Московский Физико-Технический Институт

Лабораторная работа по радиотехническим сигналам и цепям

Пассивные электрические цепи.

Автор:
Глеб Уваркин
615 группа

26 сентября 2017 г.

Задание №1.Интегрирующие и дифференцирующие звенья.

,

1.

На макетной плате соберём интегрирующую цепь с постоянной времени $\tau \simeq 0.1$ мс, $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 1600$ Гц, $R \simeq 100$ Ом, $C \simeq 100$ мкФ.

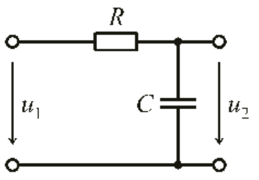


Рис. 1: Интегрирующая цепь.

2.

Подключим генератор синусоидальных сигналов и осциллограф. Экспериментально оценим верхнюю граничную частоту f_0 по уровню $\frac{1}{\sqrt{2}} \simeq 0.7 = -3$dB.

На частоте 10 Гц двойная амплитуда равна 1.946В. $1.946 \cdot 0.7 \simeq 1.362$В. На частоте 1.3 кГц получаем двойное напряжение 1.353В. Значит, $f_0 \simeq 1.3$кГц.

Измерим значения коэффициента передачи $K(f)$ на частотах $f = 2^n f_0, n = [-2, 4]$.

$$K(f)_{\text{эксп}} = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}},$$

где $A_{\text{вх}} = 1$В-амплитуда входного сигнала.

$$K(f)_{\text{теор}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

f, Гц	325	650	1300	2600	5200	10400	20800
$A_{\text{вых}}$,мв	1917	1732	1345	866	471	247	125
$K(f)_{\text{эксп}}$	0.96	0.87	0.67	0.43	0.24	0.12	0.06
$K(f)_{\text{теор}}$	0.97	0.89	0.70	0.45	0.24	0.12	0.06

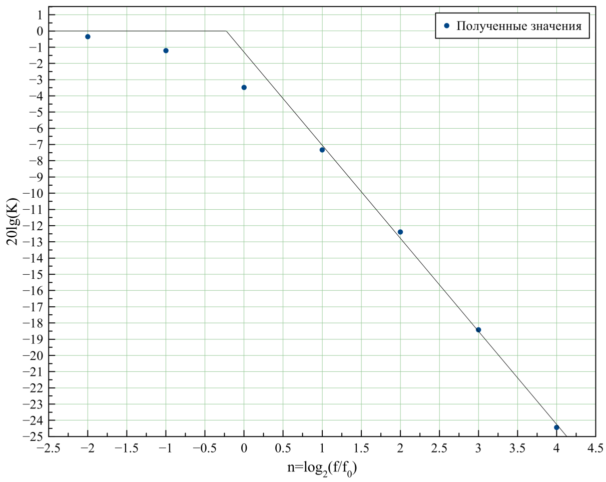


Рис. 2: Граф Боде для интегрирующей цепи.

3.

Подключим генератор прямоугольных сигналов. По осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени τ, измерив время нарастания фронта импульса от нуля до уровня $1 - 1/e \simeq 0.63$. Получим $\underline{\tau \simeq 130\text{мкс}}$. $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 1.2\text{кГц} \simeq 1.3\text{кГц}$ - рассчитанная частота f_0 совпадает с полученной экспериментально, значит равенство $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}$ верно.

4.

Превратим интегрирующую цепь в дифференцирующую. Оценим нижнюю граничную частоту f_0 по уровню $\simeq 0.7 = -3$dB. На частоте 3.03 МГц двойная амплитуда равна 1.309В. $1.309 \cdot 0.7 \simeq 0.92$В. На частоте 1.3кГц получаем двойную амплитуда $0.95 \simeq 0.92$. Значит, $\underline{f_0 \simeq 1.3\text{кГц}}$.

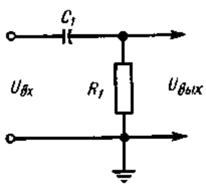


Рис. 3: Дифференцирующая цепь.

Измерим значения коэффициента передачи $K(f)$ на частотах $f = 2^n f_0, n = [-4, 2]$.

$$K(f)_{\text{эксп}} = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}},\ K(f)_{\text{теор}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-2}}}.$$

f, Гц	87.5	163	325	650	1300	2600	5200
$2A_{\text{вых}}$,мв	92.5	177	346	621	952	1178	1280
$K(f)_{\text{эксп}}$	0.05	0.10	0.22	0.42	0.68	0.88	0.95
$K(f)_{\text{теор}}$	0.07	0.12	0.24	0.45	0.71	0.89	0.97

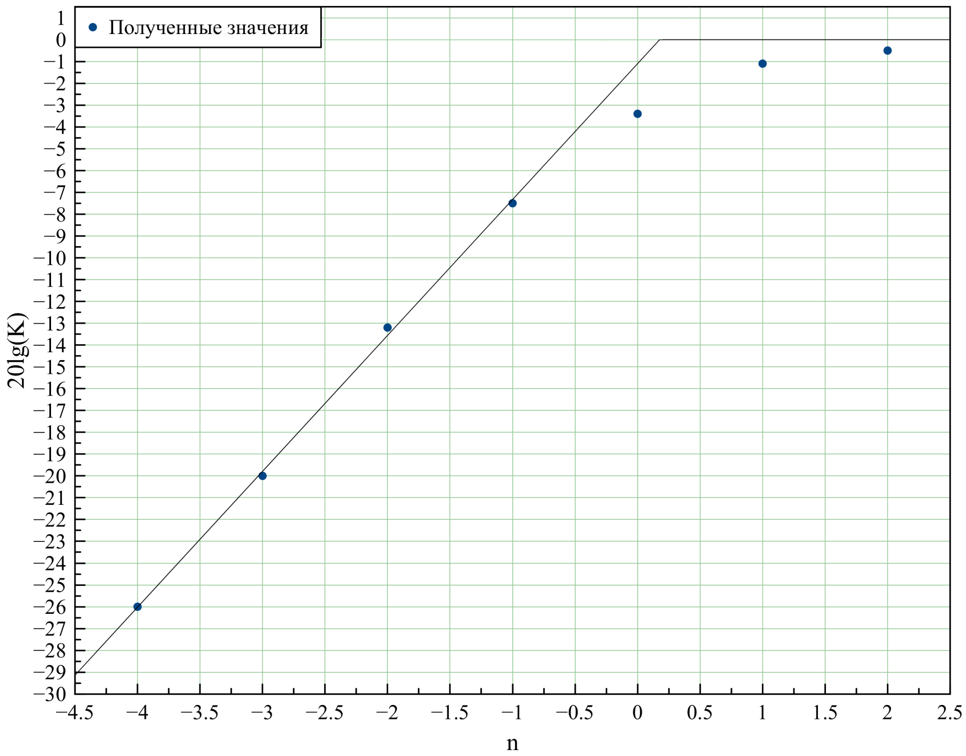


Рис. 4: Граф Боде для дифференцирующей цепи.

По осциллограмме переходной характеристики оценим постоянную времени τ, измерив время спада вершины импульса от нуля до уровня $1/e \simeq 0.37$. Получим $\tau \simeq 125$мкс. $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \simeq 1.27$кГц $\simeq 1.3$кГц. Теоретическое значение f_0 совпадает с экспериментальным - формула $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}$ верна.

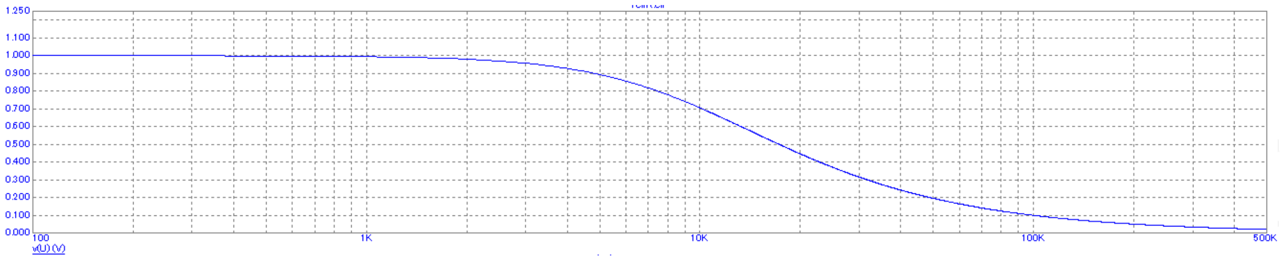
5.

В MicroCap откроем модель **rcint.cir**.Изучим графики частотной и фазовой характеристик интегрирующей цепи. Оценим ее верхнюю частоту. Получим $f_0 \simeq 10$кГц. Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени. Получим $\tau \simeq 15.903$мкс. Убедимся в том, что при наличии сопротивления R_L передаточная функция цепи принимает вид:

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

$$K_0 \simeq 1,\ \tau \simeq 0.1\text{мс},\ H(p) = \frac{K_0(1-p\tau)}{1-p^2\tau^2} = \frac{K_0(1-jw\tau)}{1+w^2\tau^2} = \frac{1}{1+\omega^2\cdot 10^{-8}} - j\frac{\omega\cdot 10^{-4}}{1+\omega^2\cdot 10^{-8}}$$

Изобразим график $|H(p)|(\omega)$.



6.

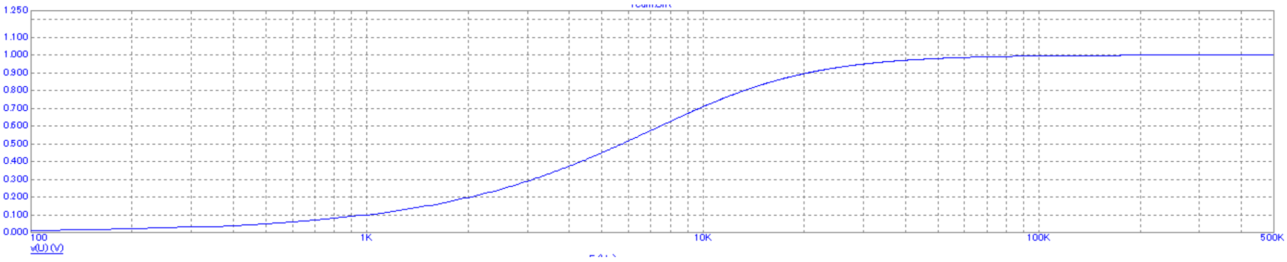
Откроем модель **rcdiff.cir**. Изучим частотную и фазовую характеристики дифференцирующей цепи, оценим ее нижнюю частоту. Получим $f_0 \simeq 10$кГц. Изучим переходную характеристику. По графику оценим постоянную времени. Получим $\tau \simeq 15.9$мкс. Проанализируем влияние резистора R_S, задав его варьирование $R_S = [0, 10k|10k]$. При увеличении R_S увеличивается время спада вершины импульса, и уменьшается минимальное значение амплитуды.

Убедимся, что при наличии $R_S \neq 0$ передаточная функция принимает вид

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

$$K_0 \simeq 1,\ \tau \simeq 0.1\text{мс},\ H(p) = \frac{K_0 p\tau(1-p\tau)}{1-p^2\tau^2} = \frac{-K_0 p^2\tau^2}{1-p^2\tau^2} + \frac{K_0 p\tau}{1-p^2\tau^2} = \frac{\omega^2\cdot 10^{-8}}{1+\omega^2\cdot 10^{-8}} + j\frac{\omega\cdot 10^{-4}}{1+\omega^2\cdot 10^{-8}}$$
.

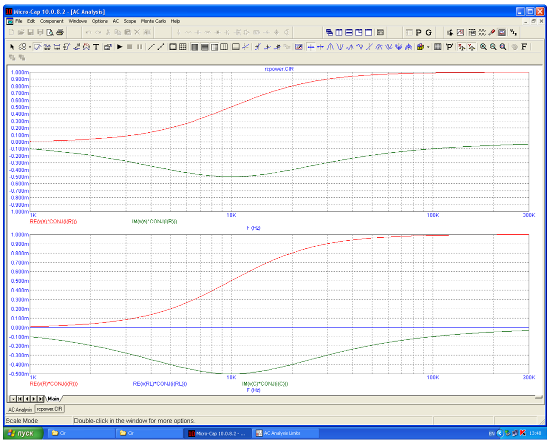
Изобразим график $|H(p)|(\omega)$.



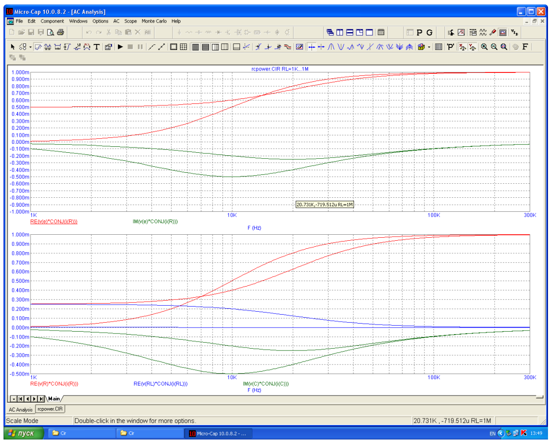
7.

Откроем модель **rcpower.cir**. Изучим графики частотной зависимости потребляемых интегрирующей цепью активной и реактивной мощностей и графики мощностей на ее компонентах.

Проверим выполнение закона сложения мощностей на граничной частоте $f_0 = 10$к. Закон сложения мощностей выполняется, так как активная мощность, потребляемая цепью, равна мощности активного сопротивления $R : W \simeq 0.5$мВт, а реактивная - конденсатора $C : W \simeq -0.5$мВт. Подключая и отключая резистор R_L варьированием $[1k, 1Meg|1Meg]$. Изучим его влияние на распределение мощностей в схеме при $f = f_0$. При уменьшении R_L до 1k при f_0 его полная мощность возрастает до 0.2 мВт, мощность на R падает до 0.4 мВт, а реактивная мощность конденсатора становится равной -0.2 мВт.



а) режим АС.



б) Варьирование R_L.

Задание 2.RC-звенья второго порядка.

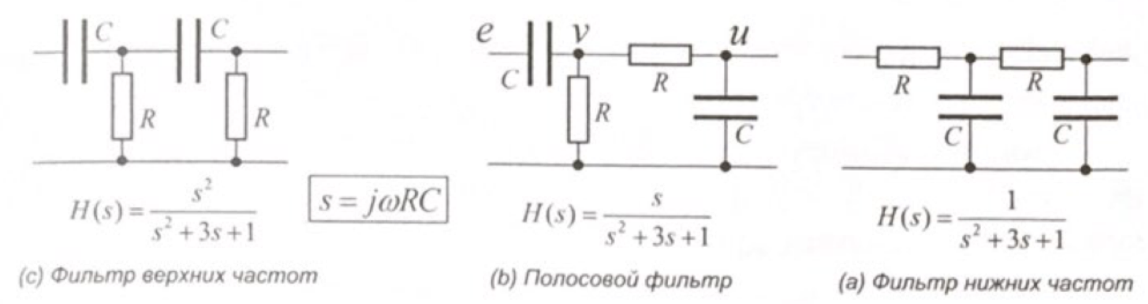


Рис. 5: Три варианта звеньев второго порядка.

1.

Откроем модель **rc2pole.cir**. По графикам АЧХ и ФЧХ определим затухание на частоте $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 9.948$ кГц, которое составила 9.51 dB и скорость его нарастания в полосах задержания -40.69+9.5=-31.18 dB/декаду. По графикам ФЧХ измерим значения фазовых сдвигов ФВЧ, ПФ и ФНЧ на частотах 0, f_0, ∞.

Таблица 1: Значения фазовых сдвигов

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

Двухсторонняя полоса Δf пропускания ПФ = 30 кГц, что в три раза больше f_0. Это сходится с теорией.

2.

Открыв графики переходных характеристик, оценим время спада τ_- первого выброса переходной характеристики ФВЧ до уровня e^{-1} и время τ_+ нарастания фронта переходной характеристики ФНЧ до уровня $1 - e^{-1}$.

$$\tau_+ = 47.33 \text{ мс},\ \tau_- = 3.67 \text{ мс} \rightarrow \frac{\tau_+}{\tau_-} = 12.89$$

Задание №3.Мостовые схемы.

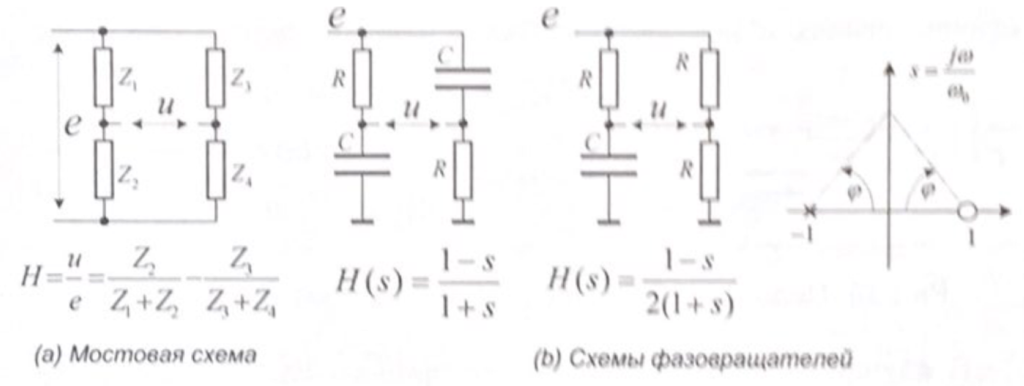


Рис. 6: Мостовые схемы.

1.

Откроем модель фазовращателя. На частоте $f = 25$ кГц реализуется наибольший диапазон перестройки фазы при варьировании $R = [1k, 15k|2k]$, границы этого диапазона $\varphi = [-150, 73°; -28.54°]$.

2.

Откроем модель двойного Т–моста. Изучим его частотную и фазовую характеристики. Измерим ширину полосы режекции $\Delta f = 41.75k - 2.37k = 39.38k \simeq 4f_0$. Изучим поведение характеристик при варьировании $R = [3k, 7k|1k]$ и $[4.8, 5.2k|0.1k]$. При росте R f_0 падает, при $R = 5k$ наблюдается скачок на ФЧХ.

3.

Подключим ко входу источник прямоугольного импульса и проанализируем переходную характеристику. Оценим время спада $\tau_- = 3.9$ мкс и нарастание $\tau_+ = 59$ мкс, что совпадает с теорией $\tau_+ = \frac{1}{2\pi f_0 \mu_\pm}, \mu_\pm = 2 \pm \sqrt{3}$. Варьирование $R = [3k, 7k|2k]$ приводит к усреднению функции.

4.

Оценим частоты f_0 и добротность $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$ нулей передачи при $R = [4.9k, 5.1k|0.3k]$

R, кОм	4.9	5	5.1
f_0, кГц	10.05	10	9.95
Δf, кГц	0.1	0.001	0.1
Q	100.5	1000	99.5

Подключим источник E_1 двухчастотного сигнала $\sin 2\pi(f-df)t + \sin 2\pi(f+df)t,\ df = 25$. Измерим τ_g:

$$R = 4.9k, \quad f = 10.05k \Rightarrow \tau_g = 3 \text{ мс}; \qquad \tau_{g \text{ теор.}} = \frac{Q}{\pi f} = 3.18 \text{ мс}$$

$$R = 5.1k, \quad = 9.95k \Rightarrow \tau_g = 3 \text{ мс}; \qquad \tau_{g \text{ теор.}} == \frac{Q}{\pi f} = 3.18 \text{ мс}$$

Задание №4.Последовательный резонанс.

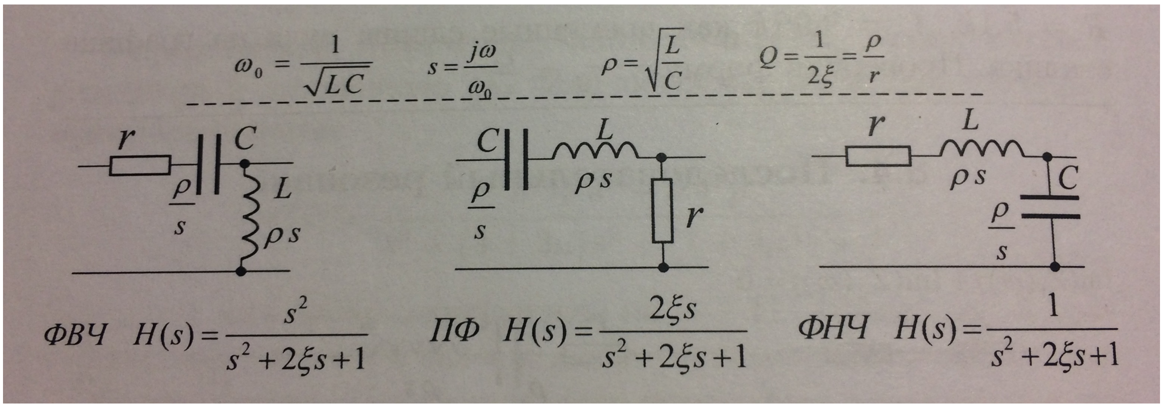


Рис. 7: Двухполюсные резонансы.

1.

На макетной плате соберём схему полосового фильтра, выбрав $L \sim 200\mu$, $C \sim 1000p$, $r \sim 90 (f_0 \sim 360k,\ \rho\ 450, Q \sim 5)$. Подключив генератор синусоидального сигнала, измерим резонансную частоту $f_0 \simeq 364k$, коэффициент передачи $K(f_0) \simeq 1.103$ и ширину Δf пика по уровню $0.7 = -3dB$: $\Delta f = 431 - 307 = 124k$. Оценим добротность как $Q = f_0/\Delta f = 364/124 \simeq 2.94$.

2.

Из тех же компонент соберём схемы фильтров верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот. Измерим отношения $K(f_0)/K(0) \simeq 5.778/1.769 \simeq 3.27$ для ФНЧ и $K(f_0)/K(\infty) \simeq 5.91/1.618 \simeq 3.65$ для ФВЧ.

3.

Подключив генератор прямоугольных импульсов, изучим переходные характеристики ФВЧ, ПФ, и ФНЧ. Прикинув по осциллограммам период колебаний и время их затухания до уровня $1/e = 0.37$, дадим оценку резонансной частоты f_0 и добротности Q.

Вид схемы	T, мкс	τ, мкс	f_0, кГц	Q
ФВЧ	2.40	2.84	366	7.1
ФНЧ	3.29	2.62	392	4.9
ПФ	2.81	2.83	366	6.1

$$\xi = \frac{1}{\omega_0 T} = \frac{2\pi}{f_0 T};\ \sqrt{1-\xi^2} = \frac{2\pi}{\omega_0 \tau} \Rightarrow 1 - \frac{1}{\omega_0^2 T^2} = \frac{4\pi^2}{\omega_0^2 \tau^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi^2}{\tau^2} + \frac{1}{T^2}} \Rightarrow f_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{4\pi^2 T^2}}$$

4.

Откроем в MicroCap модель **rlc2pole.cir**, изучим частотные фазовые и переходные характеристики фильтров. Сравним результаты моделирования с экспериментом.

5.

Откроем модель **groupdel.cir** полосового фильтра с $f_0 = 100k$, $\rho = 2k$. Наблюдая в режиме Transient отклик на двухчастотный сигнал $\sin 2\pi(f - df)t + \sin 2\pi(f + df)t$, изучим зависимость групповой задержки τ_g от $R = 10, 20, 40, 100..$ Сравним результаты с теорией: $\tau_g = -\dfrac{d\phi}{d\omega} = \dfrac{Q}{\pi f_0}$.

R, Ом	10	20	40	100
τ_g, мс	0.65	0.30	0.15	0.06
$\tau_{\text{теор}}$, мс	0.64	0.32	0.16	0.06
Q	200	100	50	20

6.

Откроем модель **lcpower.cir**, изучим графики распределения мощностей в резонансной LRC-цепи. Проверим выполнение закона суммирования мощностей на частоте резонанса и на границах полосы пропускания:

На частоте резонанса($f_0 = 250k$).

$P_L = 177.143m,\ P_C = -178.571m,\ P_R = 18.571m \Rightarrow \sum P \simeq 17.14m.$

На границах полосы пропускания: $f_1 = 238k, f_2 = 262k$.

f_1: $P_L = 85.06m,\ P_C = -87.83m,\ P_R = 9.36m \Rightarrow \sum P \simeq 6.59m$

f_2: $P_L = 88.71m,\ P_C = -89.54m,\ P_R = 8.75m \Rightarrow \sum P \simeq 7.92m.$

Закон суммирования выполняется.

Задание №5.Параллельный перенос.

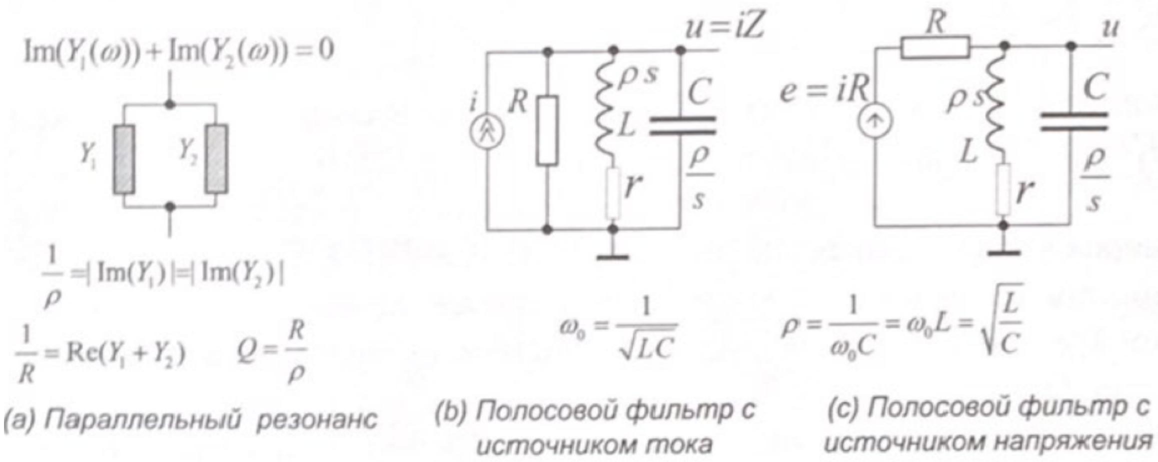


Рис. 8: Явление параллельного резонанса.

1.

Откроем в MicroCap модель **parallel.cir** параллельного контура с $f_0 = 100k, \varrho = 570$. По схеме оценим параметры $\alpha = \frac{\rho}{R_0}$, $\beta = \frac{R}{\rho}$, $Q = \frac{1}{\alpha+\beta}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{905 \cdot 10^{-6}}{2800 \cdot 10^{-12}}} \simeq 569$ Ом. Получаем $\underline{\alpha = \frac{569}{10000} \simeq 0.057,\ \beta = \frac{32}{569} \simeq 0.056,\ Q = \frac{1}{0.057+0.056} \simeq 8.85}$.

2.

Измерим сопротивление контура R_0 на резонансной частоте и полосу Δf пропускания по уровню $0.7 = -3$dB. Получаем $R_0 \simeq 5$ кОм, $\Delta f \simeq 11.15$ кГц. Оценим его добротность как $Q = \frac{R_0}{\rho} = \frac{5000}{569} \simeq 8.79$ и $Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{100000}{11150} \simeq 0.89$

3.

Изучим влияние на добротность последовательных потерь R, установив варьирование $R = [0, 32|32]$.Измерим добротность при R = 0: $Q = \frac{100000}{5775} \simeq 17.3$.

Изучим влияние параллельных потерь R_0, установив варьирование $R_0 = [10k, 1000k|1000k]$. Измерим добротность при $R_0 = 1000$ кОм: $Q = \frac{100000}{5658} \simeq 17.7$. Оценим вклады каждого из резисторов R, R_0 в затухание $\frac{1}{Q}$. При увеличении R от 0 Ом до 32 Ом, затухание меняется с 0.057 на 0.116. При увеличении R_0 от 10 кОм до 1000 кОм затухание меняется с 0.114 на 0.056.

4.

Изучим зависимость частоты параллельного резонанса от $R = [0, 150|50]$. Частоту резонанса измерим по пересечению нуля фазовой характеристикой. Проверим формулу $f = f_0\sqrt{1 - \beta^2}$.

Таблица 2: Подтверждение формулы $f = f_0\sqrt{1-\beta^2}$.

R, Ом	0	50	100	150
$f_{\text{эксп}}$	100.0	99.6	98.4	96.5
β	0.00	0.14	0.18	0.26
$f_{\text{теор}}$	100.0	99.0	98.4	96.6

5.

Исследуем влияние последовательности потерь в области низких частот. Для этого установим частотный диапазон от 1k до 130k и будем варьировать $R = [0, 20|2]$. Получим, что при сопротивлении $R = 12$ Ом фазовый сдвиг на частоте 2k составляет $\pi/4$.

Задание №6.Смешанные резонансы.

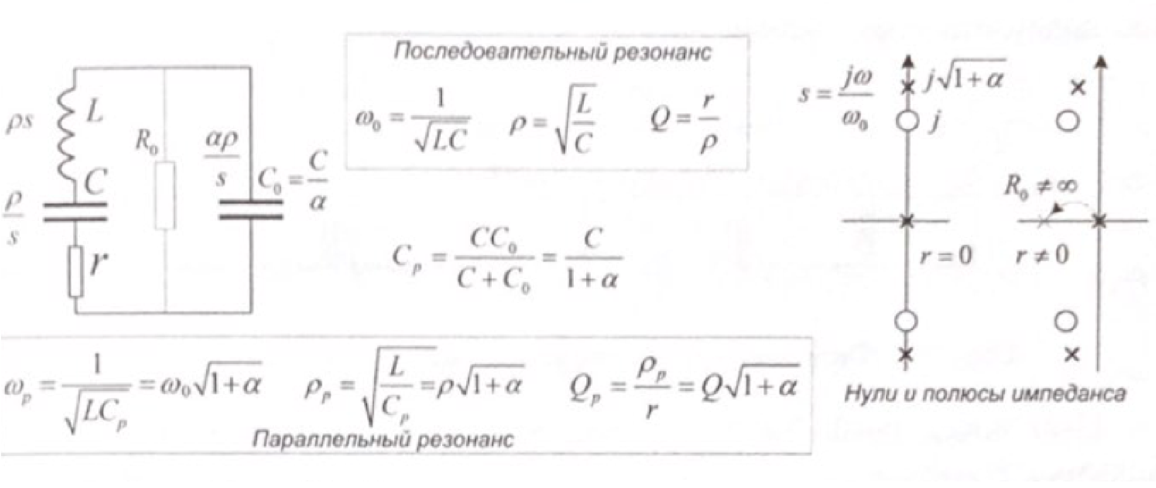


Рис. 9: Контур со смешанным резонансом.

1.

Откроем модель **combined.cir** с $f_0 = 100k$, $\rho = 15.9k$, $Q \simeq 10$, $\alpha = 1$. Изучим графики частотной и фазовой характеристик, а также графики частотных зависимостей вещественной и мнимой частей импеданса.

2.

Измерим частоты f_p, f_0 последовательного и параллельного резонансов по точкам пересечения нуля фазовой характеристикой. Имеем $f_0 \simeq 100.5k$, $f_p \simeq 140.6k$. Измерим полюсы $\Delta f_p, \Delta f_0$, в которых фазовая характеристика изменяется в диапазоне ± 45 в окрестностях резонансов. Имеем $\Delta f_p \simeq= 10.7k, \Delta f_0 = 10.4k$. Рассчитаем добротность $Q_p = \frac{f_p}{\Delta f_p} = \frac{140.6k}{10.7k} \simeq 13.1$, $Q = \frac{f_0}{\Delta f_0} = \frac{100.5k}{10.4k} \simeq 9.66$. Проверим, что $f_p = f_0\sqrt{2}$: $140.6k \simeq 141.4k$ и $Q_p = Q_0\sqrt{2}$: $13.1 \simeq 13.7$.

3.

Измерим сопротивление контура на частотах последовательного и параллельного резонансов, сравним результаты с теоретическими значениями: $r, k^2\rho_pQ_p$.

$r_{\text{эксп}} = 1.57k \simeq 1.59k = r_{\text{теор}}$

$$(k^2\rho_pQ_p)_{\text{эксп}} = 78k \simeq 79k = \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 \sqrt{\frac{L}{C}}(1+\alpha)\frac{r}{\rho} = (k^2\rho_pQ_p)_{\text{теор}}$$

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

Таблица 3: Варьирование R.

R, Ом	500	1000	1500	2000
Z, кОм	220	121	82	63

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

Таблица 4: Варьирование C_0.

C_0, пФ	100	200	300
Z, кОм	68.6	26.3	14.3

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

4.

Обнулим последовательности потери r и варьированием $R_0 = [10k, 100k|10k]$ подберём сопротивление параллельных потерь так , чтобы достичь того же резонансного сопротивления что и при $r = 1590$. Получим $R_0 = 80k$. Проверим закон пересчёта: $R_0 r = k^2\rho_p^2$. $80000 \cdot 1590 \simeq \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot (15900)^2 \cdot 2$ - соотношение выполняется.

5.

Варьируя $R_0 = [80k, 10Meg|10Meg]$ при $r = 1590$, изучим влияние R_0 на поведение частотной и фазовой характеристик на низких частотах - в диапазоне 1k, 180k. При увеличении R_0 частотная характеристика увеличивается, а фазовая уменьшается.