

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

---

## Работа 18

---

Грицаенко Андрей, ФРКТ

# Содержание

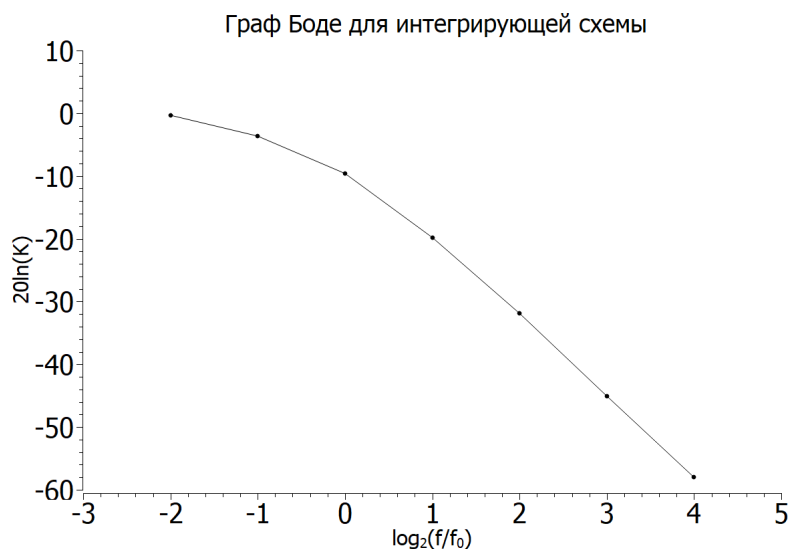
## 1 ЗАДАНИЕ 1

1. Соберем интегрирующую цепь и проведем измерения. Результаты запишем в таблицу:

$$\begin{aligned}C &= 1 \text{ мкФ} \\ R &= 129 \text{ (130) Ом} \\ f_0 &= 1000 \text{ (1233) Гц}\end{aligned}$$

$20\ln(K)$	n
-0,30227	-2
-3,65443	-1
-9,62534	0
-19,885	1
-31,891	2
-45,0759	3
-58,0084	4

Построим граф Боде для интегрирующей цепи по полученным данным:



2. Подключим генератор прямоугольных сигналов. По осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени  $\tau$ :

$$\tau = 140 \text{ мкс}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 1 \text{ кГц},$$

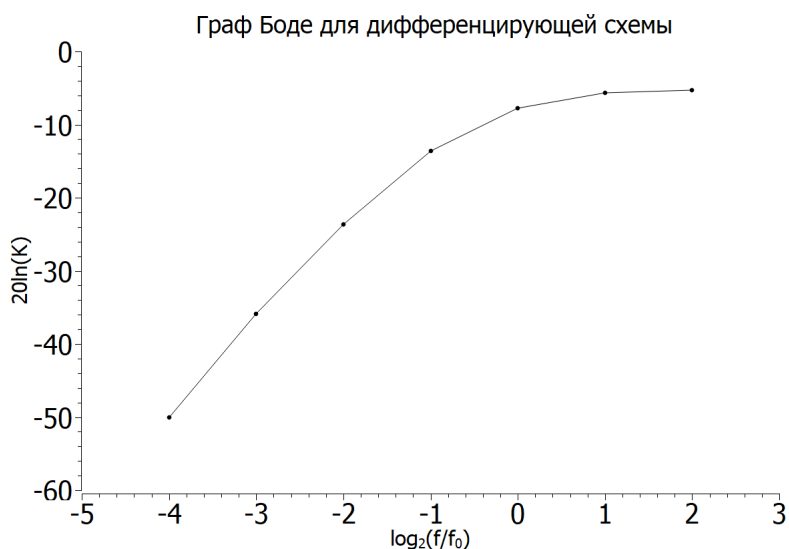
что совпадает со значением для  $f_0$  полученным в первом пункте.

3. Превратим интегрирующую цепь в дифференцирующую и проведем аналогичные измерения. Запишем результаты:

$$f_0 = 1 \quad \kappa\Gamma\mathcal{U}$$

$20\ln(K)$	n
-50,0207	-4
-35,9153	-3
-23,6834	-2
-13,6244	-1
-7,74268	0
-5,6738	1
-5,27931	2

Построим граф Бode для дифференцирующей цепи по полученным данным:



4. Подключим генератор прямоугольных сигналов. По осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени  $\tau$ :

$$\tau = 140 \quad \mu\text{с}$$

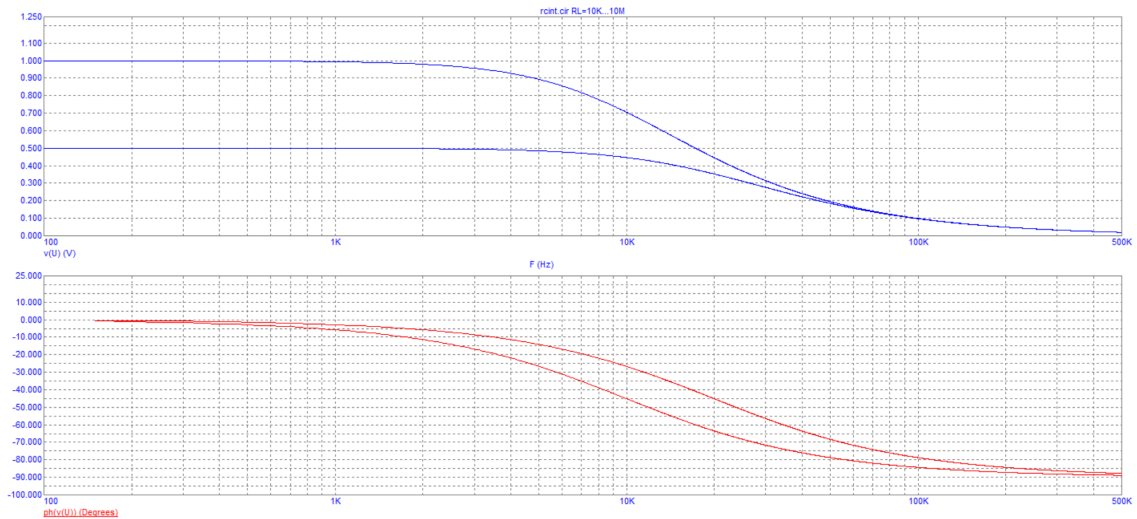
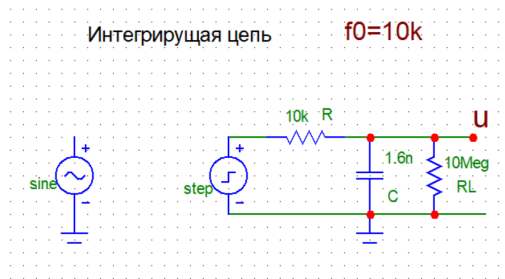
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 1 \quad \kappa\Gamma\mathcal{U},$$

что совпадает со значением для  $f_0$  полученным в первом пункте.

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

По графику видно, что передаточная функция цепи принимает вид:

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

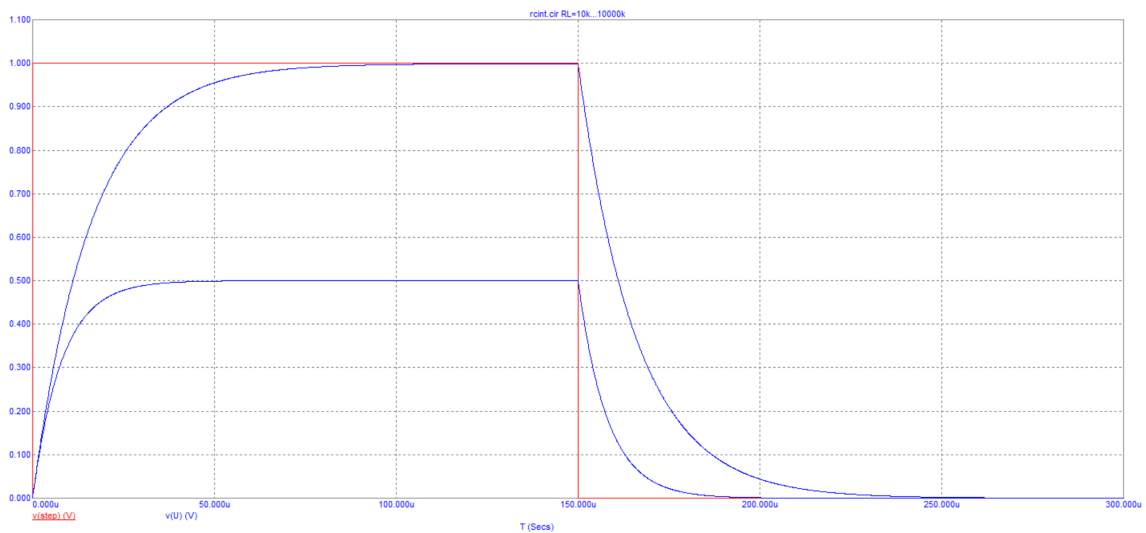


По графику оценим верхнюю частоту:

$$R_L = 10 \text{ кОм}, \quad f_0 \simeq 10 \text{ кГц}$$

$$R_L = 10 \text{ МОм}, \quad f_0 \simeq 19,9 \text{ кГц}$$

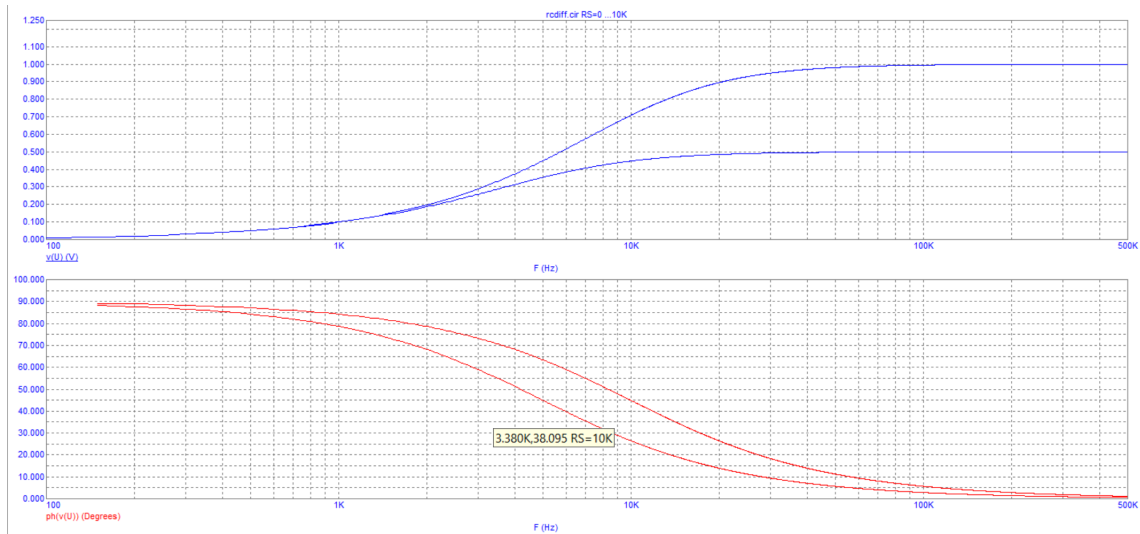
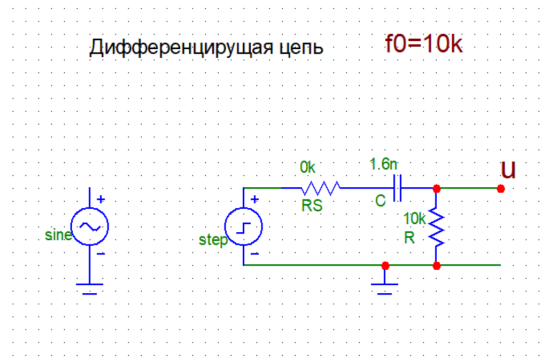
Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени:



$$R_L = 10 \text{ кОм}, \quad \tau \simeq 9,7 \text{ мкс}$$

$$R_L = 10 \text{ МОм}, \quad \tau \simeq 19,6 \text{ мкс}$$

6. 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:

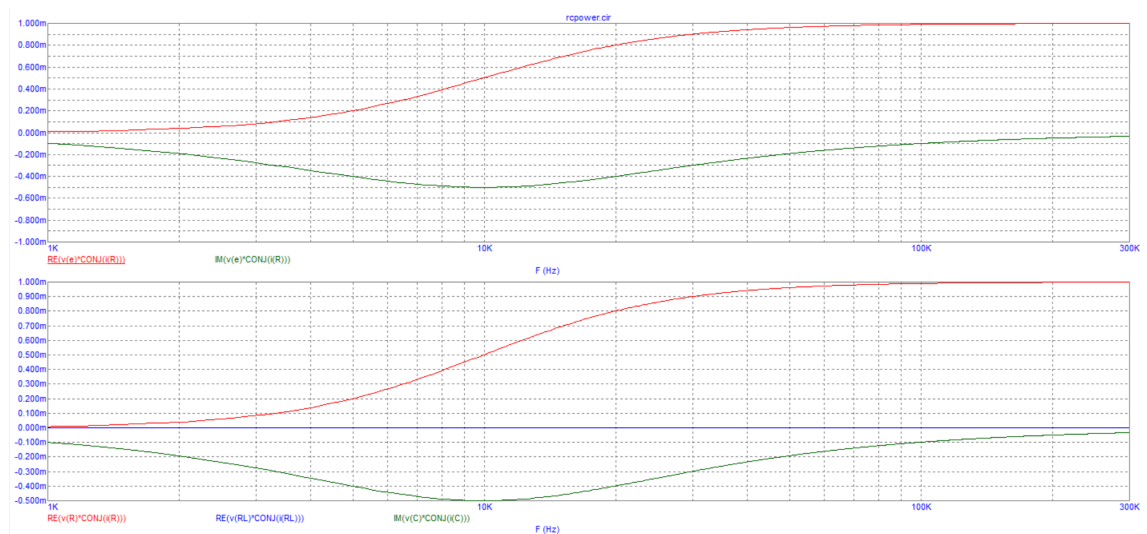
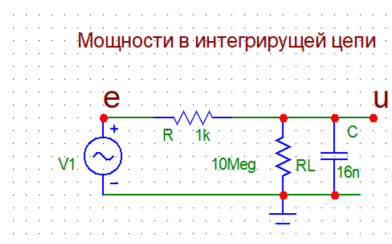
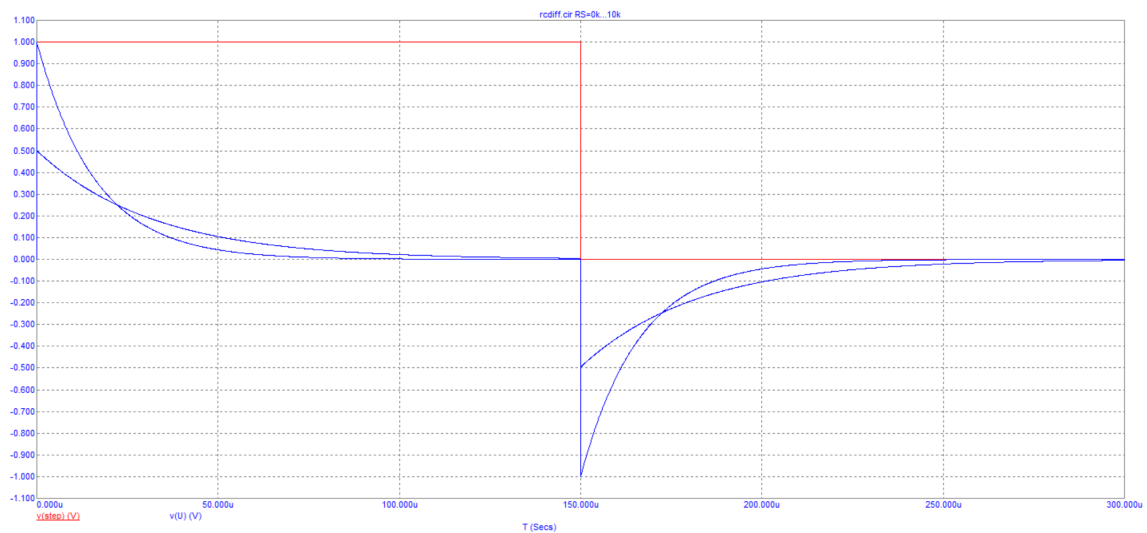
$$\begin{aligned} R_S &= 0 & f_0 &\simeq 9,75 \text{ кГц} \\ R_S &= 10 \text{ кОм}, & f_0 &\simeq 4,88 \text{ кГц} \end{aligned}$$

Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени:

$$\begin{aligned} R_S &= 0, & \tau &\simeq 16,7 \text{ мкс} \\ R_S &= 10 \text{ кОм}, & \tau &\simeq 31,8 \text{ мкс} \end{aligned}$$

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

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

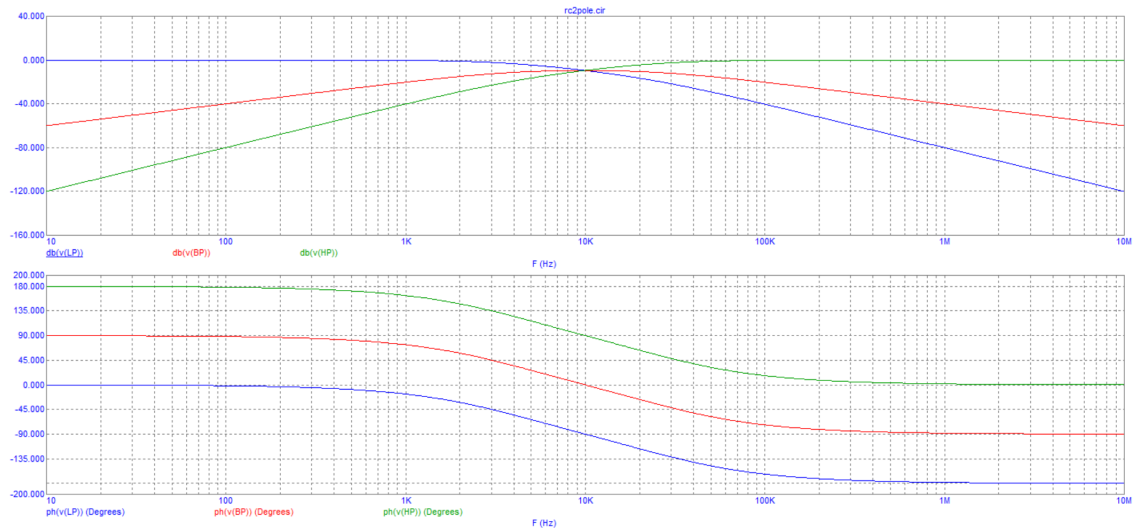
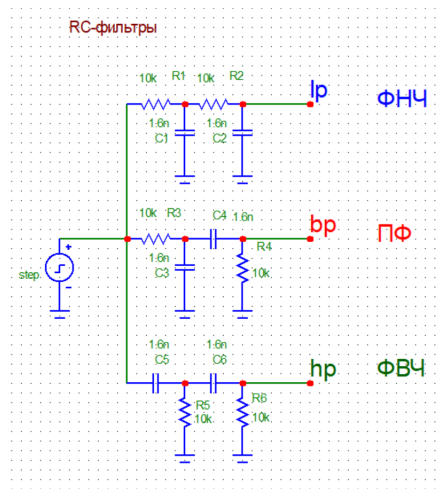
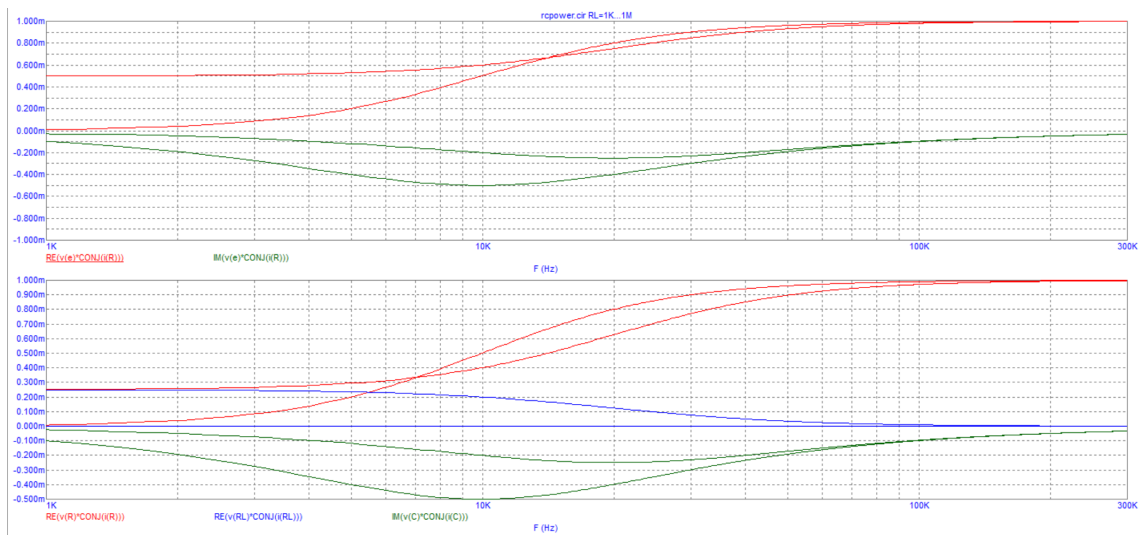


Подключая и отключая резистор  $R_L$  варьированием  $[1k, 1Meg | 1Meg](1Meg = \infty)$ , изучим его влияние на распределение мощностей в схеме при  $f = f_0$ .

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

## ЗАДАНИЕ 2

1. Откроем модель **rc2pole.cir**.



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

	ФВЧ	ПФ	ФНЧ
0	180	90	0
$f_0$	90	0	-90
$\infty$	0	-90	-180

Двухсторонняя полоса  $\Delta f$  пропускания ПФ  $\approx 30 \text{ кГц}$ , что в три раза больше  $f_0$ . Это сходится с теорией.

- Откроем графики переходных характеристик.

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

$$\tau_- = 5 \text{ мкс}$$

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

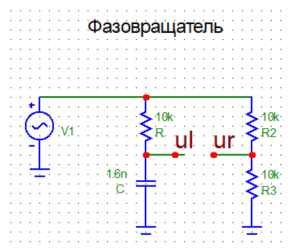
$$\tau_+ = 61 \text{ мкс}$$

Найдем их отношение:

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

## ЗАДАНИЕ 3

- Откроем модель **phshift.cir**.



Наибольший диапазон перестройки реализуется на частоте  $f = 20 \text{ кГц}$ . Границы этого диапазона  $[-143, 4; -22, 7]$ .

- Откроем модель двойного  $T$ -моста **2tbridge.cir**.

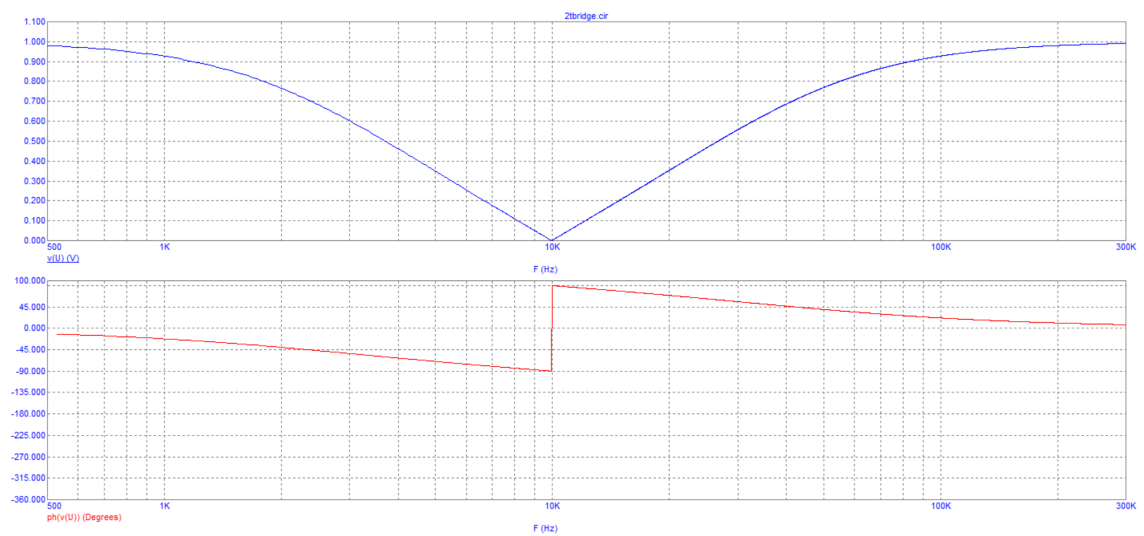
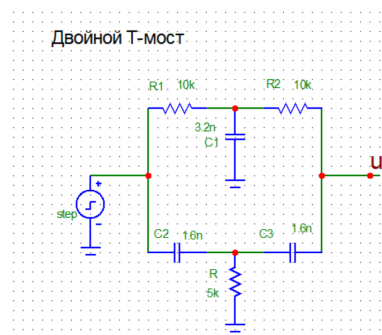
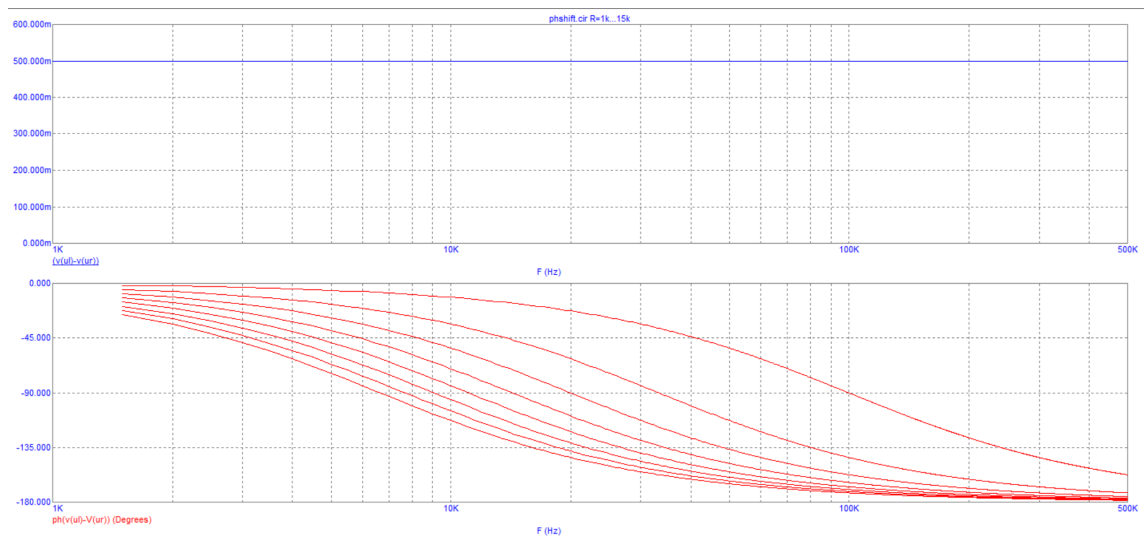
Измерим полосу режекции  $\Delta f = 39 \text{ кГц}$ .  $f_0 = 10 \text{ кГц}$ , следовательно выполняется  $\Delta f = f_0$ .

При росте  $R$ ,  $f_0$  падает. При  $R = 5 \text{ кОм}$  наблюдается скачок на ФЧХ.

- Подключив ко входу источник прямоугольного импульса, проанализируем переходную характеристику.  $\tau_+ = 4 \text{ мкс}$ ,  $\tau_- = 58 \text{ мкс}$ . Это сходится с теоретическими значениями.

Варьирование приводит к усреднению функции.



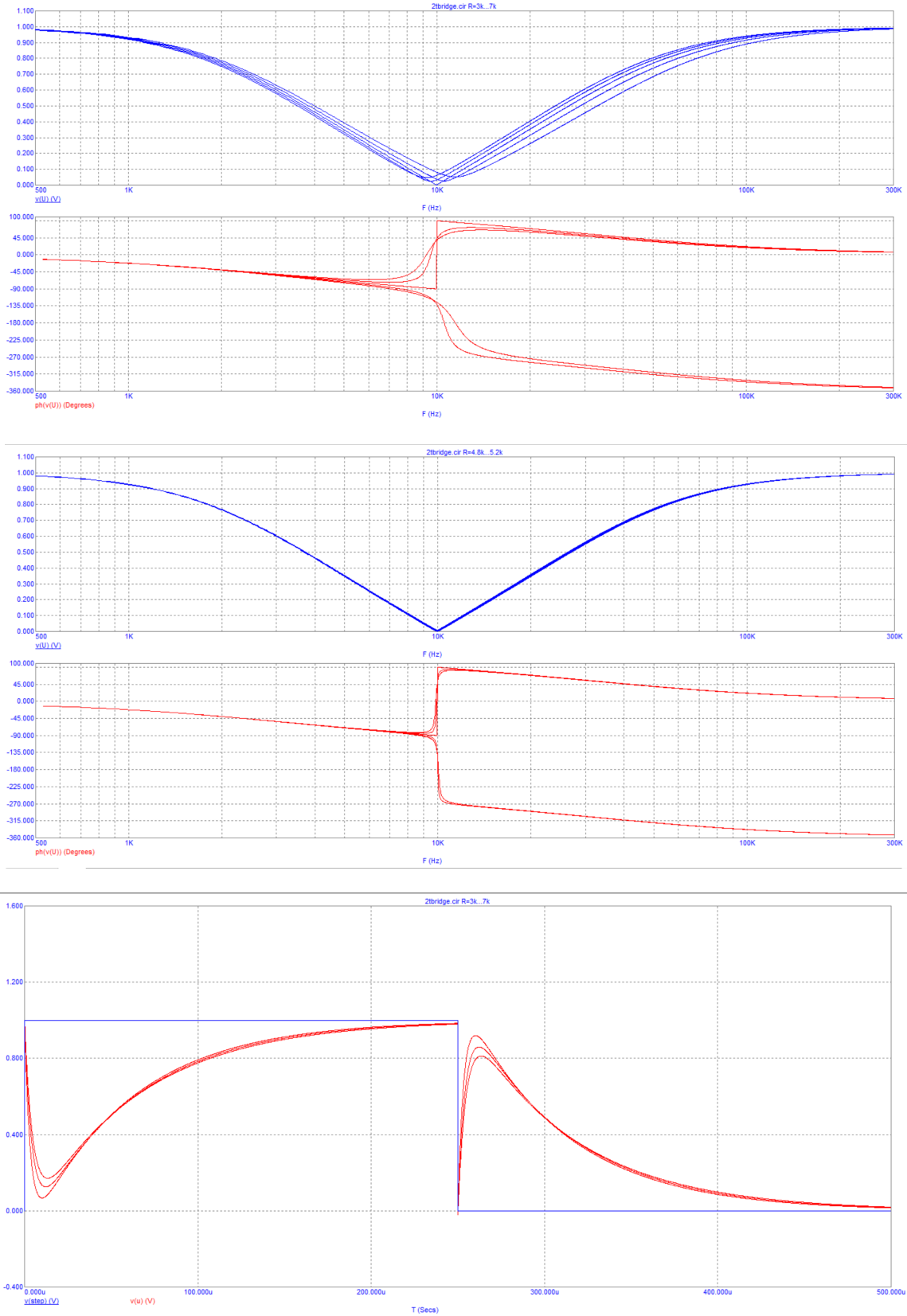


4. Откроем модель **2tdelay.cir**.

Оценим  $Q = f_0/\Delta f$ .

$R, \kappa\Omega$	4,9	5	5,1
$f_0, \kappa\Gamma\text{ц}$	10,05	10	9,95
$\Delta f, \kappa\Gamma\text{ц}$	0,05	$10^{-4} \cdot 2,5$	0,05
$Q$	100,5	40000	99,5

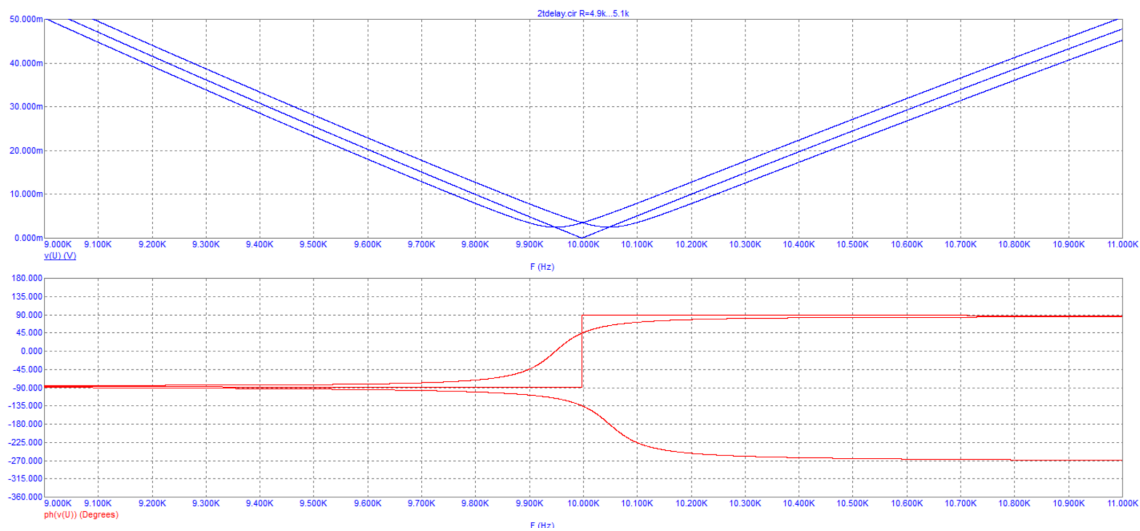
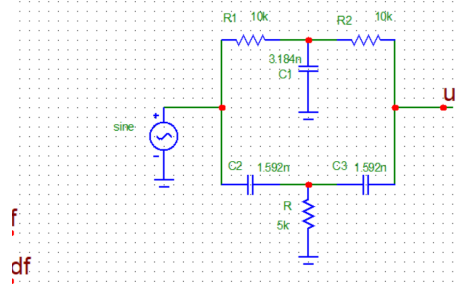
В режиме *Transient* измерим групповые задержки  $\tau_g$ :



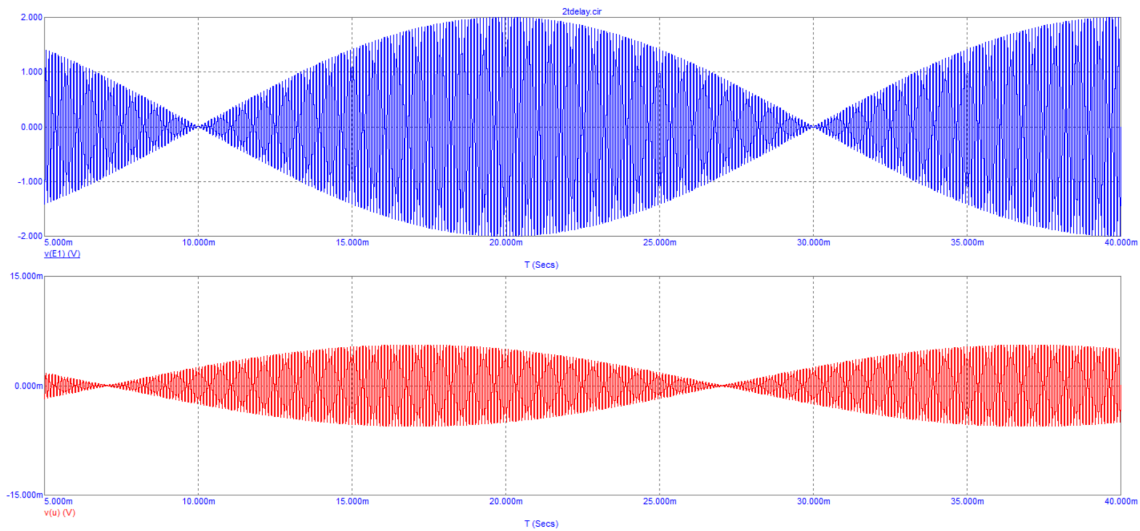
$$\tau_g = 3 \text{ мс},$$

значение для обоих случаев ( $R = 4,9 \text{ кОм}$ ,  $f = 10,05 \text{ кГц}$  и  $R = 5,1 \text{ кОм}$ ,  $f =$

Групповые задержки в двойной Т-мосте



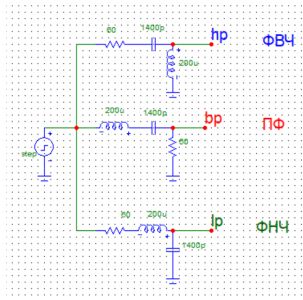
9,95 кОм).



## ЗАДАНИЕ 4

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

$$L = 220 \text{ мкГн}$$



$$C = 1 \text{ мкФ}$$

$$r = 92 \text{ Ом}$$

Измерим резонансную частоту и коэффициент передачи:

$$f_0 = 366 \text{ кГц}$$

$$\Delta f = 75 \text{ кГц}$$

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

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.

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

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

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

$$T = 2,8 \text{ мкс}$$

$$\tau = 0,45 \text{ мкс}$$

$$f_0 = 365 \text{ кГц}$$

$$Q = 6,2$$

Для ФНЧ:

$$T = 2,83 \text{ мкс}$$

$$\tau = 0,49 \text{ мкс}$$

$$f_0 = 352 \text{ кГц}$$

$$Q = 5,7$$

Для ФВЧ:

$$T = 2,84 \text{ мкс}$$

$$\tau = 0,51 \text{ мкс}$$

$$f_0 = 351 \text{ кГц}$$

$$Q = 5,6$$

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

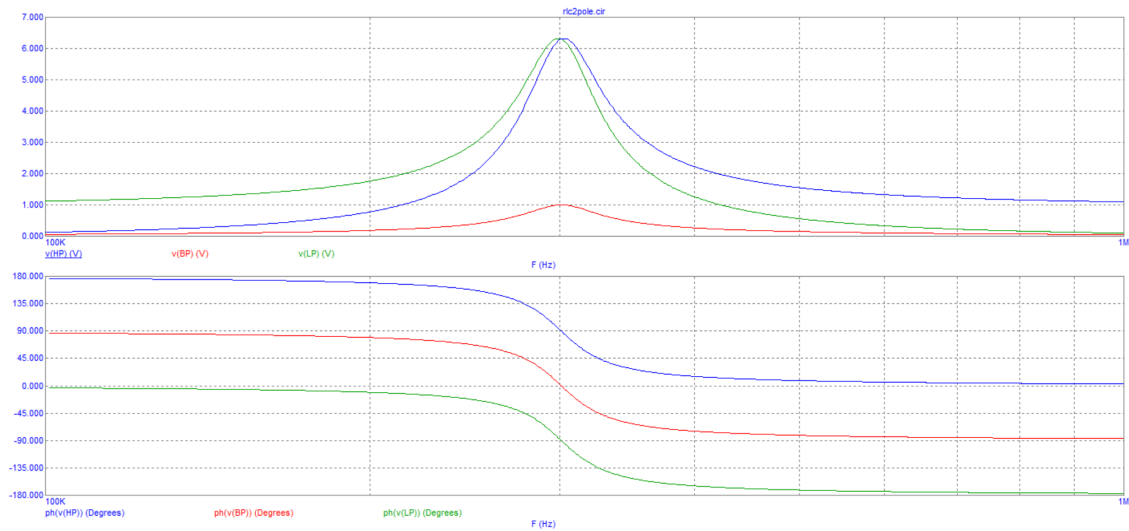


Рис. 1: Частотные и фазовые характеристики

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

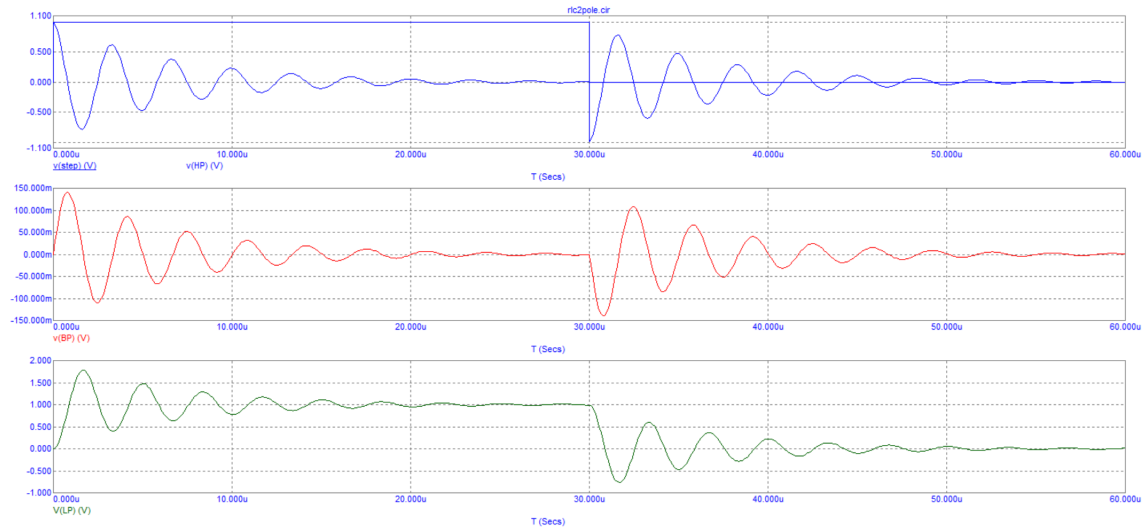
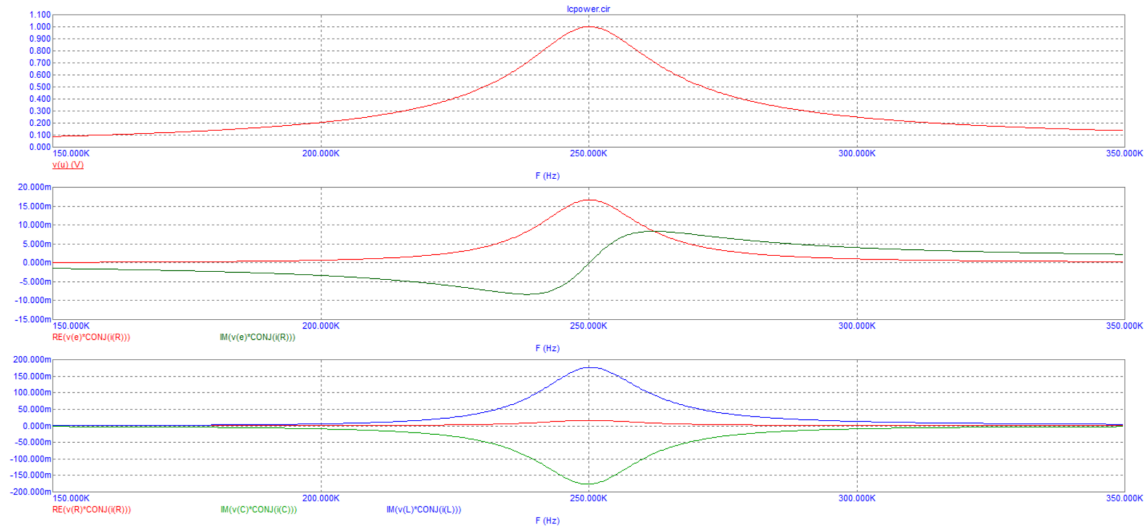


Рис. 2: Переходные характеристики

$R, \text{ Ом}$	10	20	40	100
$\tau_g, \text{ мс}$	0,5	0,29	0,152	0,064
$\tau_{теор}, \text{ мс}$	0,62	0,31	0,155	0,06
$Q$	195	98	49	19

6. Откроем модель **lcpower.cir**.



На частоте резонанса  $f_0 = 250 \text{ кГц}$ .

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

$$P_{\Sigma теор} = 16,18 \text{ м}$$

На одной из границ полосы пропускания  $f_1 = 238 \text{ кГц}$ :

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

$$P_{\Sigma теор} = 11,367 \text{ м}$$

Закон суммирования выполняется.

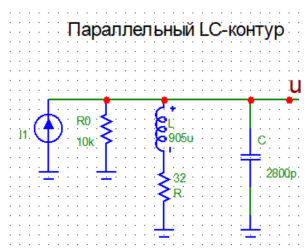
## ЗАДАНИЕ 5

1. Откроем в MicroCap модель **parallel.cir** параллельного контура с  $f_0 = 100 \text{ кГц}$ ,  $\rho = 570$ . По схеме оценим параметры:

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

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

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



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

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

$$Q = 8,84$$

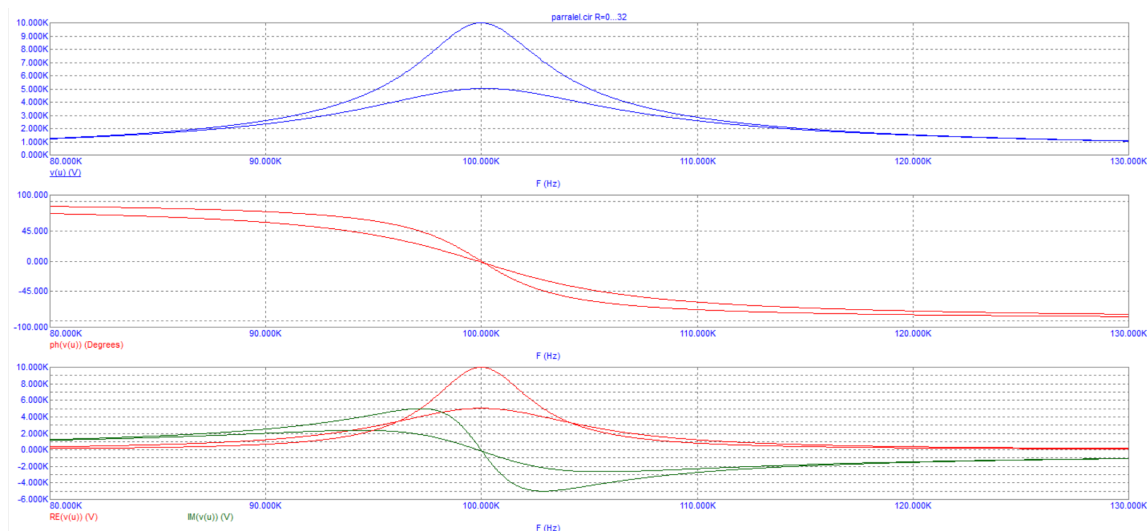
2. Найдем резонансную частоту  $f_0 = 100 \text{ кГц}$ , полосу пропускания  $\Delta f = 11,6 \text{ кГц}$ . Измерим сопротивление контура  $R_0 = 5 \text{ кОм}$ . Оценим добротность как:

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

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

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

Добротность при  $R = 0$ :



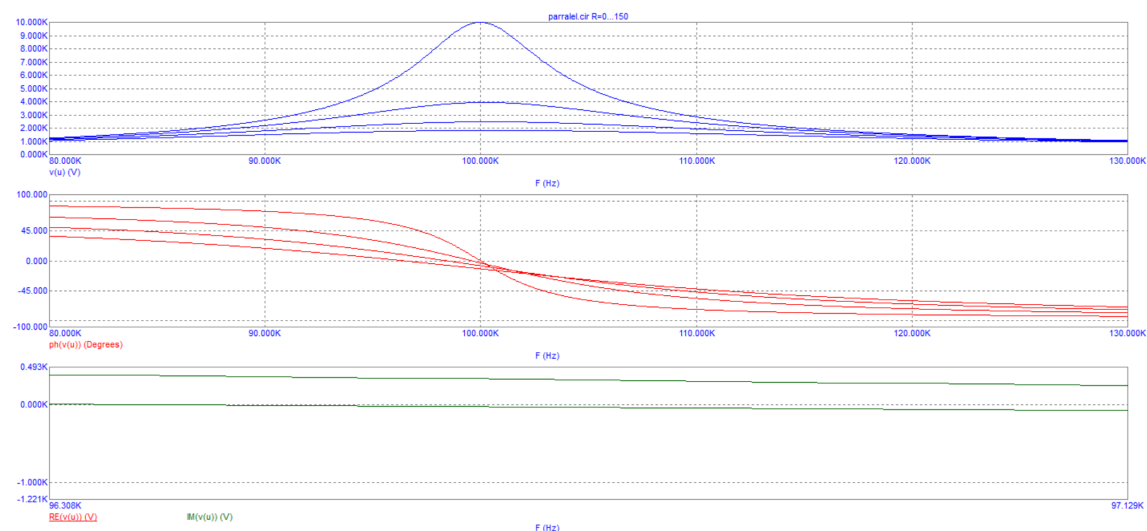
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = 17,3$$

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

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

При увеличении  $R$  от 0  $Om$  до 32  $Om$   $1/Q$  меняется от 0,058 до 0,116. При увеличении  $R_0$  от 10  $\kappa Om$  до 1000  $\kappa Om$   $1/Q$  меняется от 0,116 до 0,058.

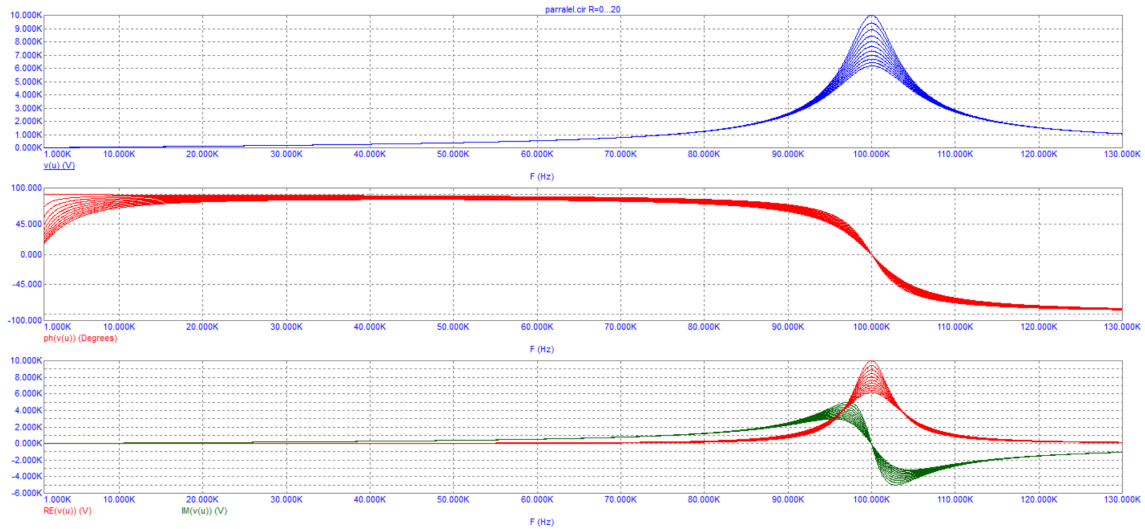
4. Изучим зависимость частоты параллельного резонанса от  $R = [0, 150 || 50]$ .



$R, Om$	0	50	100	150
$f_{эксн}, \kappaГц$	100	99,6	98,42	96,4
$\beta$	0	0,088	0,176	0,264
$f_{теор}$	100	99,6	98,43	96,45



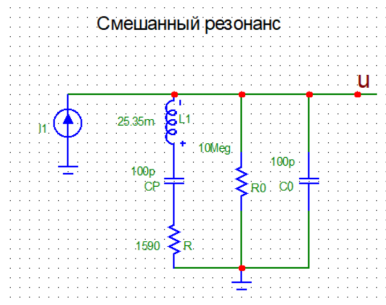
5. Исследуем влияние последовательных потерь в области низких частот. Установим частотный диапазон от  $1 \text{ кГц}$  до  $130 \text{ кГц}$  и будем варьировать  $R = [0, 20 \parallel 2]$ .



Получаем, что при  $R = 12 \text{ Ом}$  фазовый сдвиг на частоте  $f = 2 \text{ кГц}$  составляет  $\pi/4$ .

## ЗАДАНИЕ 6

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



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

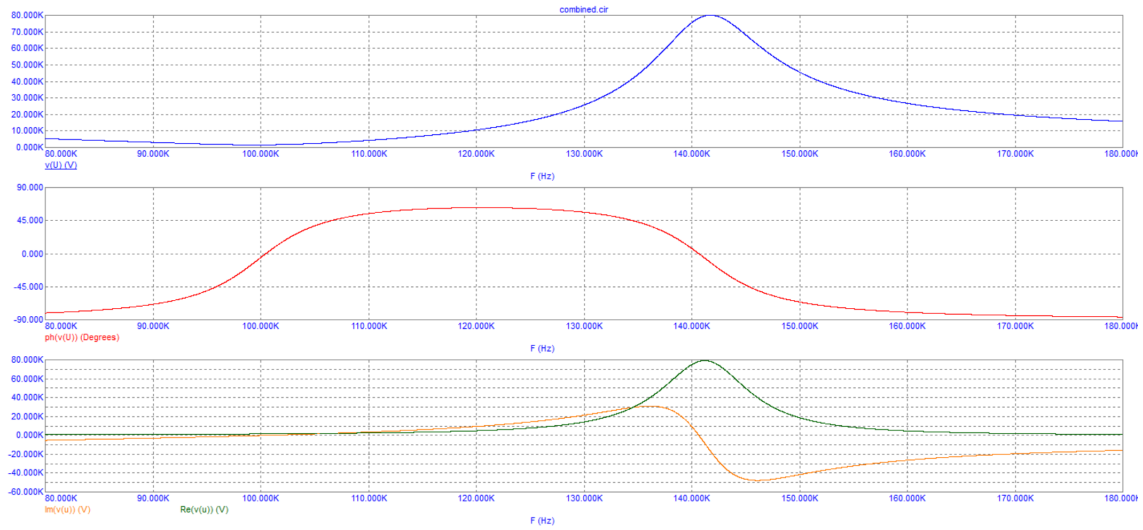
2. Измерим частоты  $f_p, f_0$  последовательного и параллельного резонансов по точкам пересечения нуля фазовой характеристикой:

$$f_p = 100,5 \text{ кГц} \quad f_0 = 140,6 \text{ кГц}$$

Измерим полосы  $\Delta f_p, \Delta f_0$ , в которых фазовая характеристика изменяется в диапазоне  $\pm 45 \text{ deg}$  в окрестностях резонансов.

$$\Delta f_p = 10,6 \text{ кГц}$$

$$\Delta f_0 = 10,8 \text{ кГц}$$



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

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

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

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

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

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

$$r_{эксн} = 1,565 \kappa O\mathcal{M} \simeq 1,59 \kappa O\mathcal{M} = r_{теор}$$

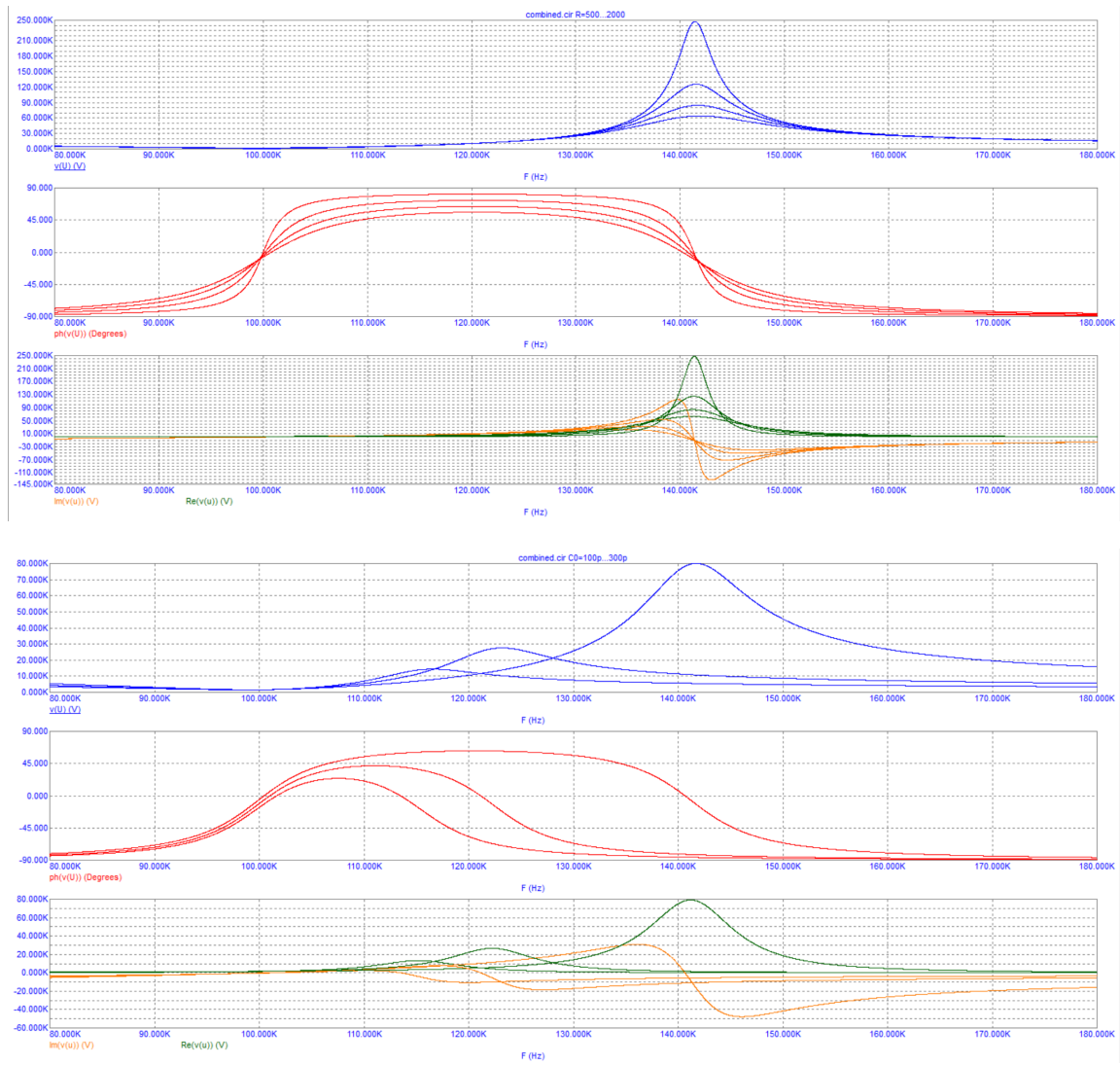
$$(k^2\rho_p, Q_p)_{эксн} = 78,1 \kappa O\mathcal{M} \simeq 79,1 \kappa O\mathcal{M} = \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 \sqrt{\frac{L}{c}}(1+\alpha)\frac{r}{\rho} = (k^2\rho_p, Q_p)_{теор}$$

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  $C_0$ .

$R, O\mathcal{M}$	500	1000	1500	2000
$Z, \kappa O\mathcal{M}$	247	124,4	83	61,9

Получаем зависимость:

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



$C_0, n\Phi$	100	200	300
$Z, \kappa Om$	78,3	25,4	11,9

Получаем зависимость:

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

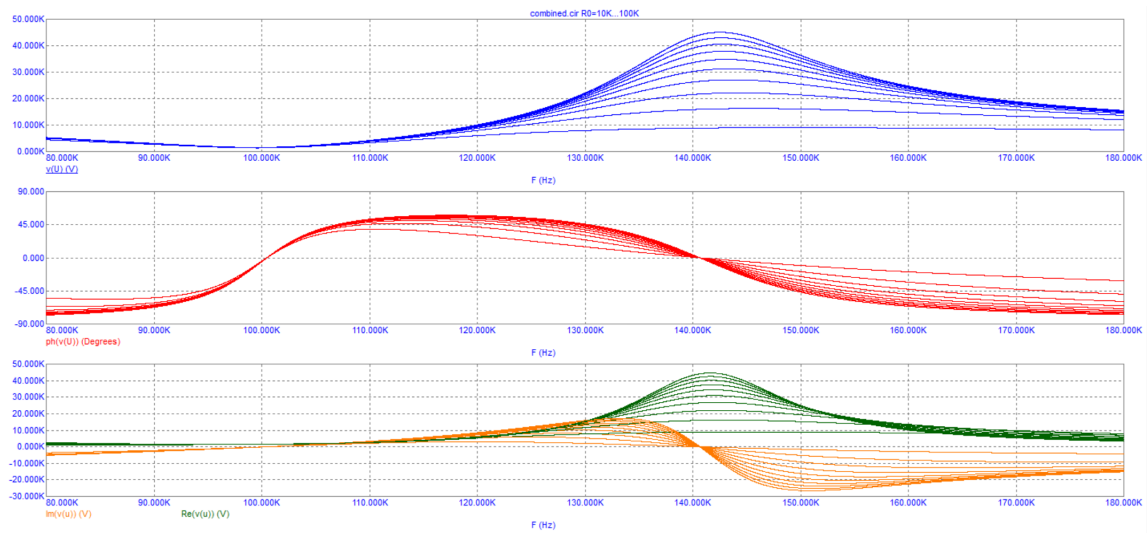
- Обнулим последовательности потери  $r$  и варьированием  $R_0 = [10k, 100k || 10k]$  подберем сопротивления параллельных потерь так, чтобы достичь того же резонансного сопротивления, что и при  $r = 1590 \text{ Ом}$ .

Получим  $R_0 = 80 \text{ кОм}$ . Проверим закон пересчета:

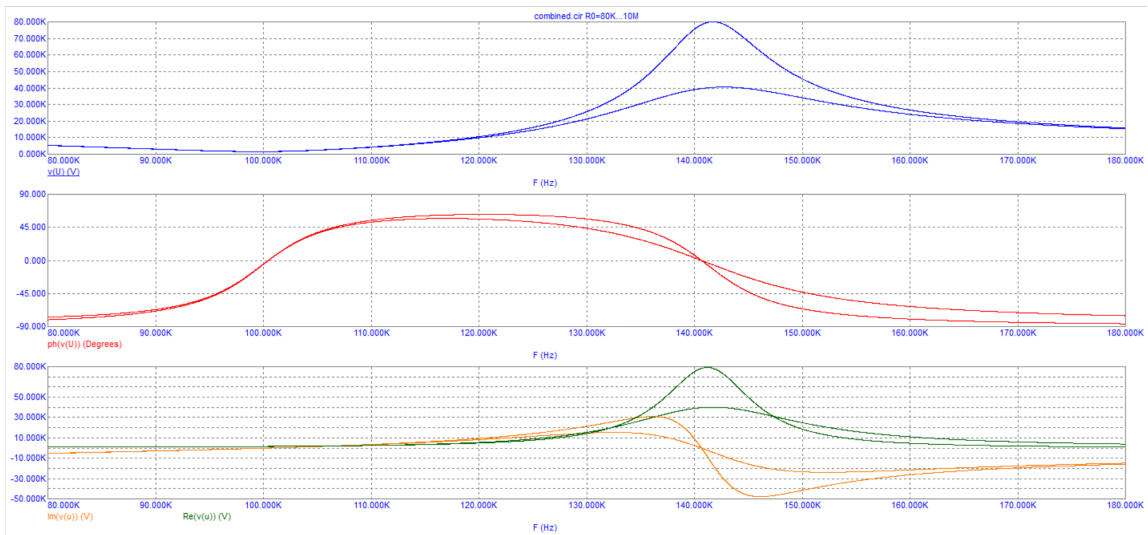
$$R_0 r = k^2 \rho_p^2$$

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

Соотношение выше выполняется.



5. Варьируя  $R_0 = [80k, 10Meg || 10Meg]$  при  $r = 1590 \text{ Ом}$ , 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.