18 Пассивные электрические цепи

Александр Романов Б01-107

1 Задание 1

1.1 low-pass filter

Соберём интегрирующую цепь (low-pass filter) и проведём измерения.

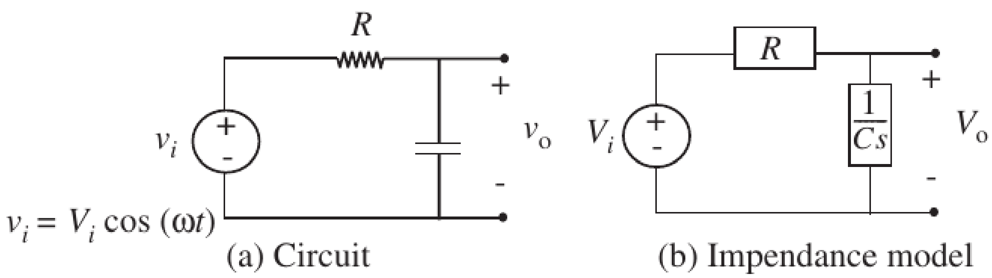


Рис. 1: low-pass filter

$$C = 1\ \mu F,\ R = 100\ \Omega,\ f_0 = 1.6\ kHz$$

$\log_2\left(\frac{f}{f_0}\right)$	$20\ln(K)$
-2	-0.76
-1	-1.57
0	-6.20
1	-13.26
2	-22.63
3	-35.84

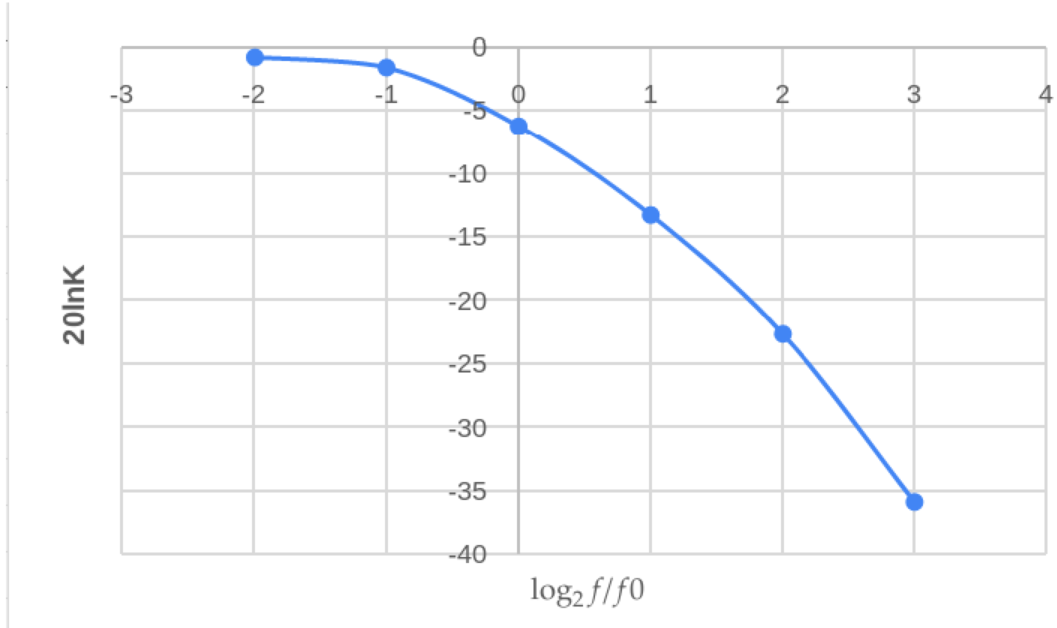


Рис. 2: Frequency response of low-pass filter

Подключим генератор прямоугольных импульсов и по осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени τ:

$$\tau = 78\ \mu s$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 2\ kHz$$

Что близко к f_0 полученному в начале.

1.2 hight-pass filter

Превратим интегрирующую цепь в дифференцирующую и проведём аналогичные измерения.

$$C = 1\ \mu F,\ R = 100\ \Omega,\ f_0 = 1.6\ kHz$$

$\log_2\left(\frac{f}{f_0}\right)$	$20\ln(K)$
-2	-30.84
-1	-17.75
0	-9.35
1	-3.34
2	-1.33
3	-0.34

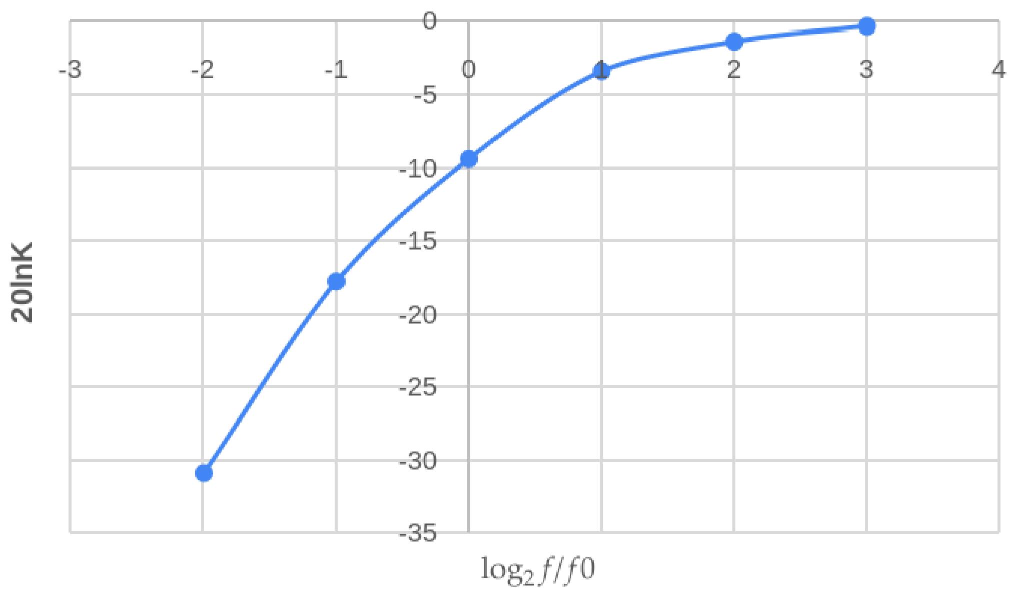


Рис. 3: Frequency response of hight-pass filter

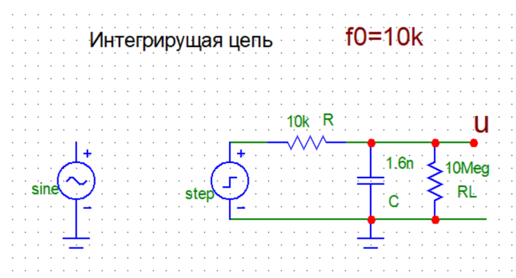
Подключим генератор прямоугольных импульсов и по осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени τ:

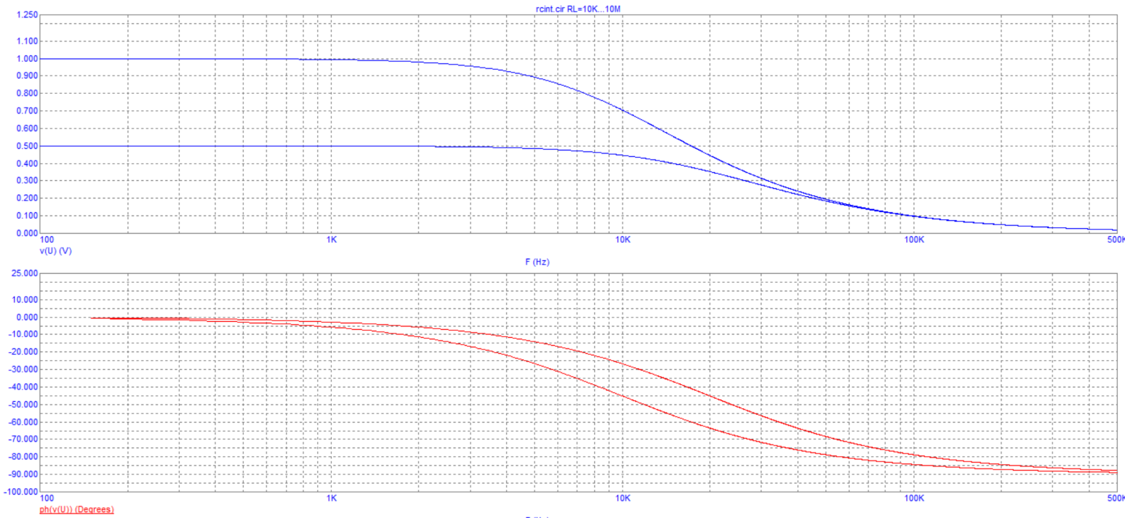
$$\tau = 144\ \mu s$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 1\ kHz$$

1.3 rcint.cir

Откроем в MicroCap модель **rcint.cir**. Изучим графики частотной и фазовой характеристики.





По графику видно, что передаточная функция цепи принимает вид:

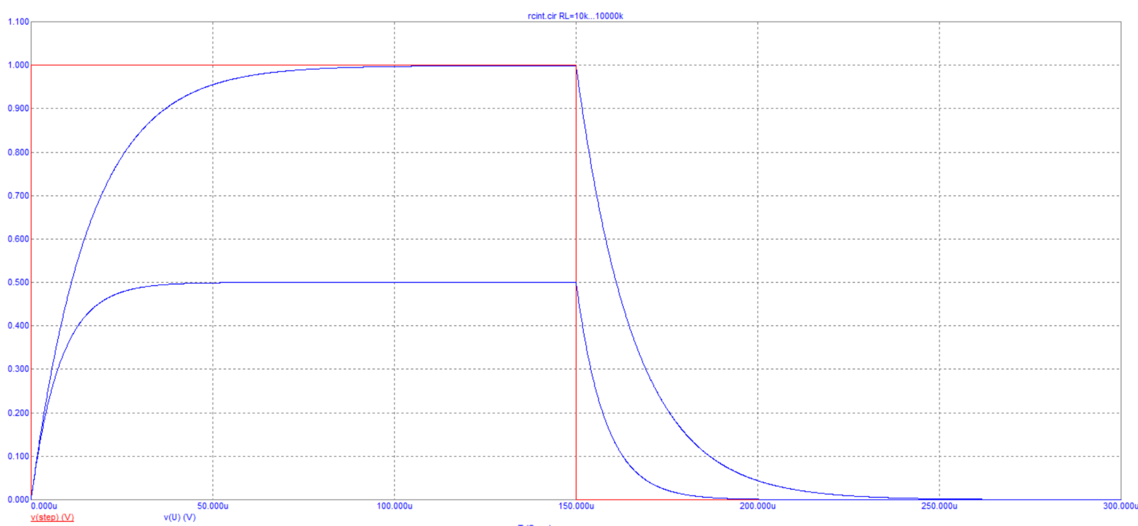
$$H(p) = \frac{K_0}{1 + p\tau}; \quad K_0 = \frac{R_L}{R + R_L}, \tau = (R \| R_L)C.$$

По графику оценим верхнюю частоту:

$$R_L = 10\,k\Omega, \quad f_0 \simeq 10\,kHz$$

$$R_L = 10\,M\Omega, \quad f_0 \simeq 19,9\,kHz$$

Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени:

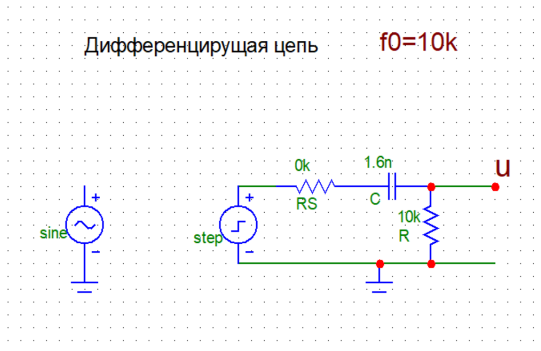


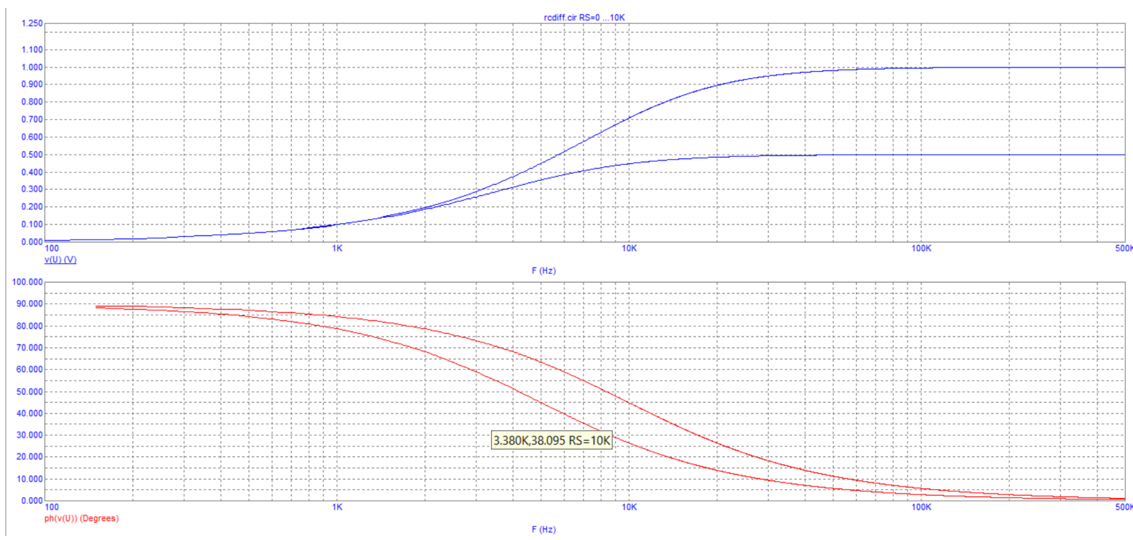
$$R_L = 10\,k\Omega, \quad \tau \simeq 9,7\,\mu s$$

$$R_L = 10\,M\Omega, \quad \tau \simeq 19,6\,\mu s$$

1.4 rcdiff.cir

Откроем модель **rcdiff.cir**. Изучим ее частотную и фазовую характеристики.





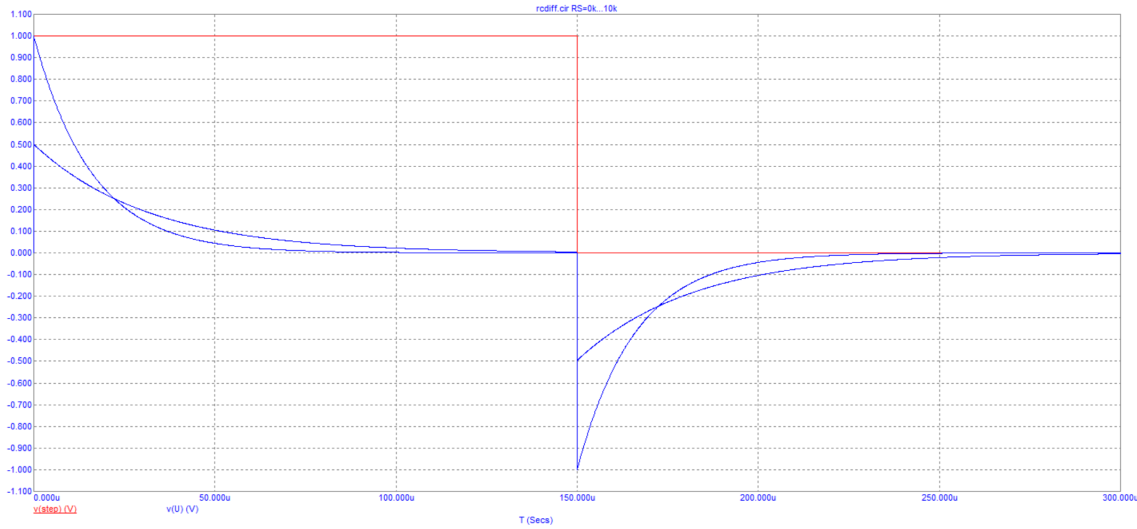
По графику видно, что передаточная функция цепи при $R_S \neq 0$ принимает вид:

$$H(p) = \frac{K_0 p\tau}{1 + p\tau}; \quad K_0 = \frac{R}{R + R_S}, \tau = (R + R_S)C.$$

По графику оценим верхнюю частоту:

$$R_S = 0 \quad f_0 \simeq 9,75\,kHz$$
$$R_S = 10\,kHz, \quad f_0 \simeq 4,88\,kHz$$

Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени:

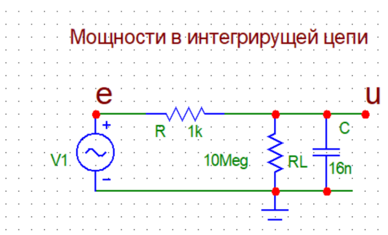


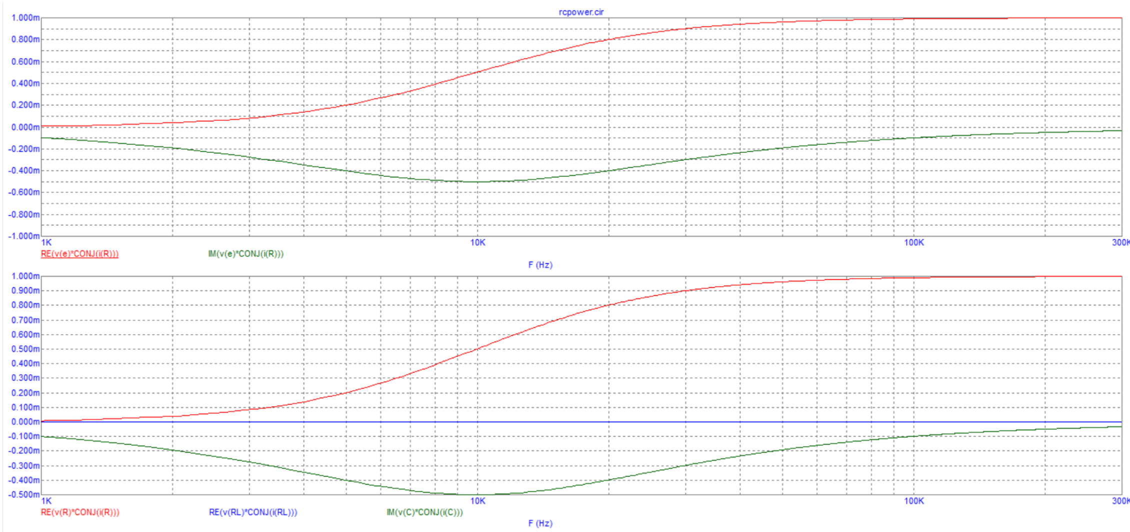
$$R_S = 0, \quad \tau \simeq 16,7\,\mu s$$

$$R_S = 10\,k\Omega, \quad \tau \simeq 31,8\,\mu s$$

1.5 rcpower.cir

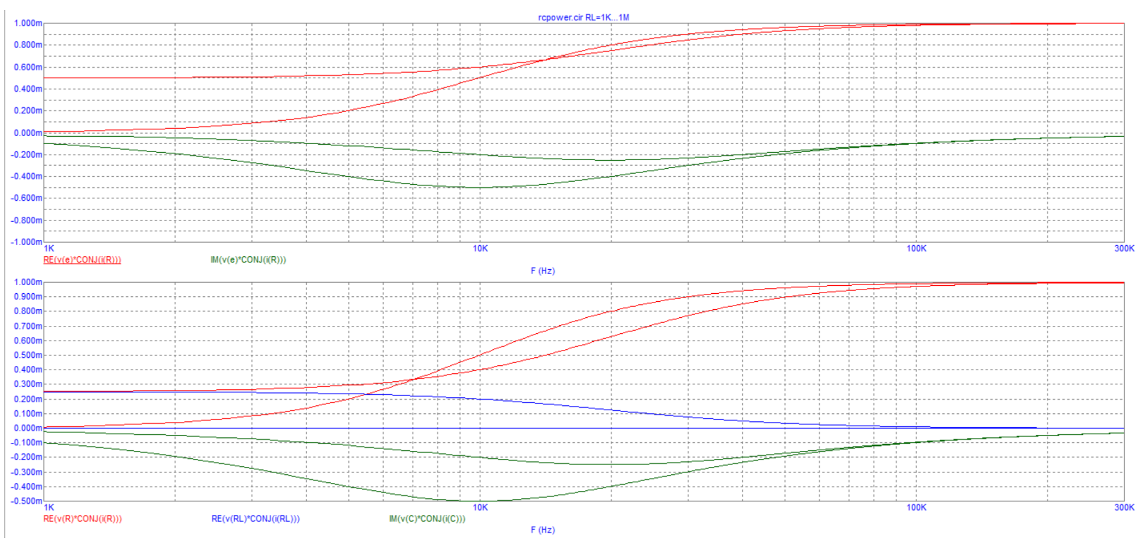
Откроем модель **rcpower.cir**. Изучим графики частотной зависимости потребляемых интегрирующей цепью активных и реактивных мощностей и графики мощностей на её комопонентах.





Видно, что у реактивной компоненты потребление становится максимальным при частоте $f_0 = 10\,kHz$, и стремится к нулю при частоте $f = 0$ и $f = \infty$. При $f = f_0$ выполняется закон сложения мощностей.

Подключая и отключая резитор R_L варьированием $[1k, 1Meg|1Meg](1Meg = \infty)$, изучим его влияние на распределение мощностей в схеме при $f = f_0$.

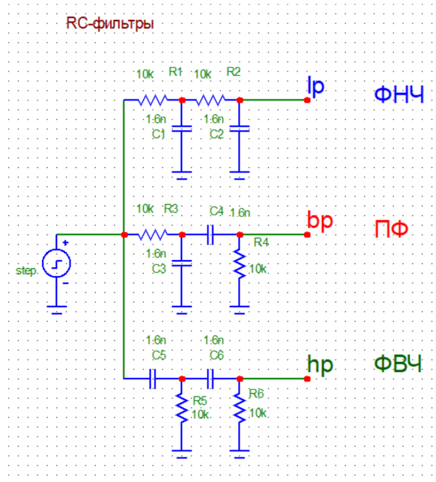


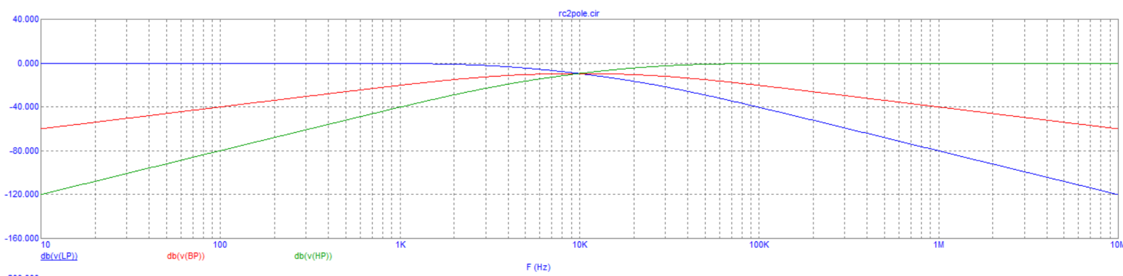
При уменьшении значения сопротивления резистора R_L, его мощность возрастает до 0,2 mW, мощность на резисторе R падает до 0,4 mW, а реактивная мощность конденсатора . Скорость увеличения мощности на резисторе R_L становится равной -0,2 mW.

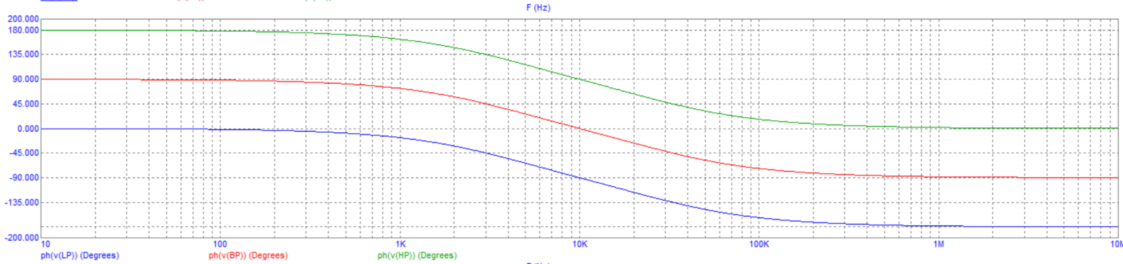
2 Задание 2

Откроем модель **rc2pole.cir**.

2.1







По графикам определим затухание на частоте $f_0 \simeq 10\,kHz$, оно равно -9,6 dB и скорость его нарастания в полосах задержания -40,4 + 9,6 = -30,8 dB/decade. По графикам ФЧХ измерим значения фазовых сдвигов ФВЧ, ПФ и ФНЧ на частотах 0, f_0, ∞.

	ФВЧ	ПФ	ФНЧ
0	180	90	0
f_0	90	0	-90
∞	0	-90	-180

Двухсторонняя полоса $\triangle f$ пропускания ПФ ≈ 30 kHz, что в три раза больше f_0. Это сходится с теорией.

2.2

Откроем графики переходных характеристик.

Оценим время спада τ_- первого выброса переходной характеристик ФВЧ до уровня $1/e \simeq 0,37$:

$$\tau_- = 5\ \mu s$$

Оценим время нарастания t_+ фронта переходной характеристики ФНЧ до уровня $1 - 1/e \simeq 0,63$:

$$\tau_+ = 61\ \mu s$$

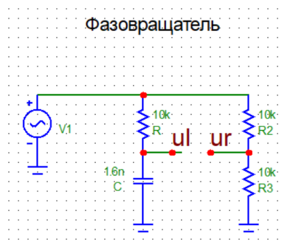
Найдем их отношение:

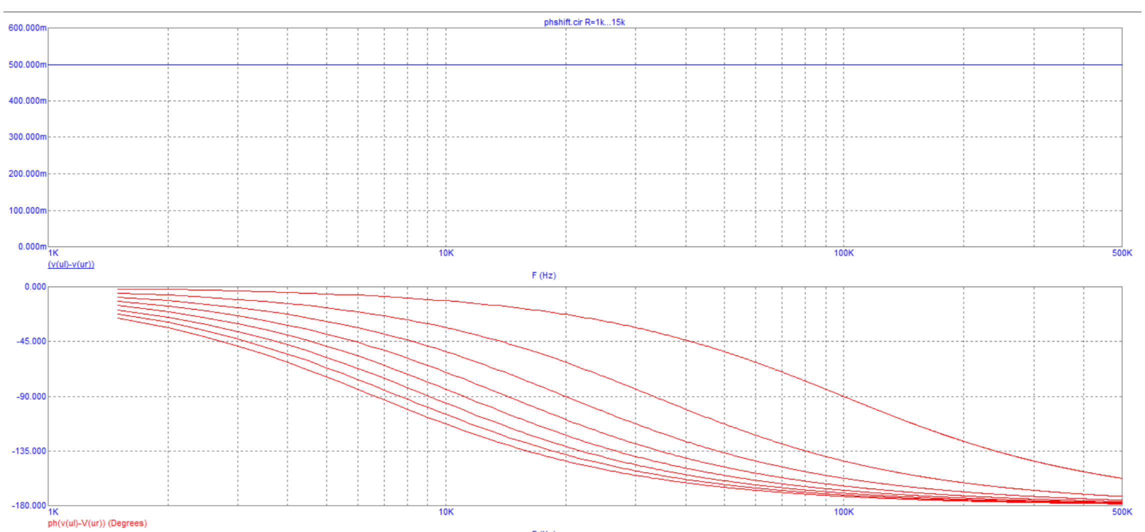
$$\frac{\tau_+}{\tau_-} = 12,2$$

3 Задание 3

3.1

Откроем модель **phshift.cir**.

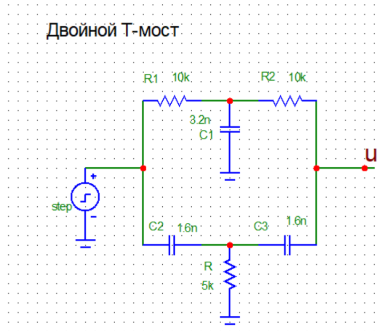


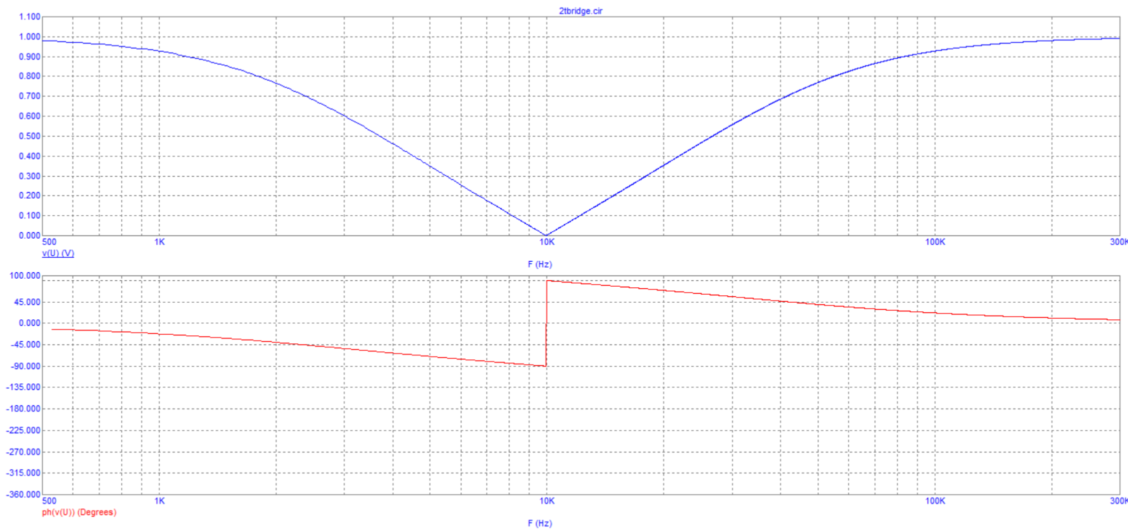


Наибольший диапазон перестройки реализуется на частоте $f = 20kHz$. Границы этого диапазона $[-143,4; -22,7]$.

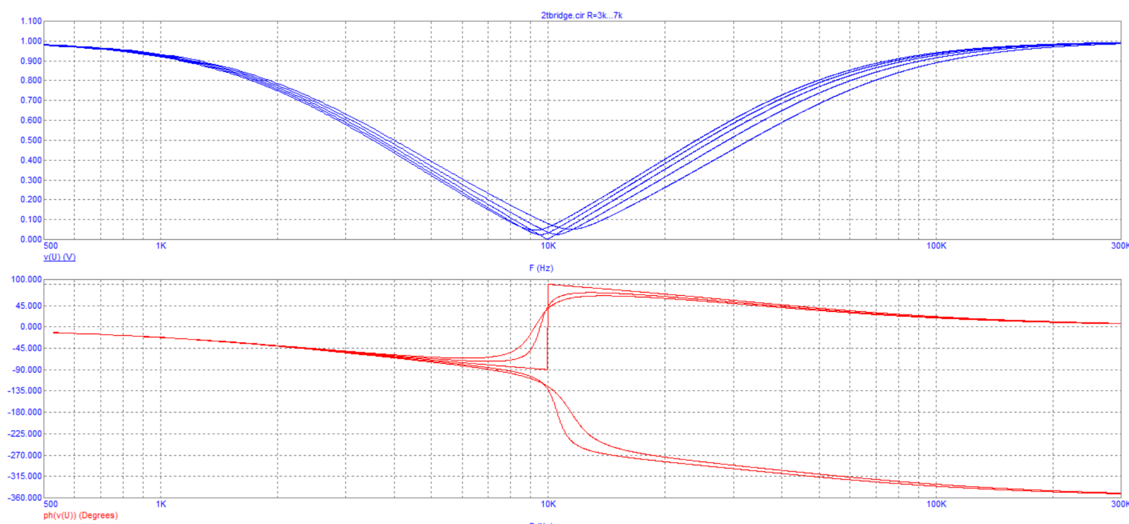
3.2

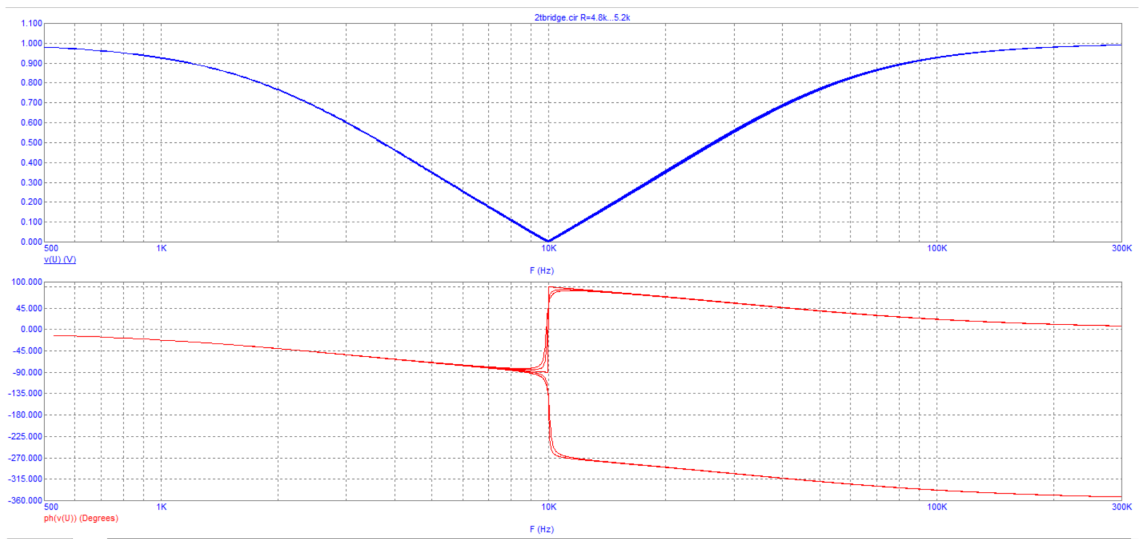
Откроем модель двойного Т-моста **2tbridge.cir**.





Измерим полосу режекции $\triangle f = 39\,kHz$. $f_0 = 10\,kHz$, следовательно выполняется $\triangle f = f_0$.

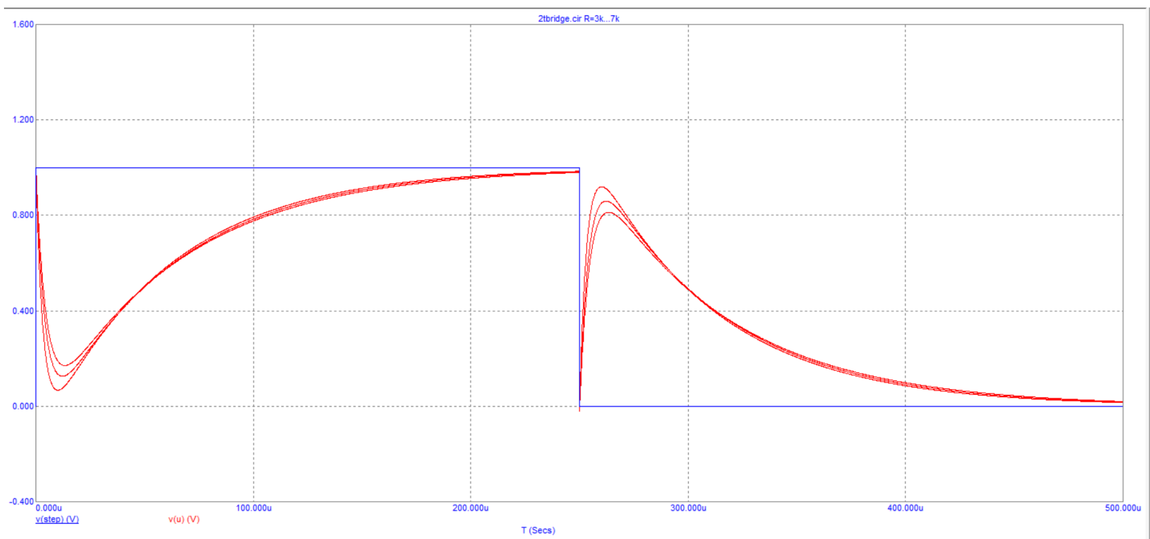




При росте R, f_0 падает. При $R = 5\,k\Omega$ наблюдается скачок на ФЧХ.

3.3

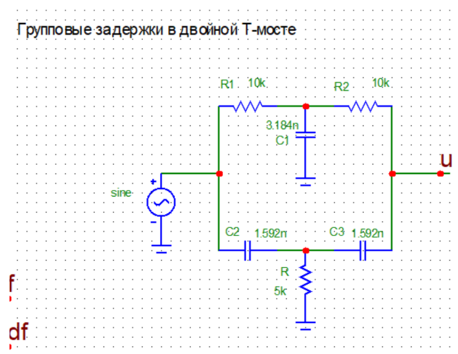
Подключив ко входу источник прямоугольного импульса, проанализиуреm переходную характеристику. $\tau_+ = 4\,\mu s$, $\tau_- = 58\,\mu s$. Это сходится с теоретическими значениями.

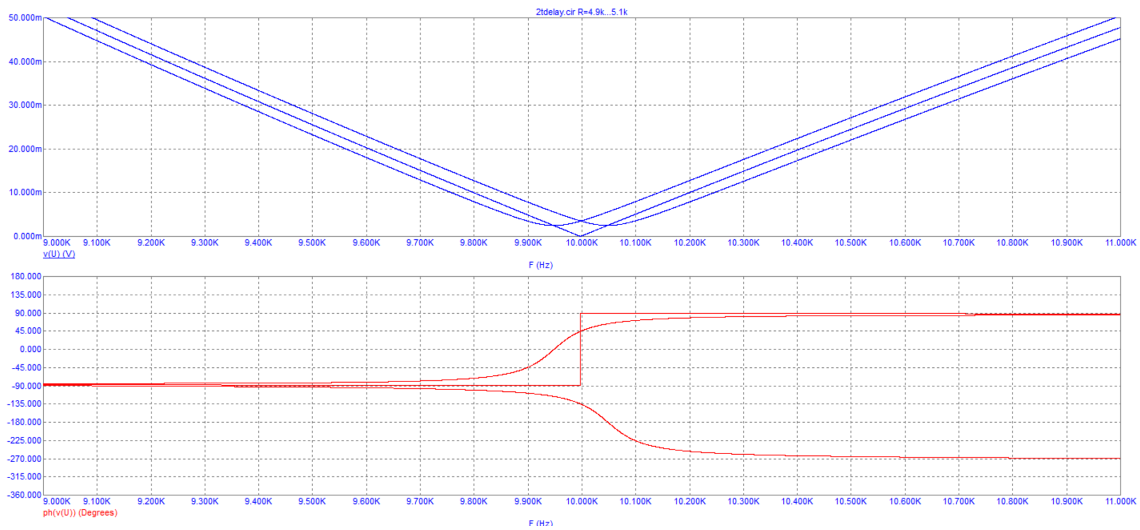


Варьирование приводит к усреднению функции.

3.4

Откроем модель **2tdelay.cir**.





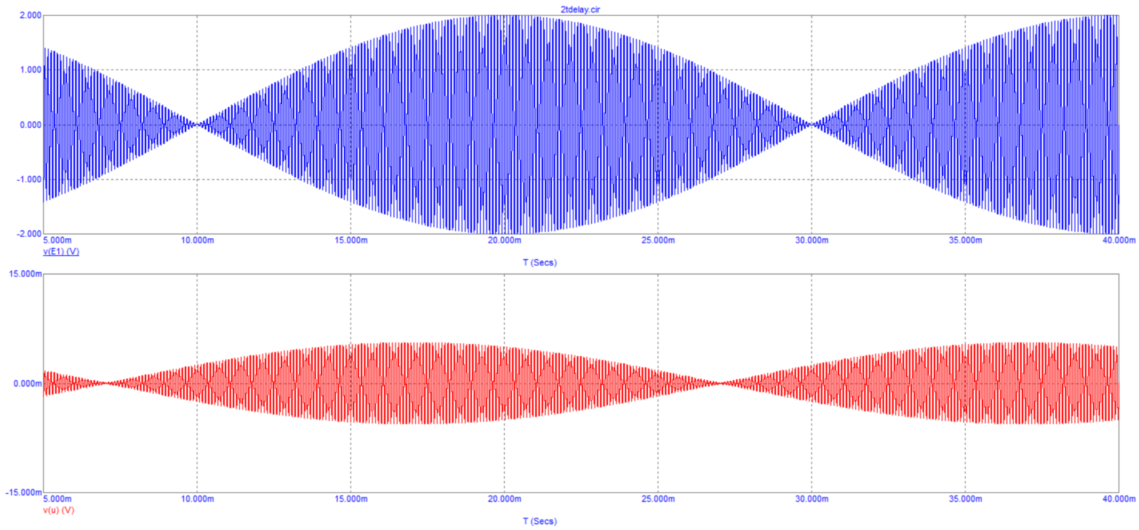
Оценим $Q = f_0/\triangle f$.

$R,\ k\Omega$	4,9	5	5,1
$f_0,\ kHz$	10,05	10	9,95
$\triangle f,\ kHz$	0,05	$10^{-4} \cdot 2,5$	0,05
Q	100,5	40000	99,5

В режиме *Transient* измерим групповые задержки τ_g:

$$\tau_g = 3\,ms,$$

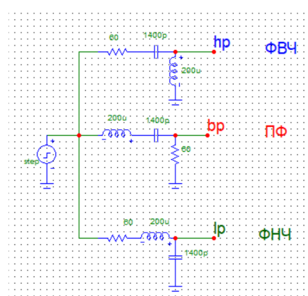
значение для обоих случаев ($R = 4,9\,k\Omega$, $f = 10,05\,kHz$ и $R = 5,1\,k\Omega$, $f = 9,95\,k\Omega$).



4 Задание 4

4.1

На макетной плате соберем схему полосового фильтра (его схема, как и схема ФНЧ и ФВЧ представлены на рисунке).



$$L = 220\,\mu H$$

$$C = 1\,\mu F$$

$$r = 92\,\Omega$$

Измерим резонансную частоту и коэффициент передачи:

$$f_0 = 366\,kHz$$

$$\triangle f = 75\,kHz$$

$$Q = \frac{f_0}{\triangle f} = 4,8$$

4.2

Из тех же компонент соберем схемы ФВЧ и ФНЧ. Измерим для них резонансную частоту и отношения $K(f_0)/K(0)$ для ФНЧ и $K(f_0)/K(\infty)$ для ФВЧ.

$$Q = \frac{K(f_0)}{K(0)} = 5,18$$

$$Q = \frac{K(f_0)}{K(\infty)} = 4,1$$

4.3

Подключим генератор прямоугольных импульсов. Изучим переходные характеристики ФВЧ, ФНЧ и ПФ. Прикинем по осцилограммам период колебаний и время их затухания до уровня $1/e = 0,37$ и дадим оценку резонансной частоты и добротности.

Для ФВЧ:

$$T = 2,8\,\mu s$$

$$\tau = 0,45\,\mu s$$

$$f_0 = 365\,kHz$$

$$Q = 6,2$$

Для ФНЧ:

$$T = 2,83\,\mu s$$

$$\tau = 0,49\,\mu s$$

$$f_0 = 352\,kHz$$

$$Q = 5,7$$

Для ФВЧ:

$$T = 2,84\,\mu s$$

$$\tau = 0,51\,\mu s$$

$$f_0 = 351\,kHz$$

$$Q = 5,6$$

4.4

Откроем в MicroCap модель **rlc2pole.cir**, изучим частотные фазовые и переходные характеристики фильтров.

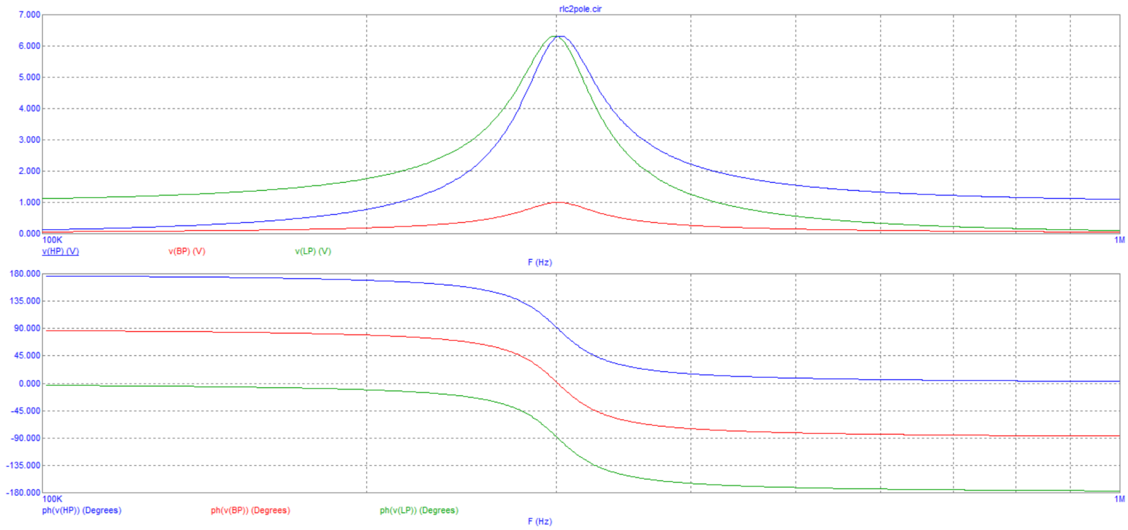


Рис. 4: Частотные и фазовые характеристики

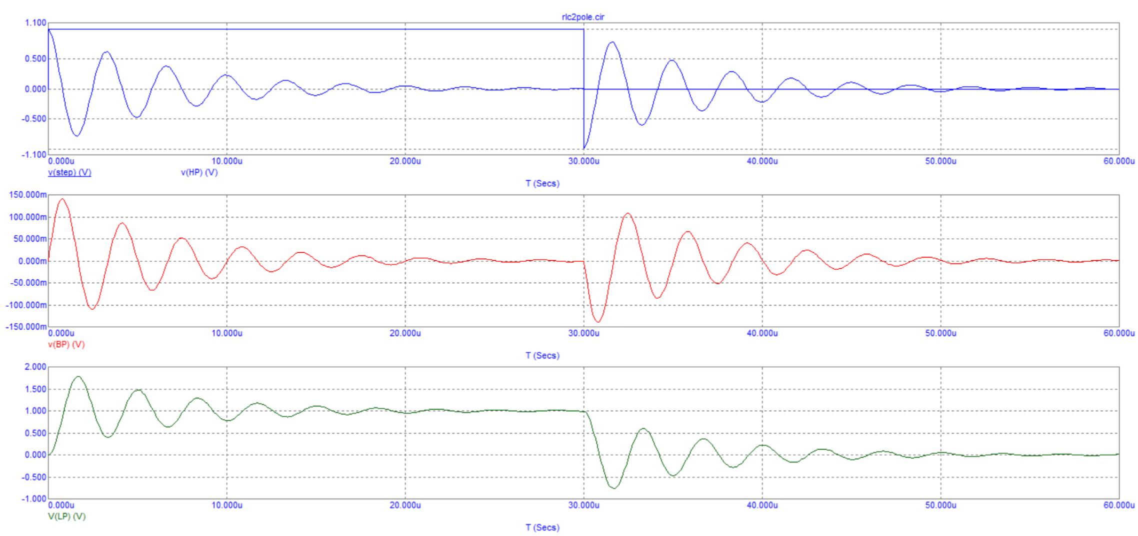


Рис. 5: Переходные характеристики

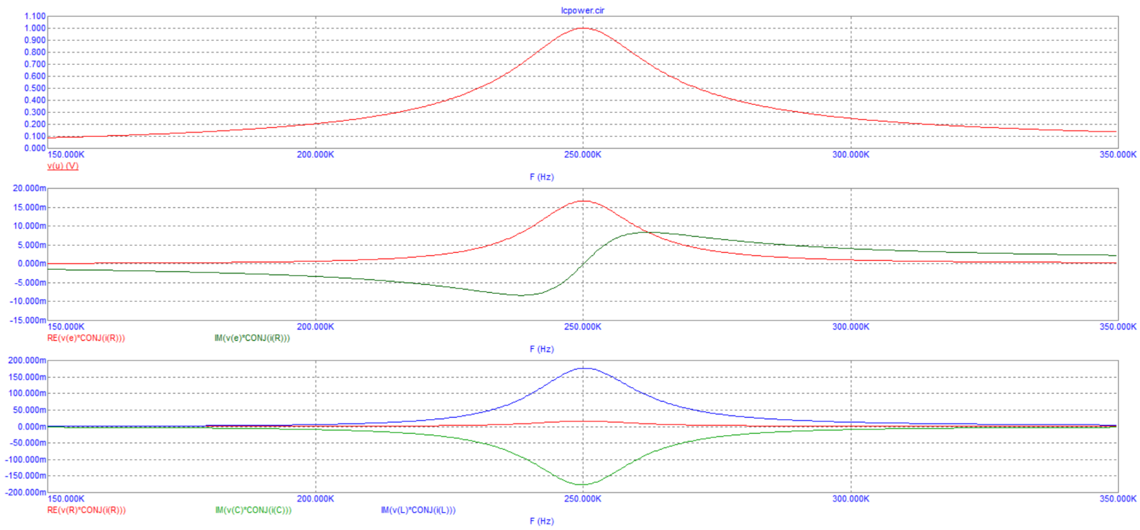
4.5

Откроем модель **groupdel.cir** полосового фильтра. Наблюдая в режиме *Transient* отклик на двухчастотный сигнал изучим зависимость групповой задержки τ_g от $R = 10, 20, 40, 100$.

R, Ω	10	20	40	100
τ_g, ms	0,5	0,29	0,152	0,064
τ_{th}, ms	0,62	0,31	0,155	0,06
Q	195	98	49	19

4.6

Откроем модель **lcpower.cir**.



На частоте резонанса $f_0 = 250\,kHz$.

$$P_L = 176,066\,m \quad P_C = -177,477\,m \quad P_R = 15,89\,m \Rightarrow \sum P = 14,47$$

$$P_{\sum th} = 16,18\,m$$

На одной из границ полосы пропускания $f_1 = 238\,kHz$:

$$P_L = 116,577\,m \quad P_C = -122,51\,m \quad P_R = 11,14\,m \Rightarrow \sum P = 5,147$$

$$P_{\sum th} = 11,367\,m$$

Закон суммирования выполняется.

5 Задание 5

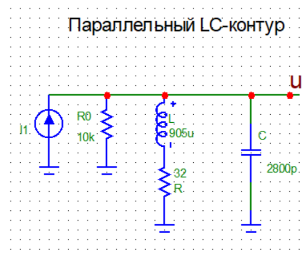
5.1

Откроем в MicroCap модель **parallel.cir** параллельного контура с $f_0 = 100\,kHz$, $\varrho = 570$. По схеме оценим параметры:

$$\alpha = \frac{\rho}{R_0}$$

$$\beta = \frac{R}{\rho}$$

$$Q = \frac{1}{\alpha + \beta}$$



$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 568$$

$$\alpha = 0,0568 \quad \beta = 0,0563$$

$$Q = 8,84$$

5.2

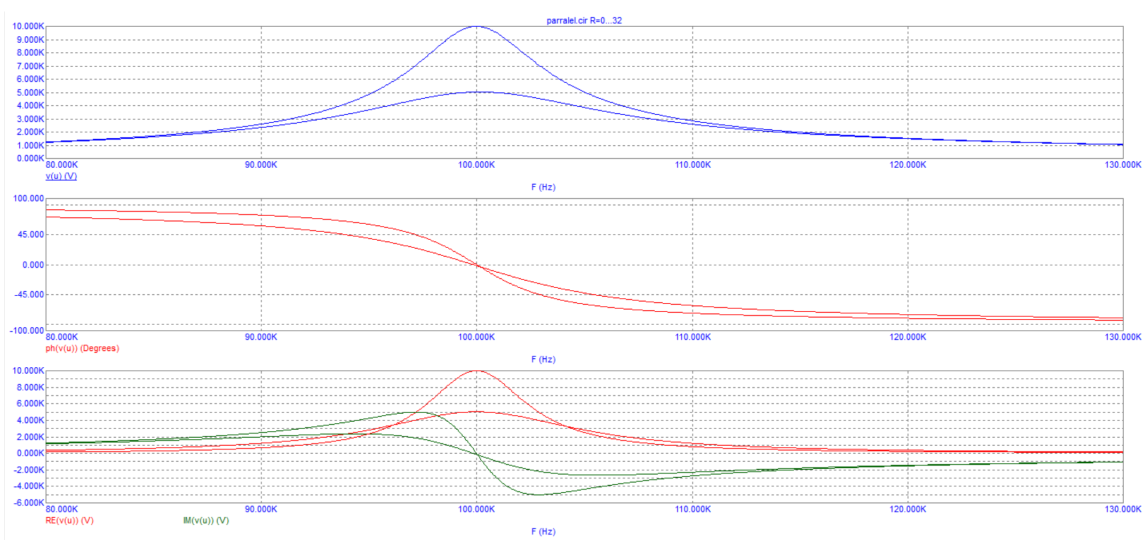
Найдем резонансную частоту $f_0 = 100\, kHz$, полосу пропускания $\Delta f = 11,6\, kHz$. Измерим сопротивление контура $R_0 = 5\, k\Omega$. Оценим добротность как:

$$Q = \frac{R_0}{\rho} = 8,8$$

$$Q = \frac{f_0}{\triangle f} = 8,6$$

5.3

Изучим влияние на добротность последовательных потерь R, установив варьирование $R = [0, 32\|32]$.



Добротность при $R = 0$:

$$Q = \frac{f_0}{\triangle f} = 17,3$$

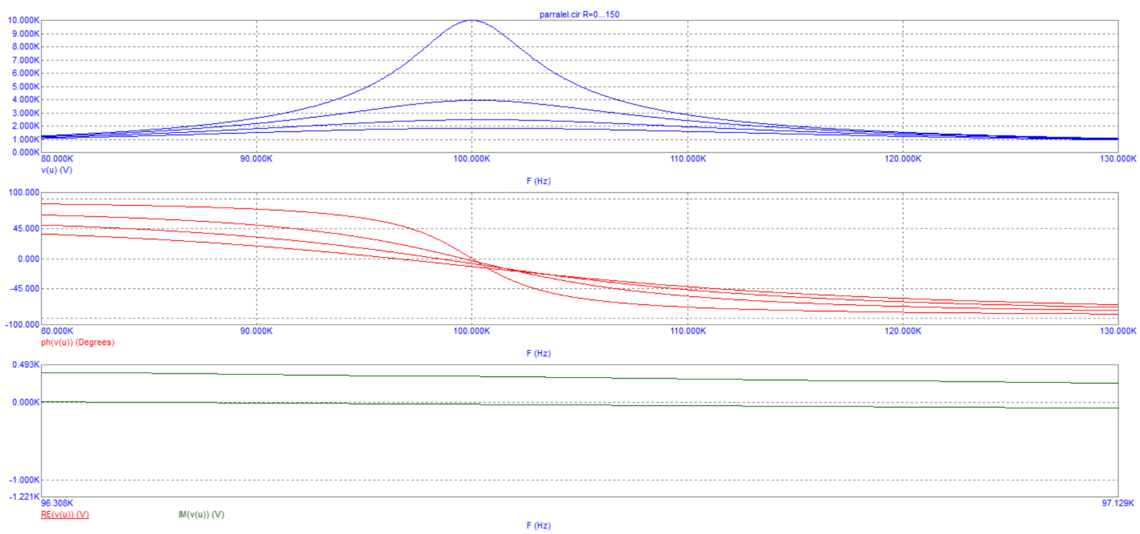
Изучим влияние параллельных потерь R_0, установив варьирование $R_0 = [10k, 1000k\|1000k]$. Измерим добротность при $R_0 = 1000\,k\Omega$:

$$Q = \frac{f_0}{\triangle f} = 17,2$$

При увеличении R от 0 $\Omega 32 \Omega 1/Q0, 0580, 116.$R_$010 \Omega 1000 \Omega 1/Q0, 1160, 058.$

5.4

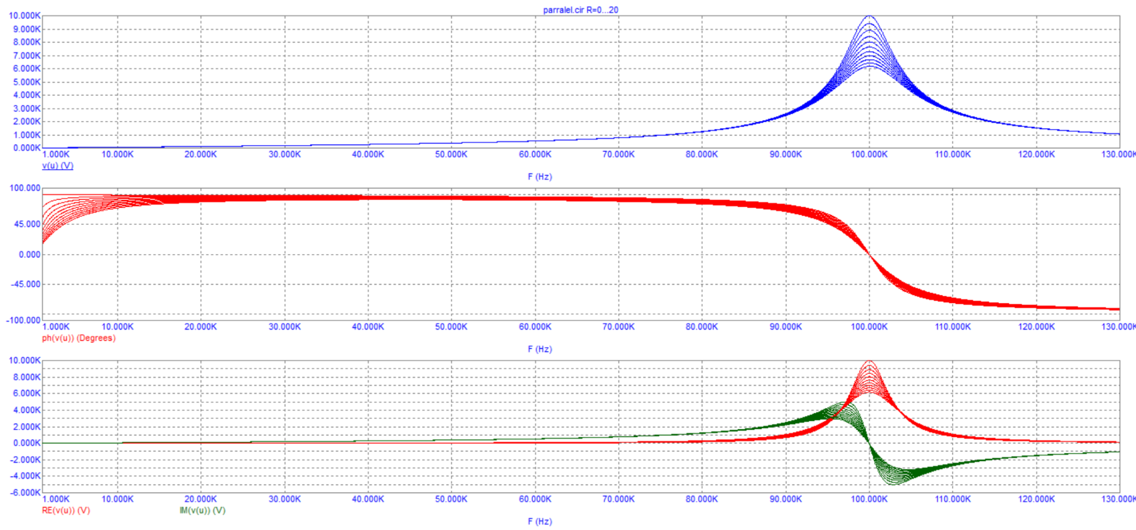
Изучим зависимость частоты параллельного резонанса от $R = [0, 150\|50]$.



R, Ω	0	50	100	150
f_{exp}, kHz	100	99,6	98,42	96,4
β	0	0,088	0,176	0,264
f_{exp}	100	99,6	98,43	96,45

5.5

Исследуем влияние последовательных потерь в области низких частот. Установим частотный диапазон от 1 kHz до 130 kHz и будем варьировать $R = [0, 20\|2]$.

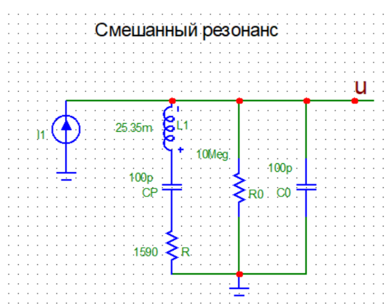


Получаем, что при $R = 12\,\Omega$ фазовый сдвиг на частоте $f = 2\,kHz$ составляет $\pi/4$.

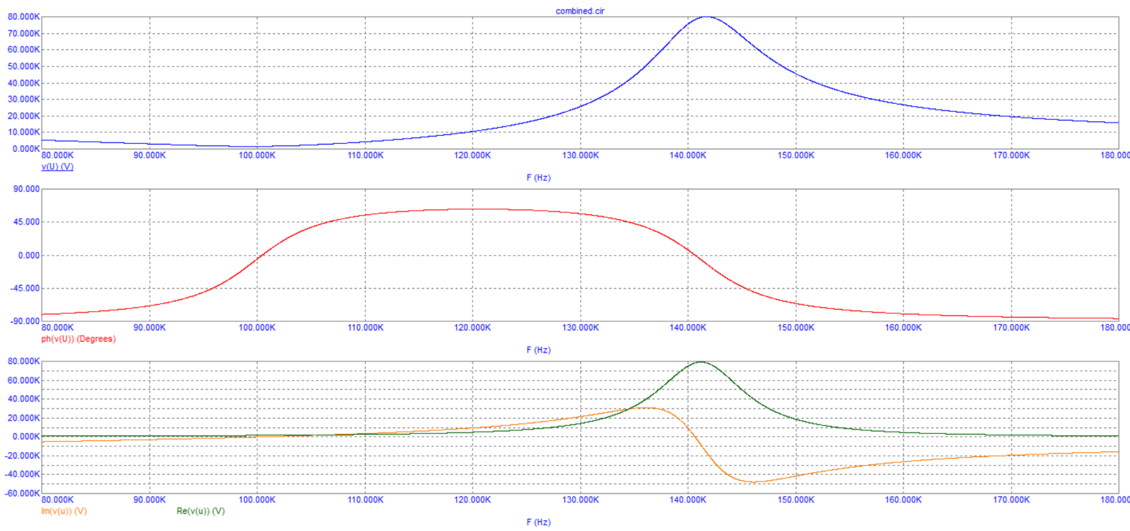
6 Задание 6

6.1

Откроем модель **combined.cir** с $f_0 = 100\,kHz$, $\rho = 15,9\,kHz$, $q \simeq 10$, $\alpha = 1$.



Изучим графики частотной и фазовой характеристик, а также графики частотных зависимостей вещественной и мнимой частей мпеданса.



6.2

Измерим частоты f_p, f_0 последовательного и параллельного резонансов по точкам пересечения нуля фазовой характеристикой:

$$f_p = 100,5\,kHz \quad f_0 = 140,6\,kHz$$

Измерим полосы $\triangle f_p, \triangle f_0$, в которых фазовая характеристика изменяется в диапазоне $\pm 45\deg$ в окрестностях резонансов.

$$\triangle f_p = 10,6\,kHz$$

$$\triangle f_0 = 10,8\,kHz$$

Оценим добротности Q_p, Q_0 и проверим, что $f_0 = f_p\sqrt{2}$, $Q_0 = Q_p\sqrt{2}$:

$$Q_p = \frac{f_p}{\triangle f_p} = 9,5$$

$$Q_0 = \frac{f_0}{\triangle f_0} = 13$$

$$Q_0 = 13 \simeq 13,43 = Q_p\sqrt{2}$$

$$f_0 = 140,6 \simeq 142,1 = f_p\sqrt{2}$$

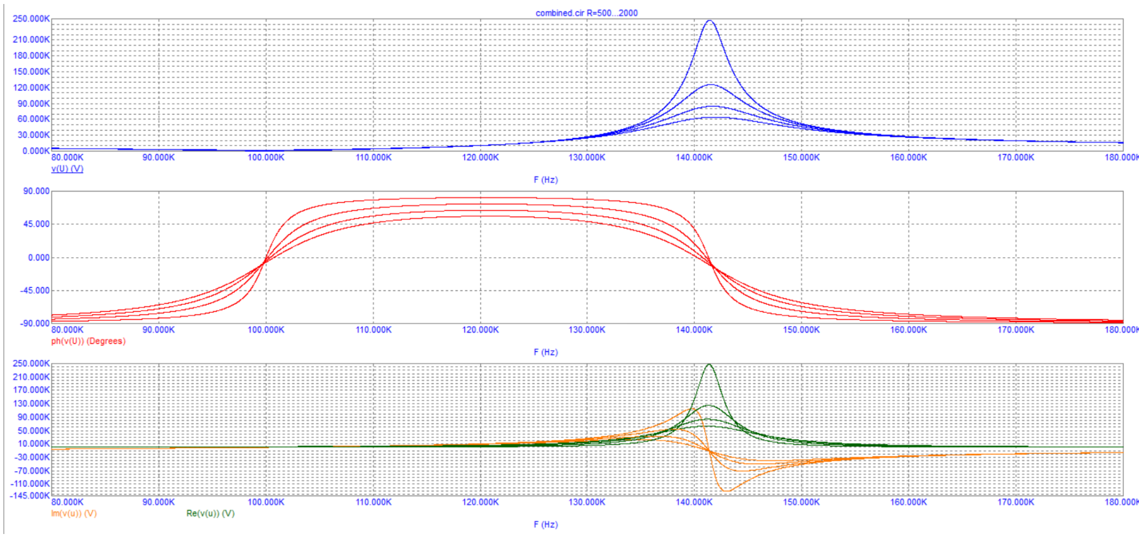
6.3

Измерим сопротивление контура на частотах последовательного и параллельного резонансов, сравним результаты с теоретическими значениями $(r, k^2\rho_p, Q_p)$:

$$r_{exp} = 1,565\,k\Omega \simeq 1,59\,k\Omega = r_{th}$$

$$(k^2\rho_p, Q_p)_{mes} = 78,1\,k\Omega \simeq 79,1\,k\Omega = \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2\sqrt{\frac{L}{c}}(1+\alpha)\frac{r}{\rho} = (k^2\rho_p, Q_p)_{th}$$

Снимем зависимость сопротивления на частоте параллельного резонанса от $R = [500, 2000\|500]$ и емкости $C_0 = [100p, 300p\|100p]$. Сопоставим их с теорией. Осмыслим характер изменения графиков при варьировании R и C_0.

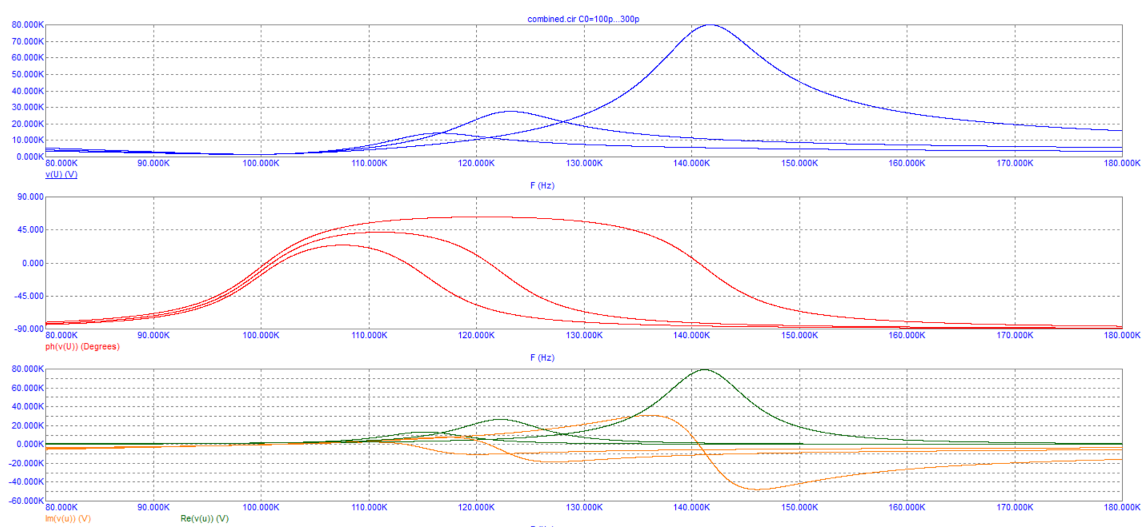


[H]

$R,\ \Omega$	500	1000	1500	2000
$Z,\ k\Omega$	247	124,4	83	61,9

Получаем зависимость:

$$Z \sim \frac{1}{R}$$



[H]

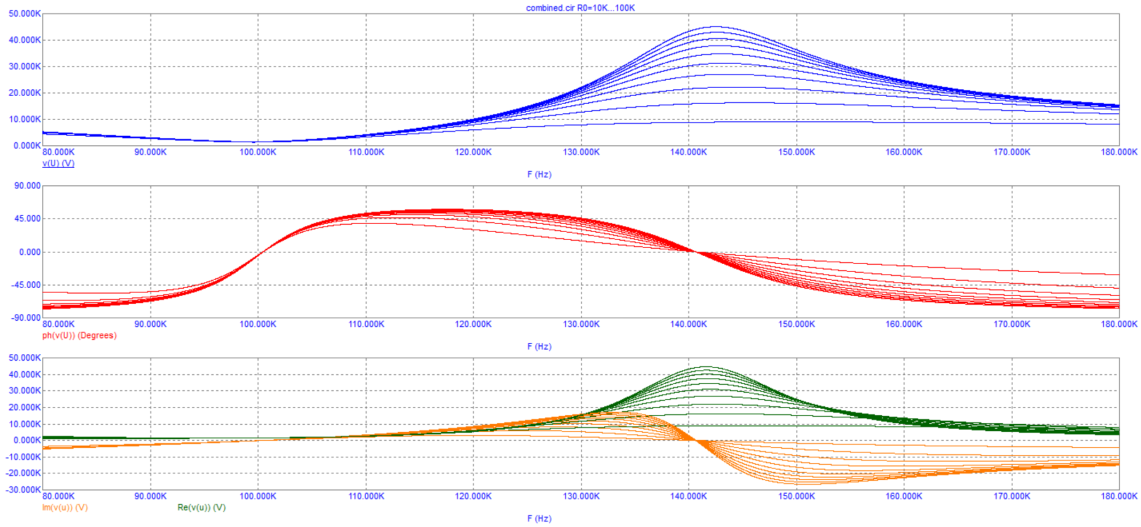
$C_0,\ pF$	100	200	300
$Z,\ k\Omega$	78,3	25,4	11,9

Получаем зависимость:

$$Z \sim \frac{1}{C_0^2}$$

6.4

Обнулим последовательности потери r и варьированием $R_0 = [10k, 100k \| 10k]$ подберем сопротивления параллельных потерь так, чтобы достичь того же резонансного сопротивления, что и при $r = 1590\,\Omega$.



Получим $R_0 = 80\,k\Omega$. Проверим закон пересчета:

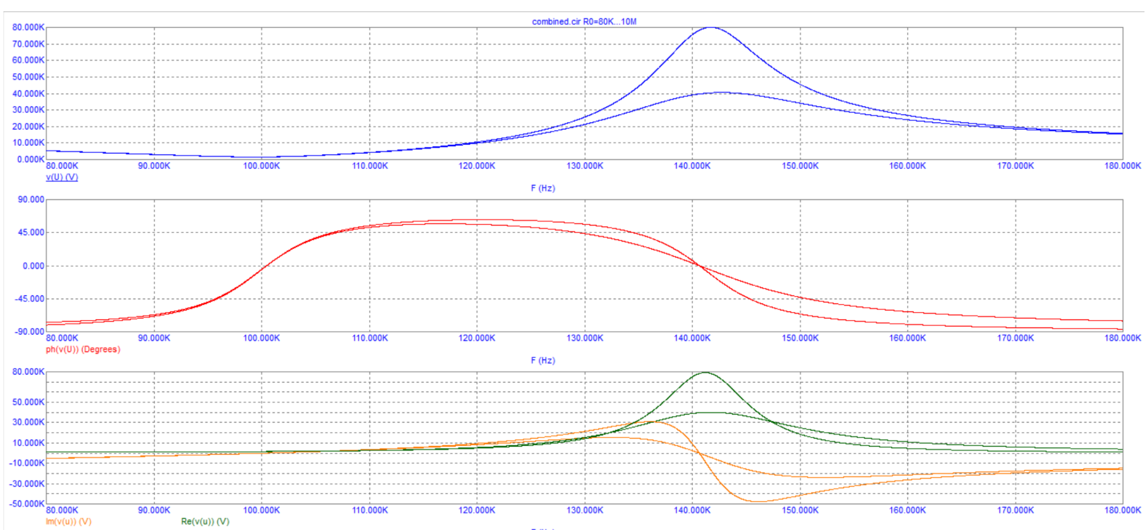
$$R_0 r = k^2 \rho_p^2$$

$$80000 \cdot 1590 \simeq \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 2 \cdot 15900^2.$$

Соотношение выше выполняется.

6.5

Варьируя $R_0 = [80k, 10Meg \| 10Meg]$ при $r = 1590\,\Omega$, изучим влияние R_0 на поведения частотной и фазовой характеристик на низких частотах - в диапазоне $1k, 180k$.



При увеличении R_0 частотная характеристика увеличивается, а фазовая уменьшается.