Схема ПФ с многопетлевой обратной связью

$$K_U = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{5300}{530.5} \cdot \frac{10^{-8}}{2 \cdot 10^{-8}} = \frac{R_3}{2R_1} \approx 5,$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{5300 \cdot 10^{-16}} \left(\frac{1}{530.5} + \frac{1}{4780} \right)} \approx 10 \text{ кГц};$$

Режекторный фильтр с Т-мостом

Исходные данные для режекторного фильтра

C_1 , нФ	C_2 , нФ	C_3 , нФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , Ом	R_4 , кОм	R_5 , кОм
10	10	20	0.7958	0.7958	397.9	∞	0

K_U^*	f_{cp}^* , кГц	Δf^* , кГц
1	20	20

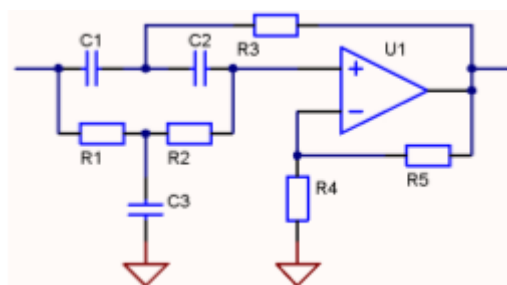


Рис. 5: Схема РФ с Т-мостом

$$K_U = 1 + \frac{R_5}{R_4} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1,$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 795.8 \cdot 10^{-8}} \approx 20 \text{ кГц};$$

Исследование активных фильтров первого порядка

Схема инвертирующего ФНЧ

Построим схему инвертирующего ФНЧ в LTspice

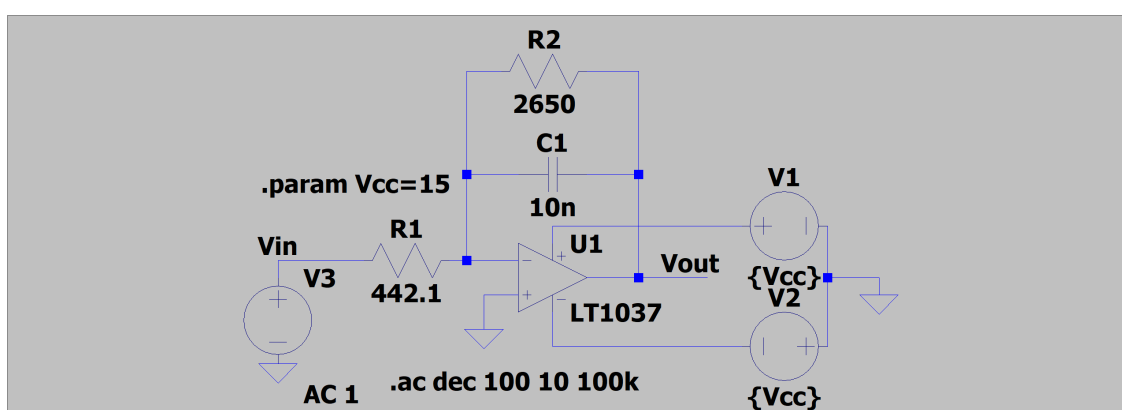


Рис. 6: Схема инвертирующего ФНЧ

ЛАФЧХ характеристика инв. ФНЧ

Зададим на входной сигнал AC 1 и снимем ЛАЧХ на выходе через .ac dec 100 10 100k (sweeper по частоте от 10 Гц до 100 кГц с 100 точками на декаду)

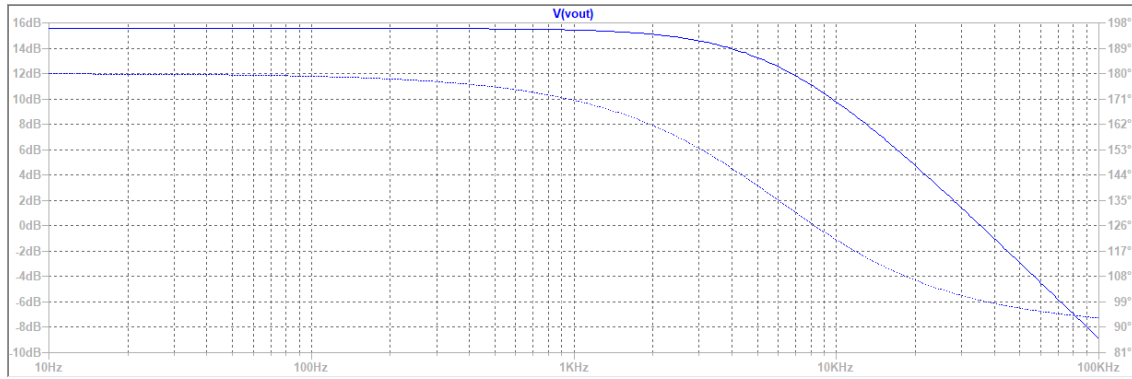


Рис. 7: ЛАФЧХ характеристика инвертирующего ФНЧ

Курсором снимем значения A_n дБ, A_{n-3} дБ, f_n дБ, f_{n-3} дБ, φ_n дБ, φ_{n-3} дБ, где $n - 3$ – амплитуда, на которой находится полоса пропускания фильтра

$$f_n \text{ дБ} = 10 \text{ Гц} : A_n \text{ дБ} = 15.554492 \text{ дБ}, \varphi_n \text{ дБ} = 179.90453^\circ;$$

$$f_{n-3} \text{ дБ} = 5.9961892 \text{ кГц} : A_{n-3} \text{ дБ} = 12.548454 \text{ дБ}, \varphi_{n-3} \text{ дБ} = 135.02205^\circ;$$

Имеем

$$\Delta A = 3.006038 \text{ дБ}, f_{n-3} \text{ дБ} = 5.9961892 \text{ кГц} \approx f_{\text{ср}}^* = 6 \text{ кГц};$$

То есть полоса пропускания

$$0 \leq f \leq 5.9961892 \text{ кГц}$$

Экспериментально полученная полоса пропускания фильтра совпадает с теоретически рассчитанной (см. $f_{\text{ср}}^*$ в табл. 2.1.1).

Схема неинвертирующего ФВЧ

Построим схему неинвертирующего ФВЧ в LTspice

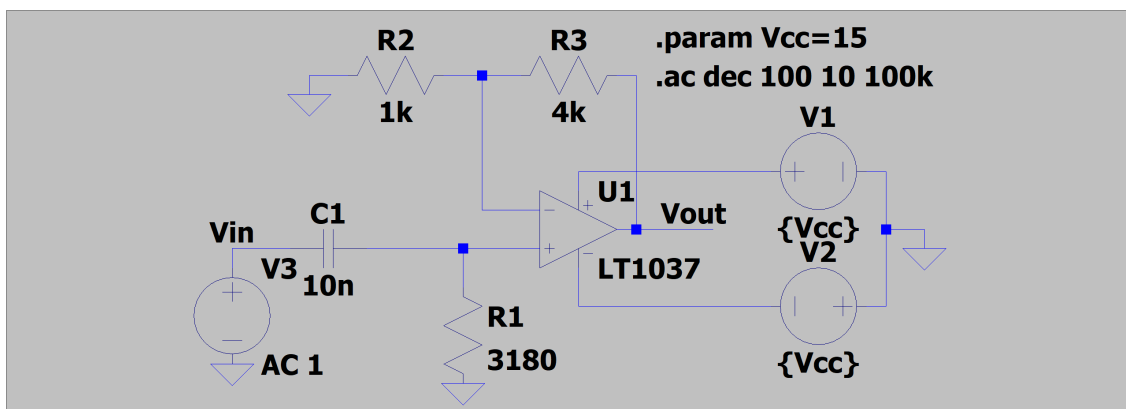


Рис. 8: Схема неинвертирующего ФВЧ

ЛАФЧХ характеристика неинв. ФВЧ

Аналогично найдем ЛАФЧХ характеристику фильтра

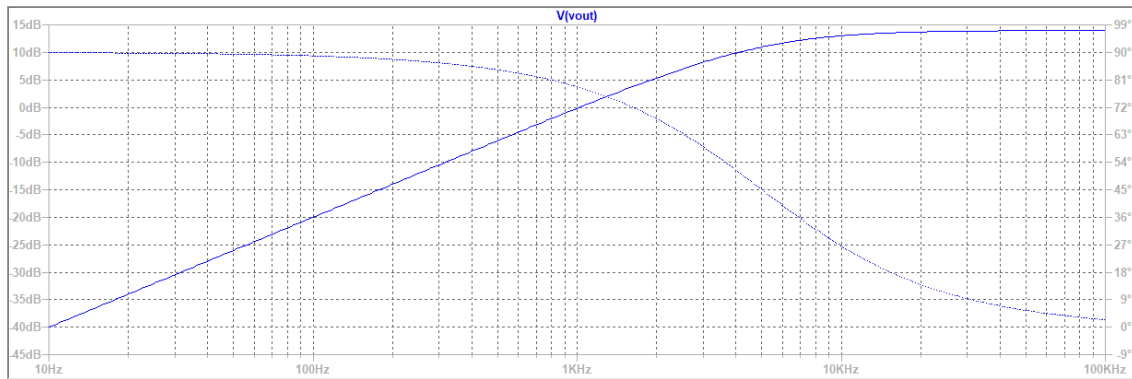


Рис. 9: ЛАФЧХ характеристика неинвертирующего ФВЧ

Аналогично курсором снимем значения

$$f_{n \text{ дБ}} = 100 \text{ кГц} : A_{n \text{ дБ}} = 13.977885 \text{ дБ}, \varphi_{n \text{ дБ}} = 2.4062551^\circ;$$

$$f_{n-3 \text{ дБ}} = 5.0300312 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ}} = 10.990257 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ}} = 44.830656^\circ;$$

Имеем

$$\Delta A = 2.987628 \text{ дБ}, f_{n-3 \text{ дБ}} = 5.0300312 \text{ кГц} \approx f_{\text{ср}}^* = 5 \text{ кГц};$$

То есть полоса пропускания

$$5.0300312 \leq f \leq 100 \text{ кГц}$$

Экспериментально полученная полоса пропускания фильтра совпадает с теоретически рассчитанной (см. $f_{\text{ср}}^*$ в табл. 2.1.2).

Исследование активных фильтров второго порядка

ФВЧ Салена-Ки

Построим схему одноименного фильтра в LTspice

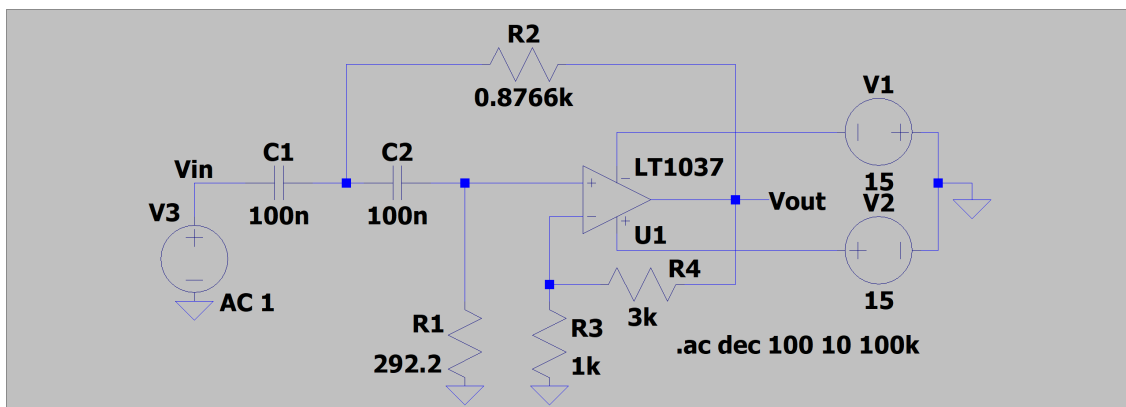


Рис. 10: Схема ФВЧ Салена-Ки

ЛАФЧХ характеристика ФВЧ Салена-Ки

Аналогично найдем ЛАФЧХ характеристику фильтра

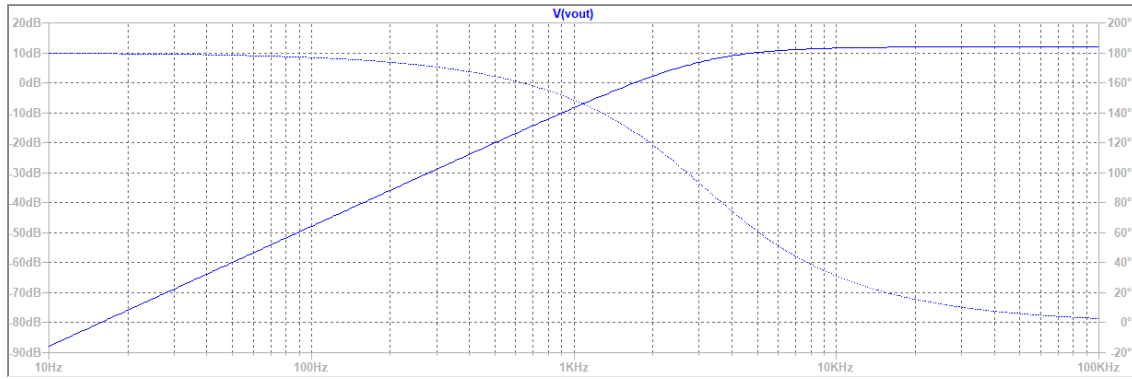


Рис. 11: ЛАФЧХ характеристика ФВЧ Салена-Ки

Аналогично курсором снимем значения

$$f_{n \text{ дБ}} = 100 \text{ кГц} : A_{n \text{ дБ}} = 12.041278 \text{ дБ}, \varphi_{n \text{ дБ}} = 2.728094^\circ;$$

$$f_{n-3 \text{ дБ}} = 4.0088442 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ}} = 9.0426662 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ}} = 74.15903^\circ;$$

Имеем

$$\Delta A = 2.9986118 \text{ дБ}, f_{n-3 \text{ дБ}} = 4.0088442 \text{ кГц} \approx f_{\text{ср}}^* = 4 \text{ кГц};$$

То есть полоса пропускания

$$4.0088442 \leq f \leq 100 \text{ кГц}$$

Экспериментально полученная полоса пропускания фильтра совпадает с теоретически рассчитанной (см. $f_{\text{ср}}^*$ в табл. 2.2.1).

ПФ многопетлевая ОС

Построим схему одноименного фильтра в LTspice

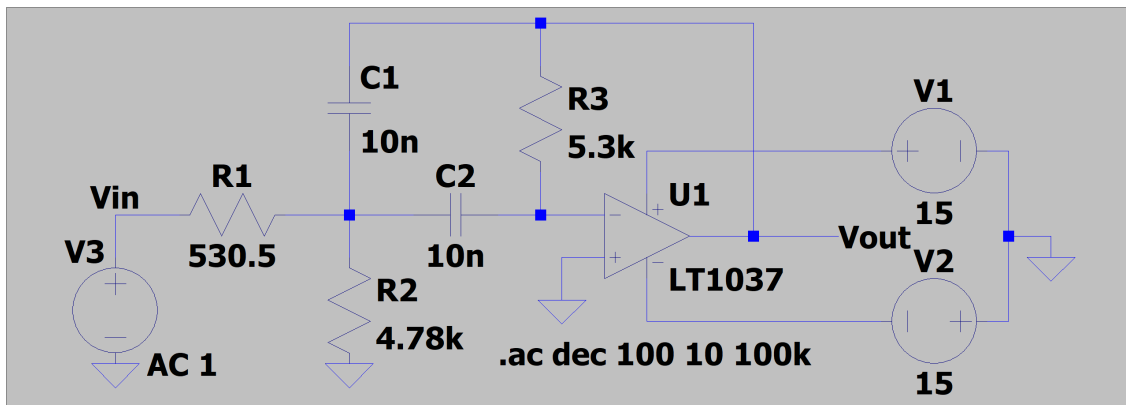


Рис. 12: Схема ПФ с многопетлевой обратной связью

ЛАФЧХ характеристика ПФ многопетлевая ОС

Аналогично найдем ЛАФЧХ характеристику фильтра

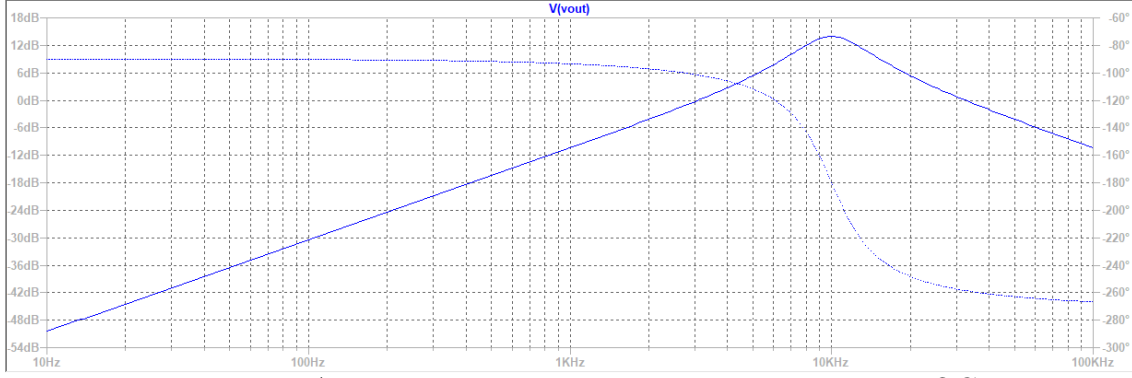


Рис. 13: ЛАФЧХ характеристика ПФ многопетлевая ОС

Курсором измерим вершину «горы» и значения слева и справа от нее

$$f_{n \text{ дБ}} = 9.9797335 \text{ кГц} : A_{n \text{ дБ}} = 13.969476 \text{ дБ}, \varphi_{n \text{ дБ}} = -179.59242^\circ;$$

$$f_{n-3 \text{ дБ сл}} = 7.4515513 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ сл}} = 10.982289 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ сл}} = -135.16323^\circ;$$

$$f_{n-3 \text{ дБ спр}} = 13.474586 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ спр}} = 10.926412 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ спр}} = -225.242^\circ;$$

Имеем

$$\Delta A_{\text{сл}} = A_{n \text{ дБ}} - A_{n-3 \text{ дБ сл}} = 2.987187 \text{ дБ},$$

$$\Delta A_{\text{спр}} = A_{n \text{ дБ}} - A_{n-3 \text{ дБ спр}} = 3.043064 \text{ дБ};$$

$$f_{n \text{ дБ}} = 9.9797335 \text{ кГц} \approx f_{\text{ср}}^* = 10 \text{ кГц},$$

$$\Delta f_{n-3 \text{ дБ}} = f_{n-3 \text{ дБ спр}} - f_{n-3 \text{ дБ сл}} = 6.0230347 \text{ кГц} \approx \Delta f^* = 6 \text{ кГц};$$

То есть полоса пропускания

$$7.4515513 \leq f \leq 13.474586 \text{ кГц}, f_{\text{ср}} = 9.9797335 \text{ кГц}, \Delta f = 6.0230347 \text{ кГц};$$

Экспериментально полученная полоса пропускания фильтра совпадает с теоретически рассчитанной (см. $f_{\text{ср}}^*, \Delta f^*$ в табл. 2.2.2).

Режекторный фильтр

Построим схему одноименного фильтра в LTspice

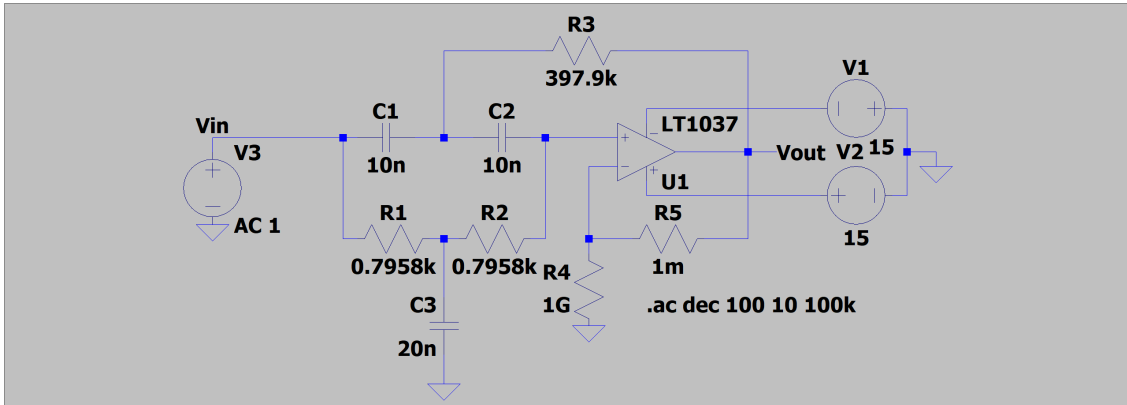


Рис. 14: Схема РФ с Т-мостом

ЛАФЧХ характеристика РФ с Т-мостом

Аналогично найдем ЛАФЧХ характеристику фильтра

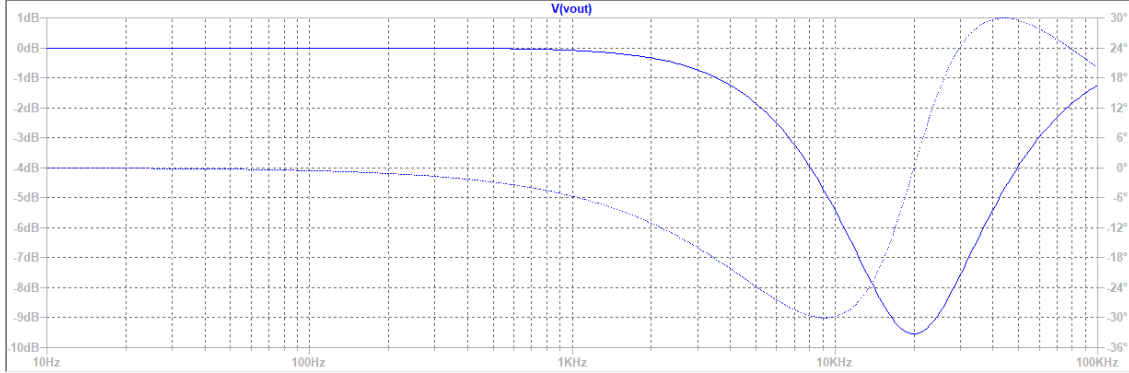


Рис. 15: ЛАФЧХ характеристика РФ с Т-мостом

Фаза была отрицательной, стала положительной – наблюдаем смену полярности. Курсором измерим низину «ямы» и значения слева и справа от нее

$$\begin{aligned} f_{n \text{ дБ}} &= 20.061636 \text{ кГц} : A_{n \text{ дБ}} = -9.5470452 \text{ дБ}, \varphi_{n \text{ дБ}} = 0.25264918^\circ; \\ f_{n-3 \text{ дБ сл}} &= 11.587212 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ сл}} = -6.4971049 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ сл}} = -28.006004^\circ; \\ f_{n-3 \text{ дБ спр}} &= 34.454665 \text{ кГц} : A_{n-3 \text{ дБ спр}} = -6.5038859 \text{ дБ}, \varphi_{n-3 \text{ дБ спр}} = 27.939365^\circ; \end{aligned}$$

Имеем

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{сл}} &= |A_{n \text{ дБ}} - A_{n-3 \text{ дБ сл}}| = 3.0499403 \text{ дБ}, \\ \Delta A_{\text{спр}} &= |A_{n \text{ дБ}} - A_{n-3 \text{ дБ спр}}| = 3.0431593 \text{ дБ}; \\ f_{n \text{ дБ}} &= 20.061636 \text{ кГц} \approx f_{\text{ср}}^* = 20 \text{ кГц}, \\ \Delta f_{n-3 \text{ дБ}} &= f_{n-3 \text{ дБ спр}} - f_{n-3 \text{ дБ сл}} = 22.867453 \text{ кГц} \approx \Delta f^* = 20 \text{ кГц}; \end{aligned}$$

То есть полоса пропускания

$$\begin{cases} 0 \leq f < 11.587212 \text{ кГц}, \\ 34.454665 < f \leq 100 \text{ кГц}, \end{cases} \quad f_{\text{ср}} = 20.061636 \text{ кГц}, \Delta f = 22.867453 \text{ кГц};$$

Экспериментально полученная полоса пропускания фильтра совпадает с теоретически рассчитанной (см. $f_{\text{ср}}^*, \Delta f^*$ в табл. 2.2.3).

Вывод

В ходе выполнения работы были рассмотрены различные виды активных фильтров первого и второго порядков. Были построены схемы и промоделированы ЛАФЧХ для каждого случая. Результаты подтверждают корректность расчетов.