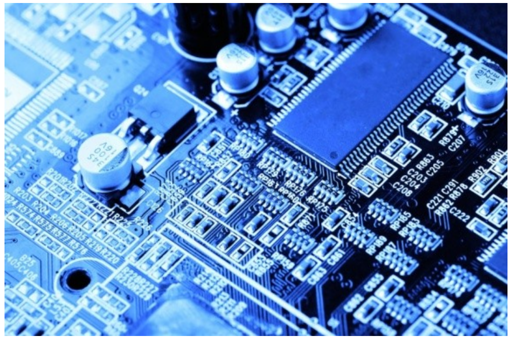
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»
Факультет безопасности информационных технологий

СХЕМОТЕХНИКА

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ



Санкт-Петербург,
2019

Оглавление

Понятие о n-полюсной электросистеме

Полюсом электросистемы называется его выход (вход). При этом в электротехнике, схемотехнике и ряде других дисциплин термин полюс имеет и другие смыслы. Например, в изображениях функций полученных с помощью преобразования Лапласа, полюсом называется точка где функция обращается в бесконечность. Полюсом называют область магнитного поля магнита на границе раздела сред, где линии магнитной индукции линии имеют наибольшую плотность. В курсе электрические машины полюсы и их число ассоциированы со структурой магнитного поля данной машины.

По числу выходов (входов) электронные и электрические схемы называют: двухполюсники, трёхполюсники, четырёхполюсники и т.д.

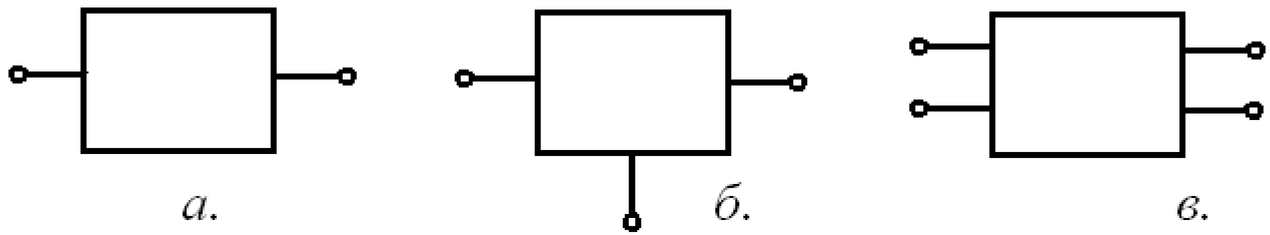


Рис. 1. Примеры электронных схем:
а – двухполюсник; *б* – трёхполюсник; *в* – четырёхполюсник

Понятие линейной системы

Система называется **линейной**, если она обладает свойствами *однородности и аддитивности*.

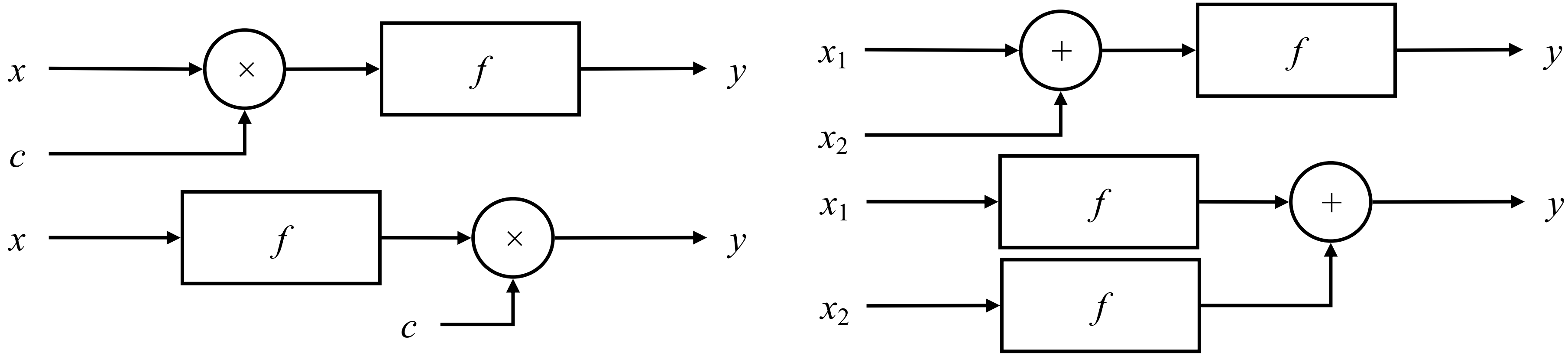


Рис. 2. Свойства однородности и аддитивности

Однородность:

$$f(c \cdot x) = c \cdot f(x), \quad c = const. \tag{1}$$

Аддитивность:

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2). \tag{2}$$

Отклик линейной казуальной системы на возмущающее воздействие x определяется через функцию свёртка:

$$(x * h)(t) = \int_0^\infty x(\tau)h(t-\tau)d\tau, \tag{3}$$

где: h – *импульсная характеристика* системы, t – время, τ – переменная интегрирования, можно назвать временем системы.

Дельта функция

Дельта-функция (функция Дирака) – функция есть импульс бесконечно малой длительности и неограниченной амплитуды, при этом интеграл от -функции на интервале $(-\infty; +\infty)$ равен единице.

$$\begin{cases} \delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \qquad (4)$$

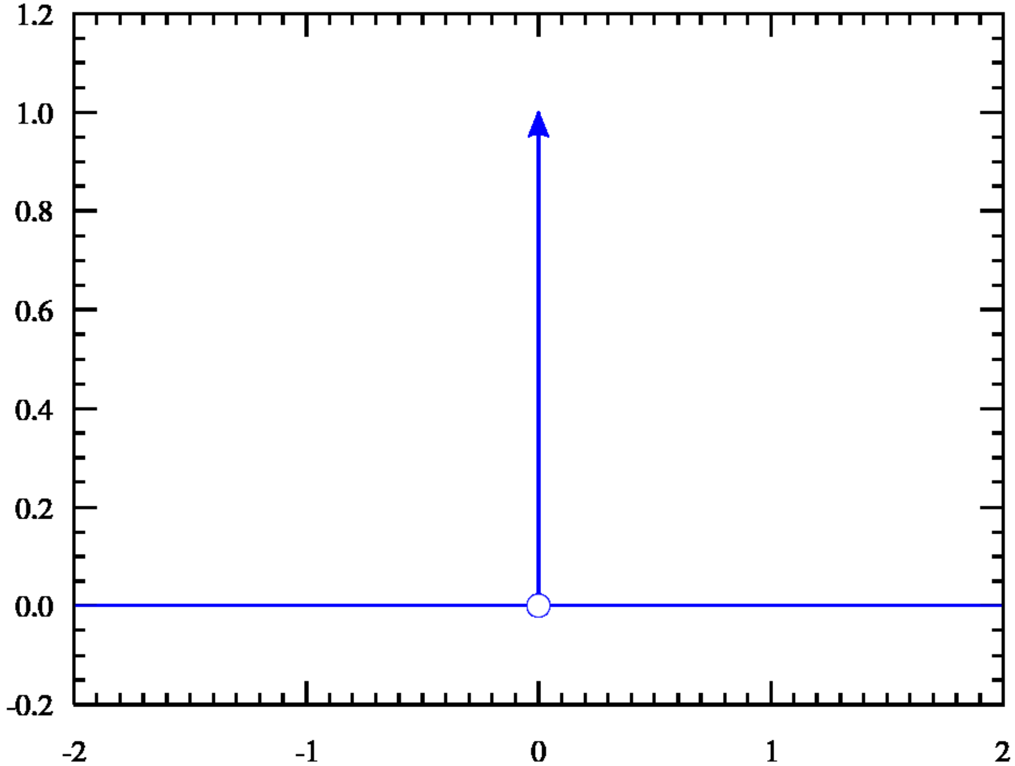


Рис. 3. Дельта-функция

Анализ линейной системы во временной области

Если в уравнении свёртки $(x * h)(t) = \int_0^\infty x(\tau)h(t-\tau)d\tau = y(t)$ в качестве возмущающего воздействия x использовать -функцию, то на выходе линейной системы $y(t)$ получим сигнал соответствующий собственной импульсной характеристике системы, т.е.:

$$(\delta * h)(t) = \int_0^\infty \delta(\tau)h(t-\tau)d\tau = h(t). \quad (5)$$

Импульсная характеристика полностью характеризует линейную систему, т.е. импульсная характеристика позволяет всегда предсказать сигнал на выходе системы (отклик системы), зная входной (возмущающий) сигнал.

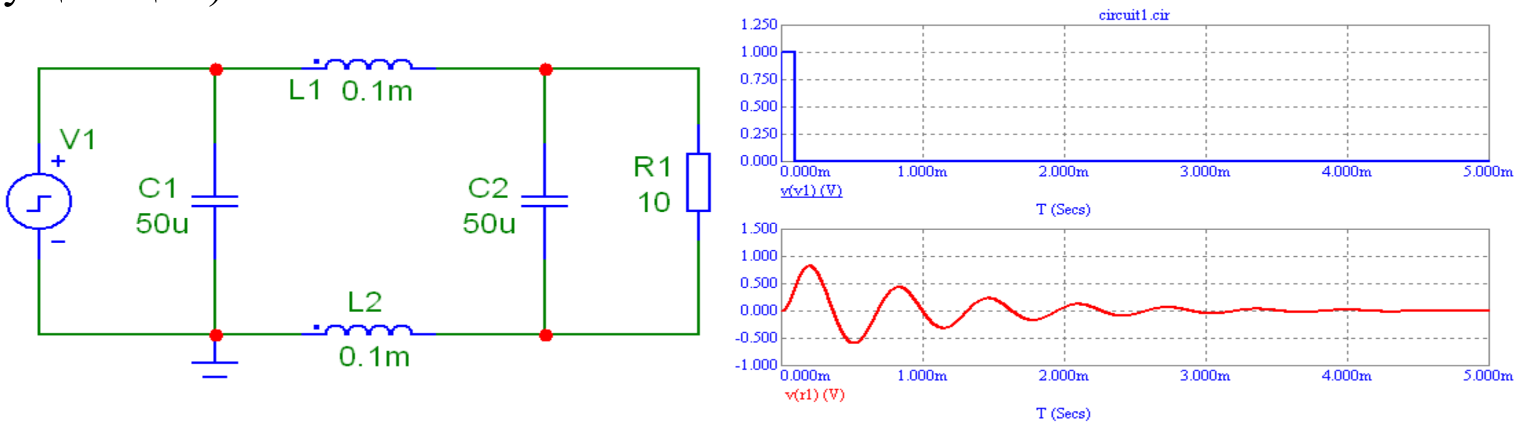


Рис. 4. Модельное исследование импульсной характеристики RLC-контура
с помощью кратковременного прямоугольного импульса

Две линейные системы с одинаковыми импульсными характеристиками с точки зрения результата преобразования сигнала эквивалентны, не зависимо от различий конструкции линейных систем.

Импульсная характеристика и передаточная функция

Теорема о свёртке: свёртка сигналов во временной области $(x*h)(t)=\int_0^\infty x(\tau)h(t-\tau)d\tau = y(t)$ эквивалентна произведению спектров этих сигналов в частотной области, т.е.:

$$y = x*h = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{x\}\times\mathcal{F}\{h\}\} = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{y\}\}, \quad (6)$$

где $\mathcal{F}$ – операторное (операционное) преобразование (преобразование Фурье, преобразование Лапласа, z-преобразование, преобразование Карлсона-Хевисайда и др.); $\mathcal{F}^{-1}$ – обратное операторное преобразование; x – входной (возмущающий) сигнал; h – импульсная характеристика системы; y – выходной сигнал; $\times$ – символ поэлементного произведения операторных образов $\mathcal{F}\{x\}$ и $\mathcal{F}\{h\}$ сигналов x и h.

Из выражения (6) вполне очевидно, что $\mathcal{F}\{x\}\times\mathcal{F}\{h\} = \mathcal{F}\{y\}$, или в другом виде:

$$\mathcal{F}\{h\} = \frac{\mathcal{F}\{y\}}{\mathcal{F}\{x\}}. \quad (7)$$

Передаточная функция $\mathcal{F}\{h\}$ линейной системы равна поэлементному отношению операторного образа отклика линейной системы к операторному образу возмущающего воздействия.

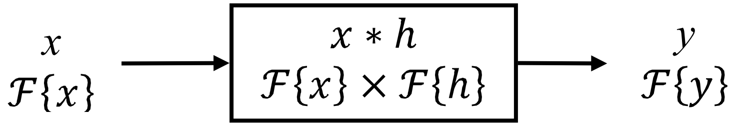


Рис. 4. Передаточная функция

Передаточная функция полностью характеризует линейную систему в операционном пространстве (для преобразования Фурье в частотном пространстве).

Теорема Релея

Теорема Релея энергия сигнала во временной области равна энергии этого же сигнала в частотной области:

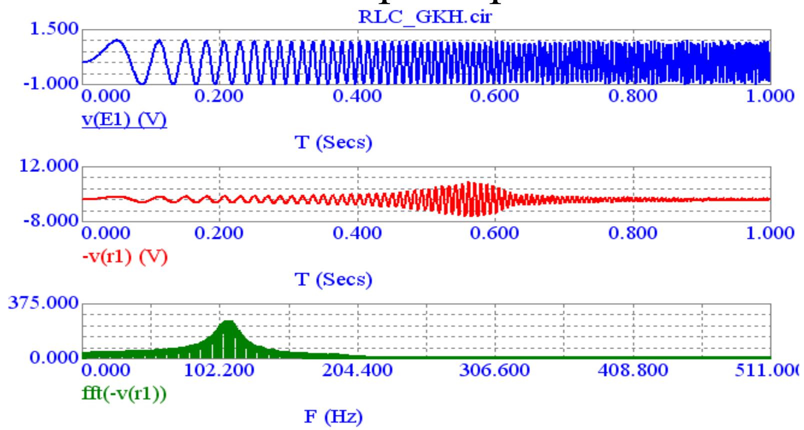
$$\int_{-\infty}^{+\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt. \tag{8}$$

Выражение (8) так же называют *равенством Парсеваля*.

Джон Уильям Стретт, третий барон Релей (12 ноября 1842 – 30 июня 1919) – Релей (в некоторых переводах Рэлей), британский физик и механик, открывший (с Уильямом Рамзаем) газ аргон и получивший за это Нобелевскую премию по физике в 1904 году. Открыл также явление, ныне называемое рассеянием Релея, и предсказал существование поверхностных волн, которые также называются волнами Релея.

Анализ линейной системы в частотной области

Метод исследования частотных характеристик с помощью генератора качающейся частоты (ГКЧ)



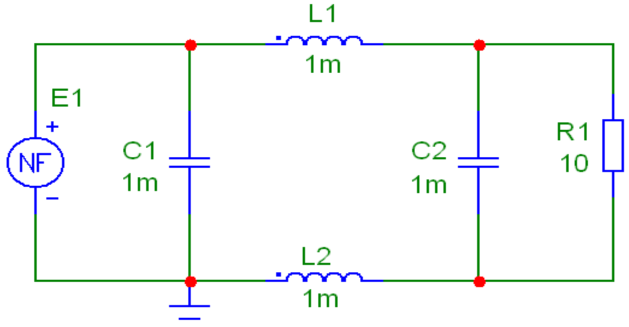
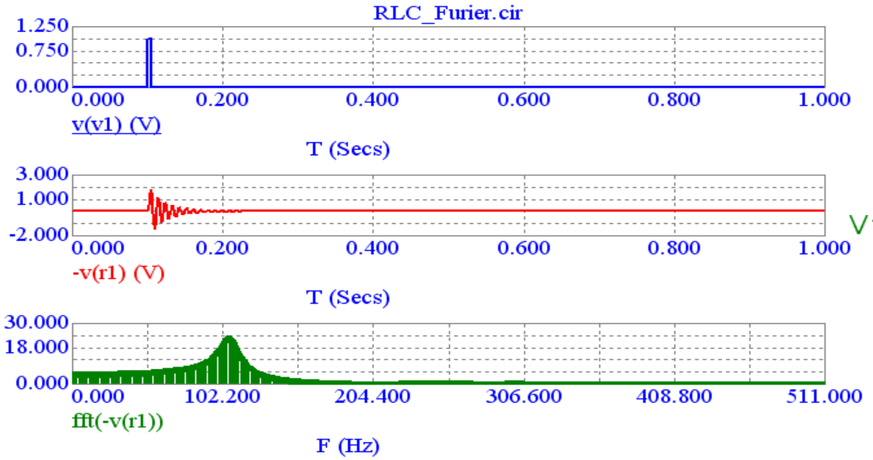


Рис. 5. Исследование частотных характеристик RLC-контура с помощью ГКЧ

Метод исследования частотных характеристик с помощью фурье преобразования импульсной характеристики



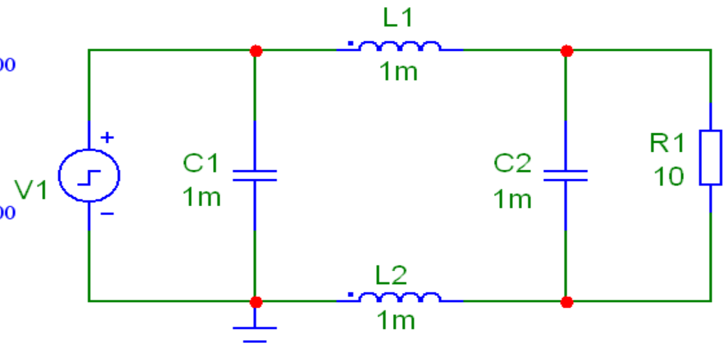
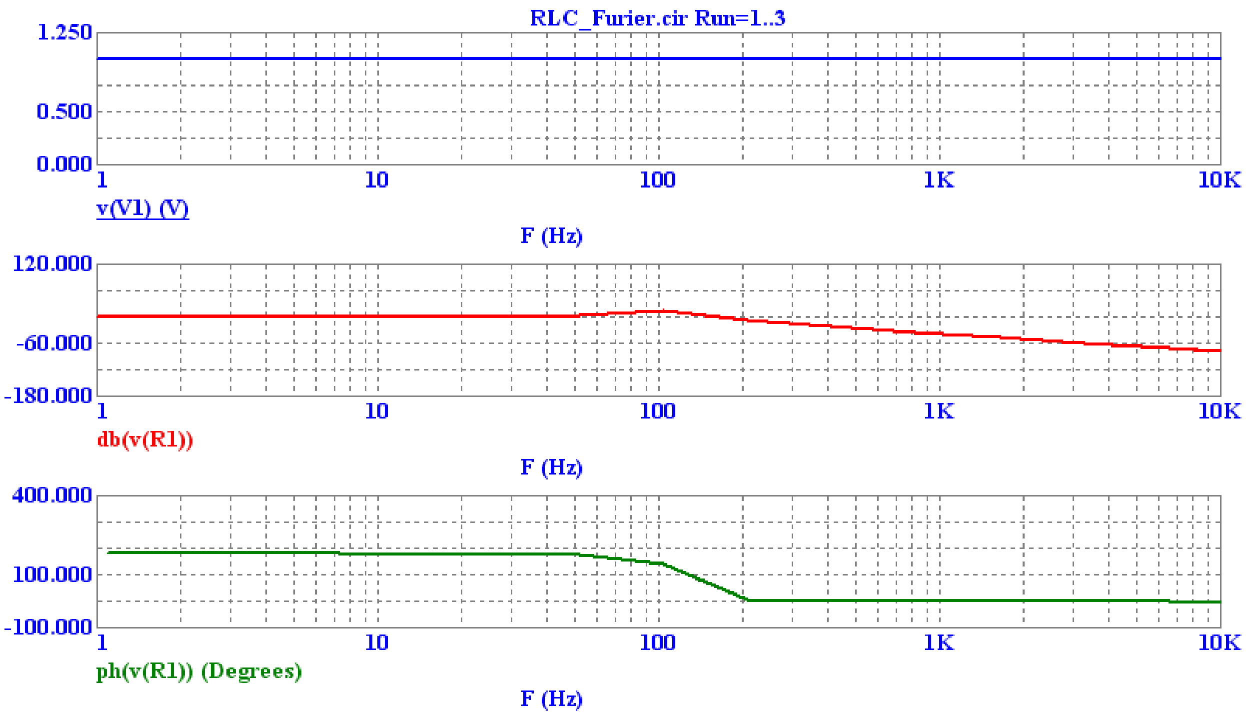


Рис. 6. Исследование частотных характеристик RLC-контура с помощью кратковременного импульса и преобразования Фурье

Метод анализа частотных характеристик дополнительными средствами MicroCap



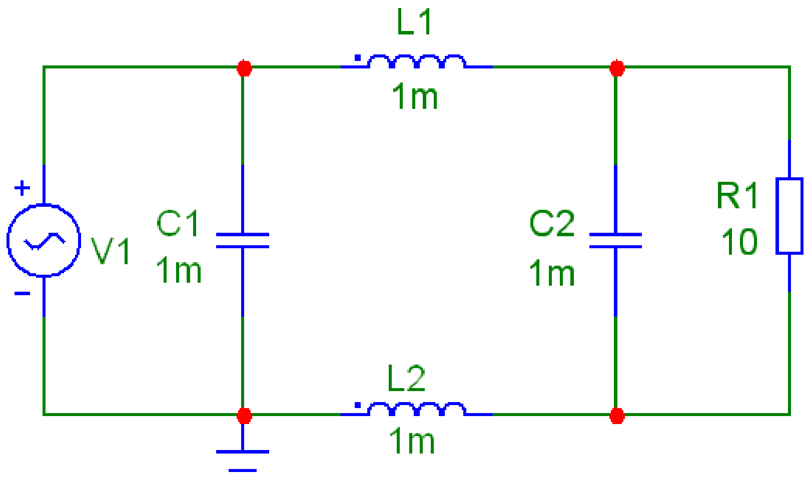


Рис. 7. Частотный анализ в МС

Переходные процессы в RLC цепях

Устоявшийся режим – режим работы электрических цепей спустя достаточно продолжительное время после подключения к постоянным и/или периодическим ЭДС.

Переходной процесс – состояние электрической цепи в интервале времени между двумя устоявшимися режимами.

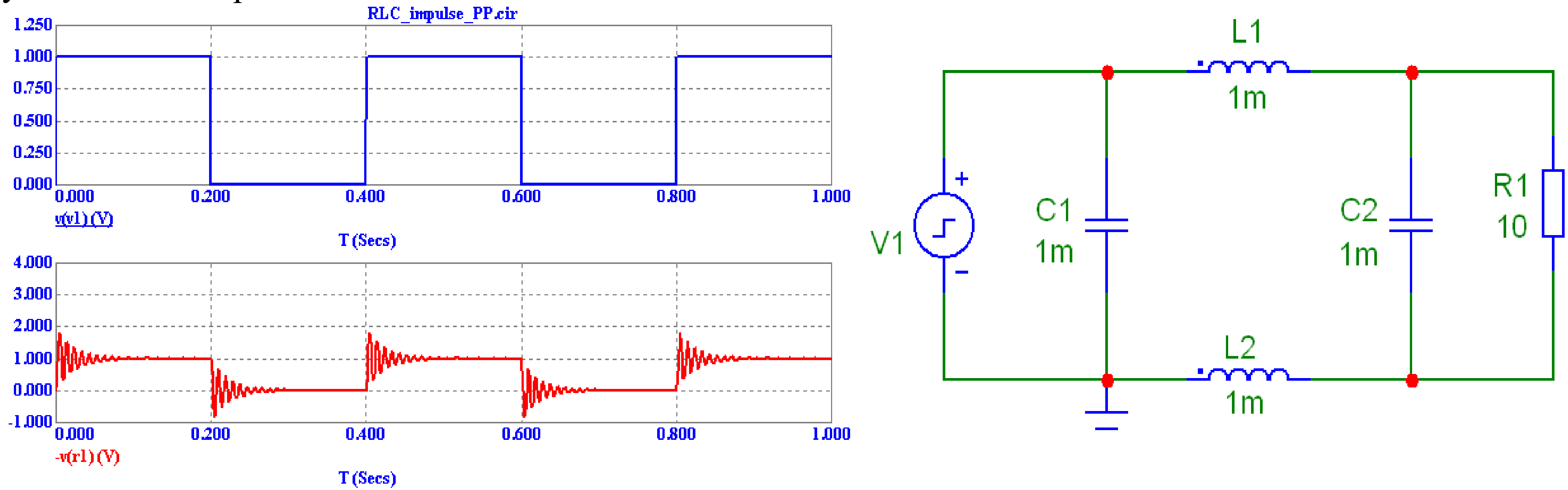


Рис. 8. Серия переходных процессов в масштабе десятых долей с,
образуют в большем масштабе, порядка единиц с, устоявшийся периодический процесс

В жизни ни что не постоянно так,
как постоянен переходной процесс

Линейное дифференциальное уравнение первого порядка

Как известно уравнение связи мгновенных значений тока $i(t)$ и напряжения $u_C(t)$ на ёмкости C имеет вид:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C\frac{du_C(t)}{dt}. \qquad (8)$$

Уравнение связи мгновенных значений тока $i(t)$ и напряжения $u_L(t)$ на индуктивности L имеет вид:

$$u_L(t) = L\frac{di_L(\mathrm{t})}{dt}. \qquad (9)$$

Отметим, что ЭДС самоиндукции катушки индуктивности имеет противоположный знак по отношению к внешнему напряжению приложенному к катушке, т.е.:

$$+u_L(t) = -e_L(t) = +L\frac{di_L(\mathrm{t})}{dt}. \qquad (10)$$

Подобные уравнения относятся к классу *линейных неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка* (по максимальному значению порядка производной), в общем виде записываемые как:

$$s(t) = \tau\frac{dy(t)}{dt} + y(t), \qquad (11)$$

и в общем виде имеют решения:

$$y(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}\left(\int^{t}\frac{e^{-\frac{t}{\tau}}s(t)}{\tau}dt + C\right), \qquad (12)$$

где коэффициент τ – постоянная времени.

Переходной процесс в RC-цепочке

В качестве примера рассмотрим RC-цепочку с ключом, в начальный момент времени ($t = 0$) ключ разомкнут, в момент времени $t = +0$, происходит мгновенное замыкание ключа и конденсатор начинает заряжаться. По законам электротехники напряжение на конденсаторе не может измениться мгновенно, т.е. $u_C(0) = u_C(+0)$, из чего, положив, что конденсатор был в разряженном состоянии, можно записать: $u_C(0) = u_C(+0) = 0$.

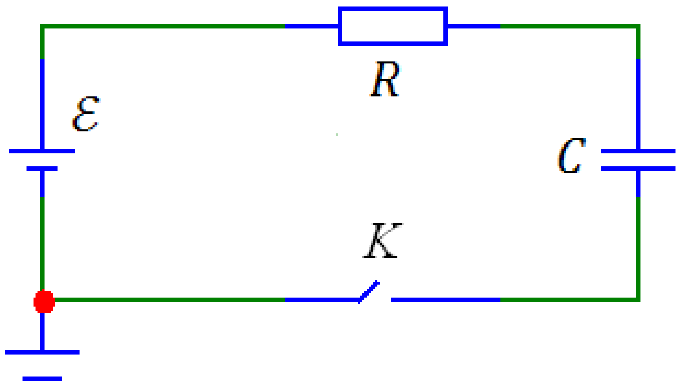
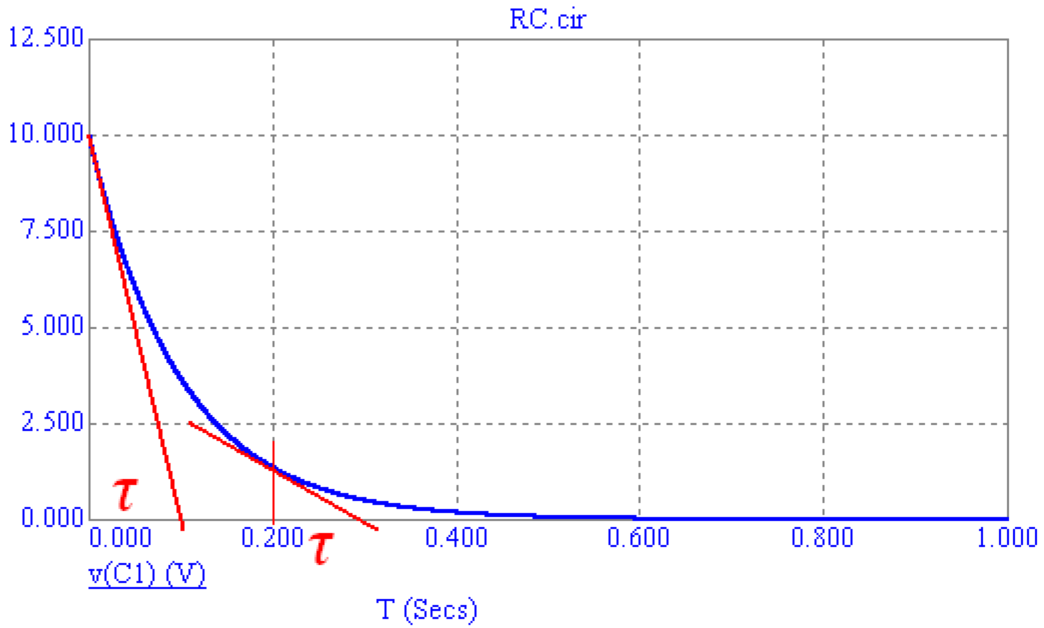


Рис. 9. RC-контур с ключом и батареей

В соответствии со вторым законом Кирхгофа $\mathcal{E} = u_R(t) + u_C(t)$, используя уравнение $i(t) = C\frac{du_C(t)}{dt}$, закон Ома для участка цепи $u_R(t) = Ri_R(t)$ и неизменность тока по протяжённости всей ветви (следствие первого закона Кирхгофа), т.е. $i_R(t) + i_C(t) = i(t)$, получим дифференциальное уравнение $\mathcal{E} = RC\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)$, решение которого при начальных условиях $u_C(0) = u_C(+0) = 0$, будет иметь вид: $u_C(t) = \mathcal{E}\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$, RC – постоянная времени.

Графический метод определения постоянной времени

Метод касательной



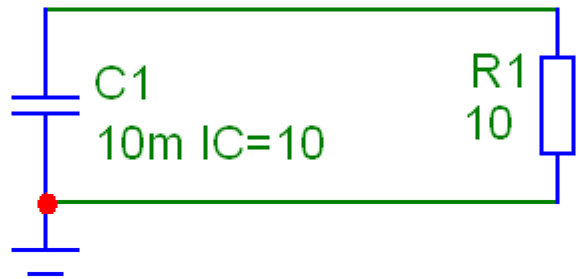


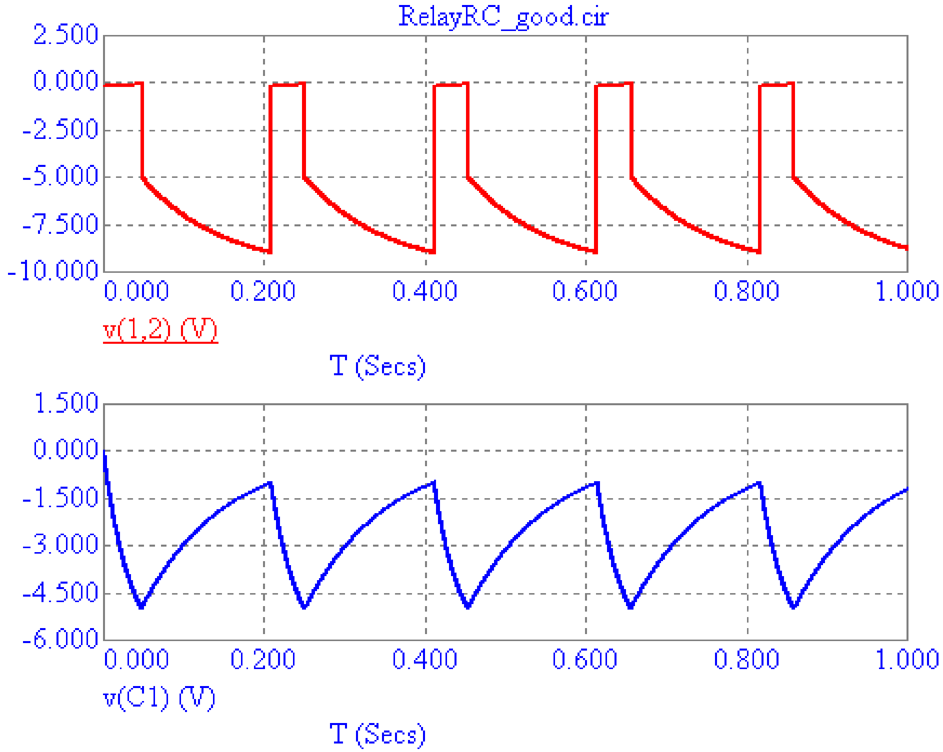
Рис. 10. Разряд конденсатора C1 через резистор R1

Теоретически ожидаемое значение постоянной времени рассчитывается как $\tau = RC$.

Время затухания переходного процесса обычно оценивается как 3τ.

Генератор на реле и конденсаторе

На базе реле и конденсатора можно построить простейший генератор.



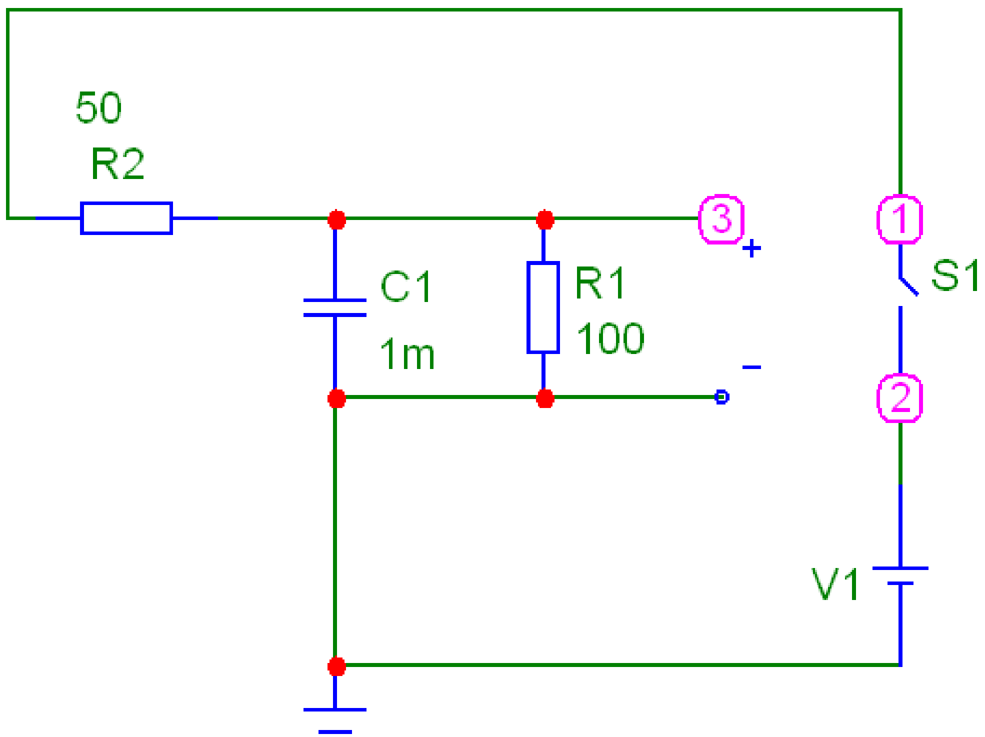


Рис. 11. Генератор на реле и конденсаторе

> Строго говоря реле не относится к линейным элементам, у электромагнитного реле присутствует эффект гистерезиса, дребезг контактов, нелинейная зависимость контактного сопротивления от силы притяжения якоря магнитным полем.

Векторные диаграммы

Сопротивления подразделяют на активные R и реактивные: $X_L = j\omega L$ и $X_C = \frac{1}{j\omega C}$, в реактивных сопротивлениях присутствует множитель мнимой единицы, в активных сопротивлениях такого множителя нет. На активных сопротивлениях электромагнитная энергия преобразуется в тепловую. Присутствие реактивных элементов в электрических цепях порождает комплексные (содержащие мнимую и вещественную части) токи и напряжения которые возможно отобразить на комплексной плоскости называемой векторной диаграммой токов и напряжений.

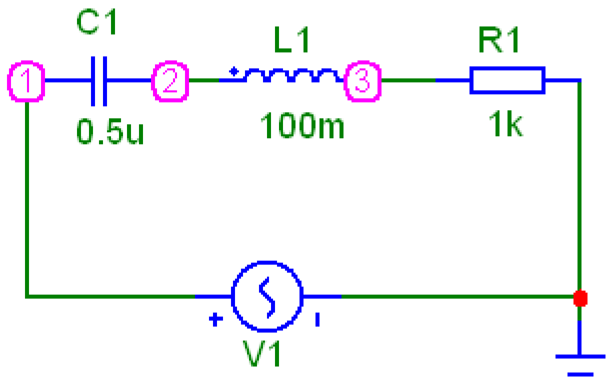


Рис. 12. Последовательное соединение RLC в цепи с синусоидальным источником

Запишем уравнение по 2-му закону Кирхгофа: $\mathcal{E}(t) = L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt + Ri(t) + u_c(0)$, при установившемся режиме токи и напряжения на всех элементах цепи будут иметь гармоническую форму, т.е. $\mathcal{E}(t) = U_m \sin(\omega t)$ и $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, получим: $\mathcal{E}(t) = L\frac{dI_m \sin(\omega t)}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t I_m \sin(\omega t)dt + RI_m \sin(\omega t) = I_m\omega L\cos(\omega t) - \frac{1}{\omega C}I_m\cos(\omega t) + RI_m\sin(\omega t) + \frac{1}{\omega C}I_m + u_c(0)$, причём $\frac{1}{\omega C}I_m + u_c(0) = 0$, т.к. все остальные члены уравнения не содержат постоянных составляющих. Тогда: $\mathcal{E}(t) =$

$I_m \cos(\omega t)\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + RI_m \sin(\omega t)$ – очевидно, что в полученном выражении при активных и реактивных сопротивлениях взаимно ортогональные гармонические функции.

С другой стороны в каждый момент времени для схемы (рис. 12) так же справедливо выражение: $\left(\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right) + R\right)\dot{I} = \left(j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + R\right)\dot{I} = \dot{\mathcal{E}}$, где точка сверху обозначает комплекснозначный ток $\dot{I}$ и комплекснозначное ЭДС $\dot{\mathcal{E}}$, в данном случае ортогональность активной и реактивной части определяет поворачивающий множитель j. Используя теорему Пифагора, для сложения взаимно ортогональных векторов, получим полное сопротивление: $Re(Z) = R$, $Im(Z) = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ и $z = |Z| = \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R^2}$.

В общем случае *полное комплексное сопротивление*:

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\varphi}, \tag{13}$$

где $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\varphi = arctg\left(\frac{X}{R}\right)$, R – активное сопротивление; X – реактивное сопротивление.

Полная комплексная проводимость:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = G + jB, \tag{14}$$

G – активная проводимость; B – реактивная проводимость.

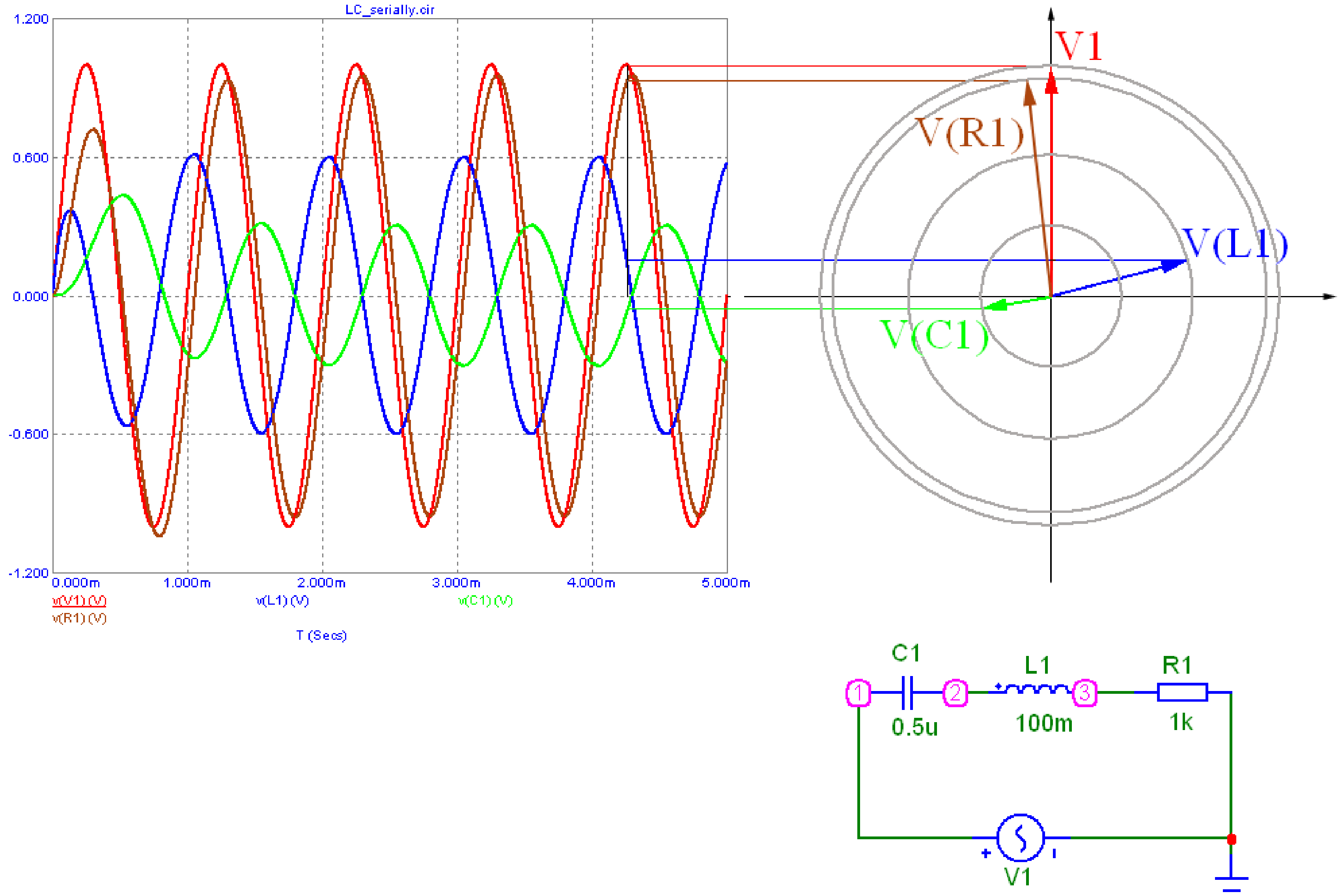
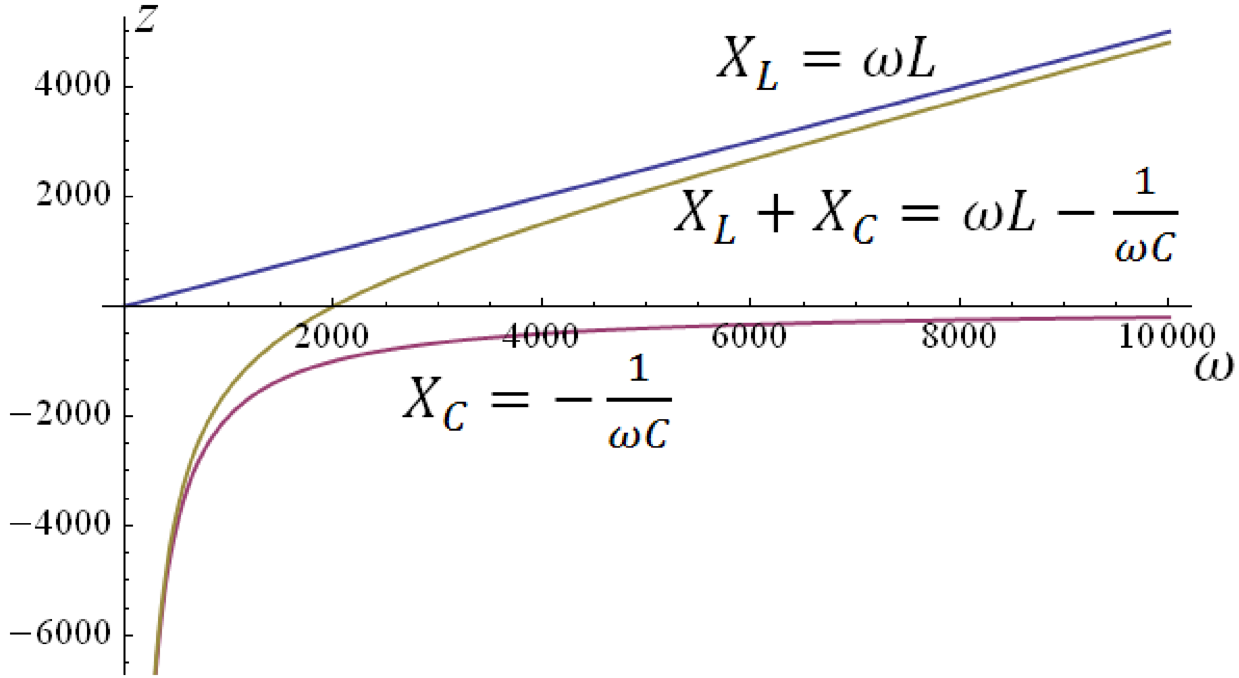


Рис. 13. График напряжений и векторная диаграмма, так же называемая – фазор

Резонанс напряжений при последовательном соединении в RLC-цепях

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{15}$$



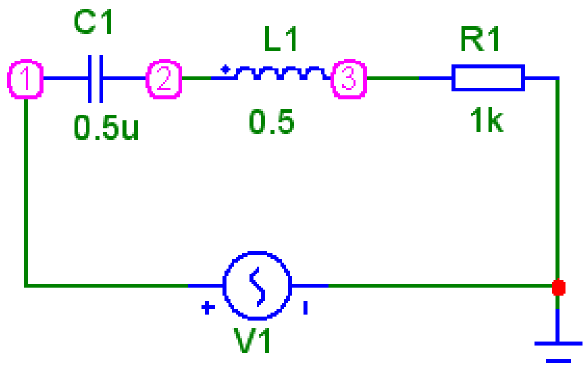


Рис. 14. Сопротивления на реактивных элементах цепи

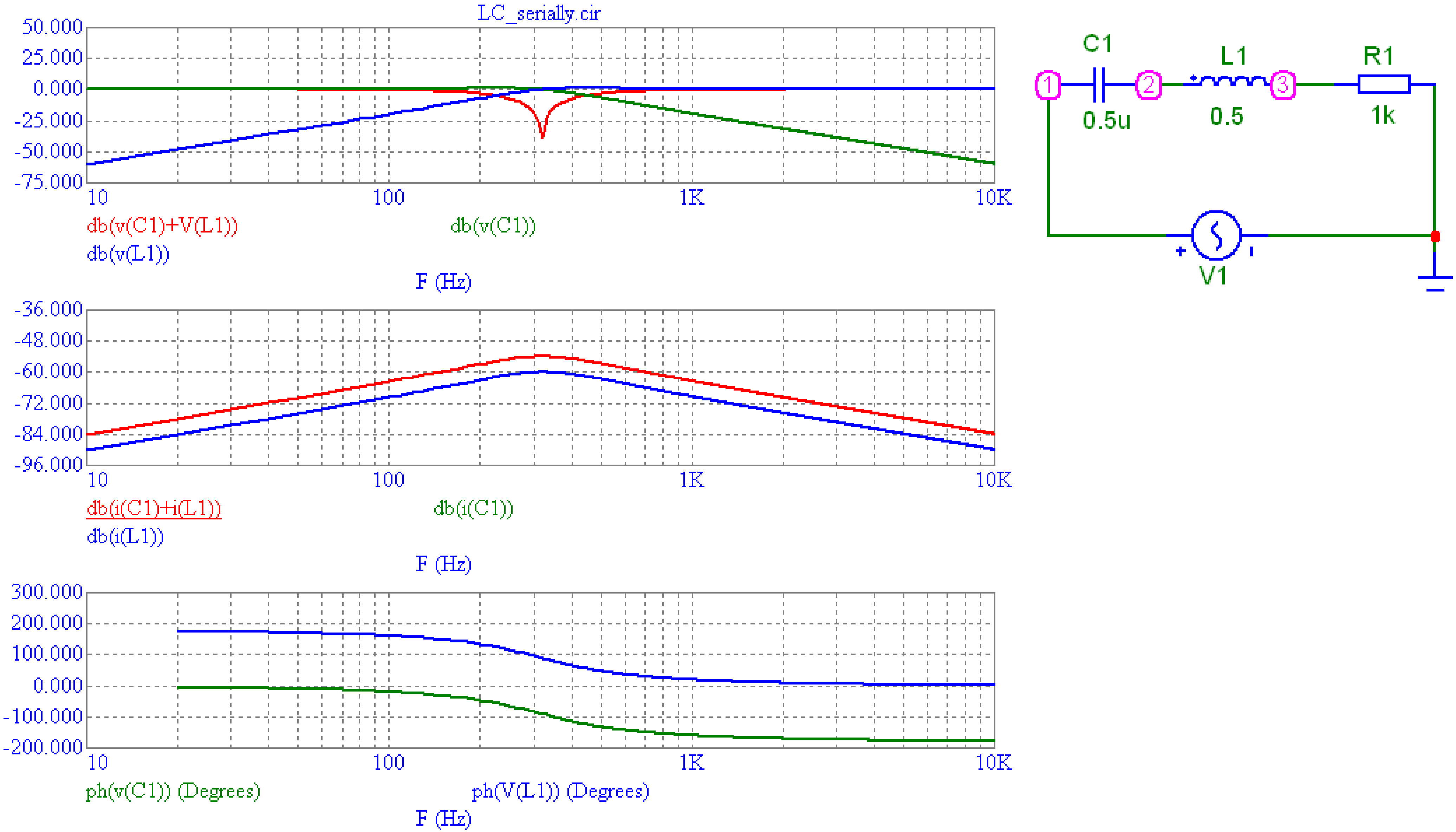


Рис. 15. Резонанс при последовательном соединении:
напряжения, токи и фаза напряжения на реактивных элементах цепи

Резонанс токов при параллельном соединении в RLC-цепях

Проводимость индуктивности и конденсатора: $B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$, $B_C = \frac{1}{X_C} = -\omega C$, тогда по закону Ома для участка цепи при параллельном соединении индуктивности и конденсатора, получим: $I = \frac{U}{B_L + B_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega L} - \omega C}$.

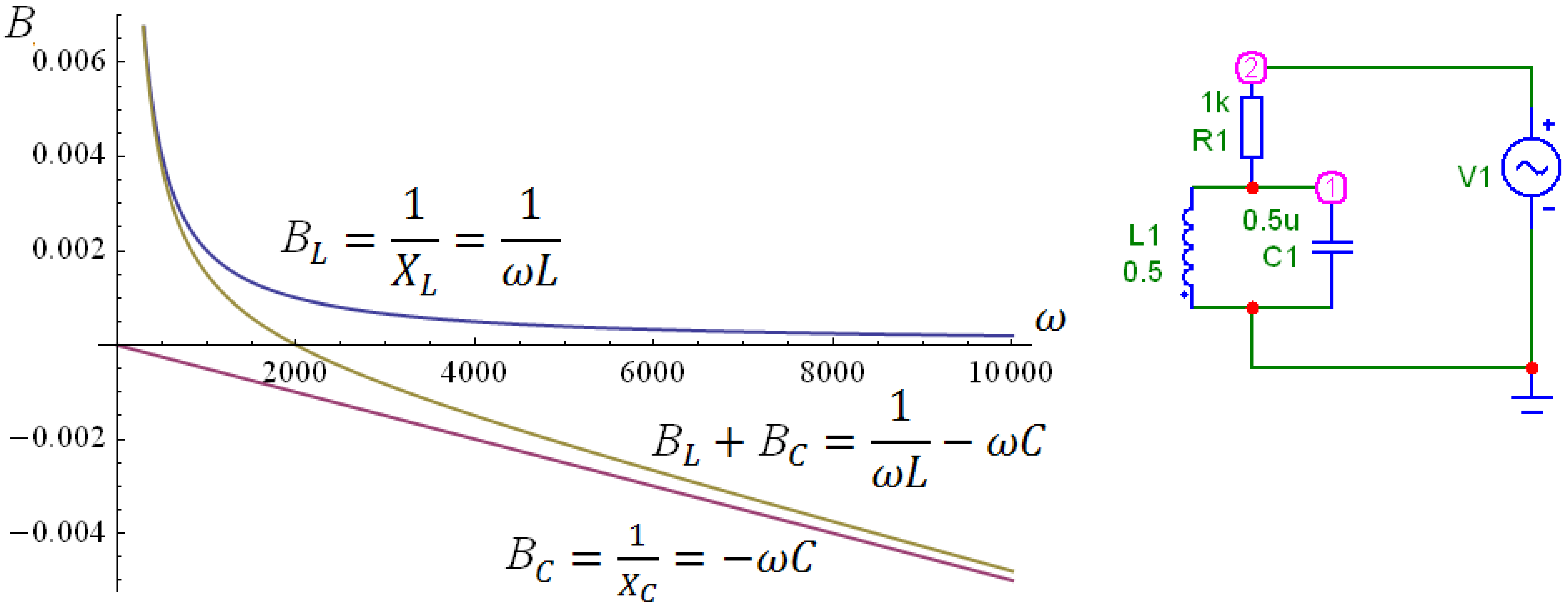


Рис. 16. Проводимость при параллельном соединении LC

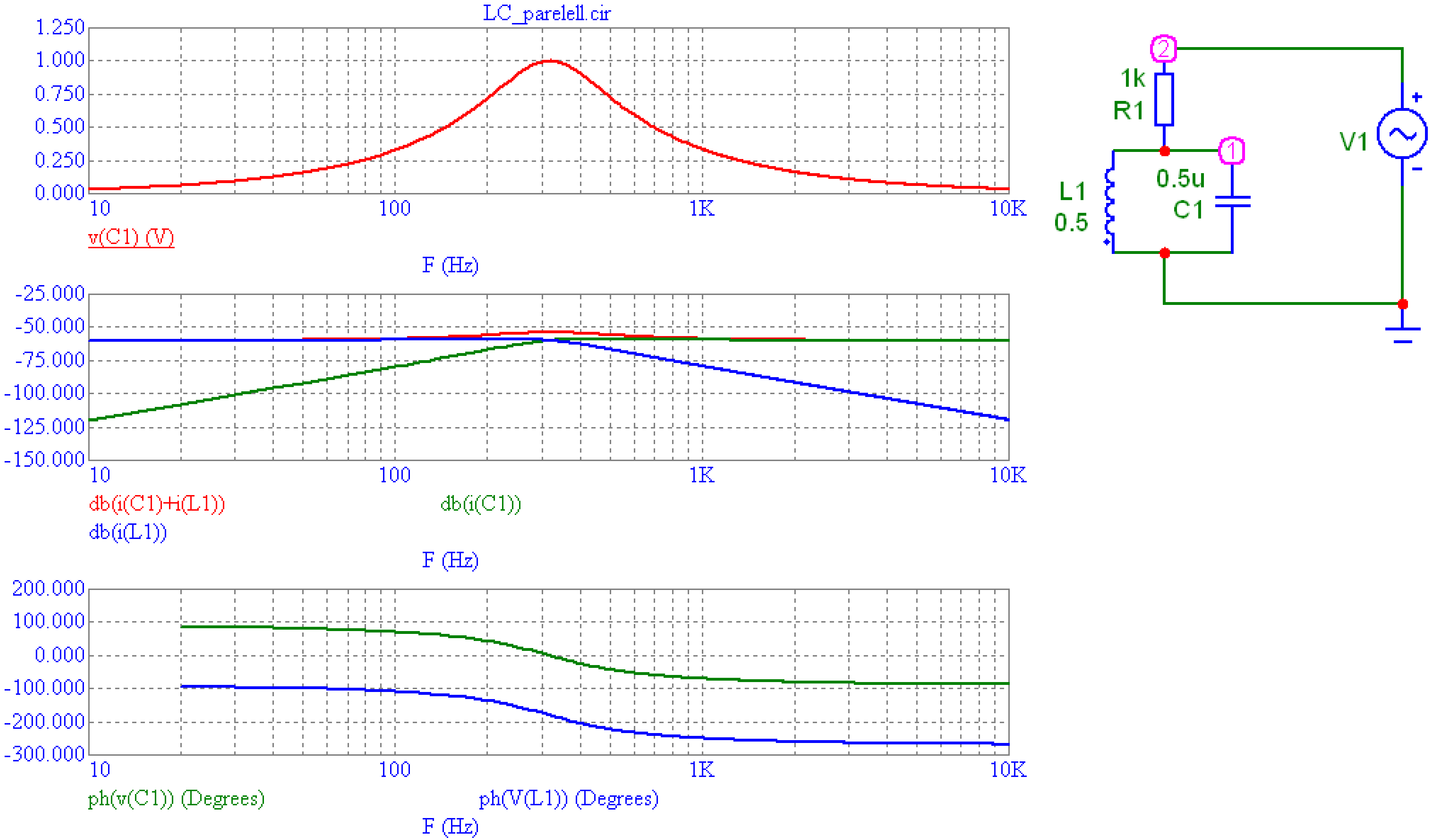


Рис. 17. Резонанс токов при последовательном соединении:
напряжения, токи и фаза напряжения на реактивных элементах цепи

Виды частотных фильтров

По частотным диапазонам

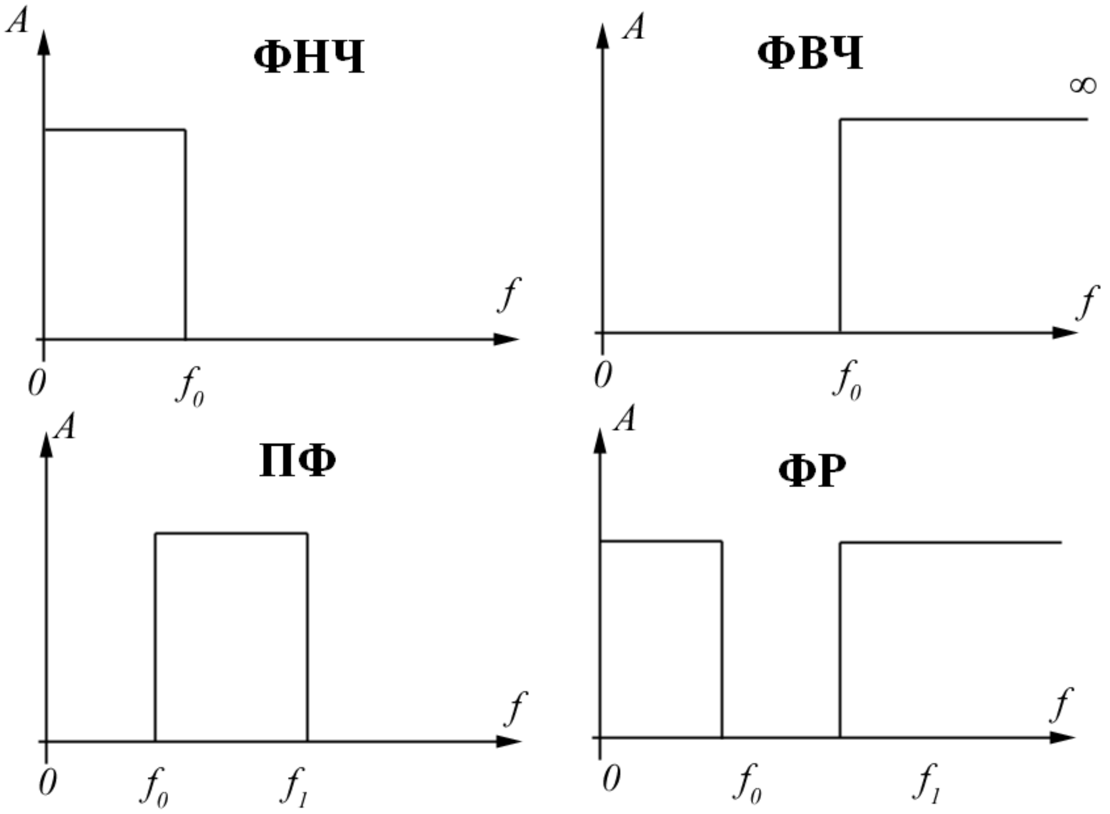


Рис. 12. Различие фильтров при классификации по селекции частотных диапазонов

По виду исполнения: активные фильтры, пассивные фильтры.

По особенностям АЧХ и ФЧХ.

Дополнительно современные методы фильтрации используют цифровые преобразования и цифровые фильтры или смешанные аналогово-цифровые фильтры.

Импульсная характеристика идеального низкочастотного фильтра

Функция вида:

$$h(t) = \frac{\sin(F\,t)}{t}, \tag{16}$$

есть функция идеального НЧ фильтра, причём F – задаёт ширину полосы пропускания.

При $F = 1$, выражение (13) принимает вид называемый *sinc*-функцией $\frac{\sin(t)}{t} = \operatorname{sinc}(t)$.

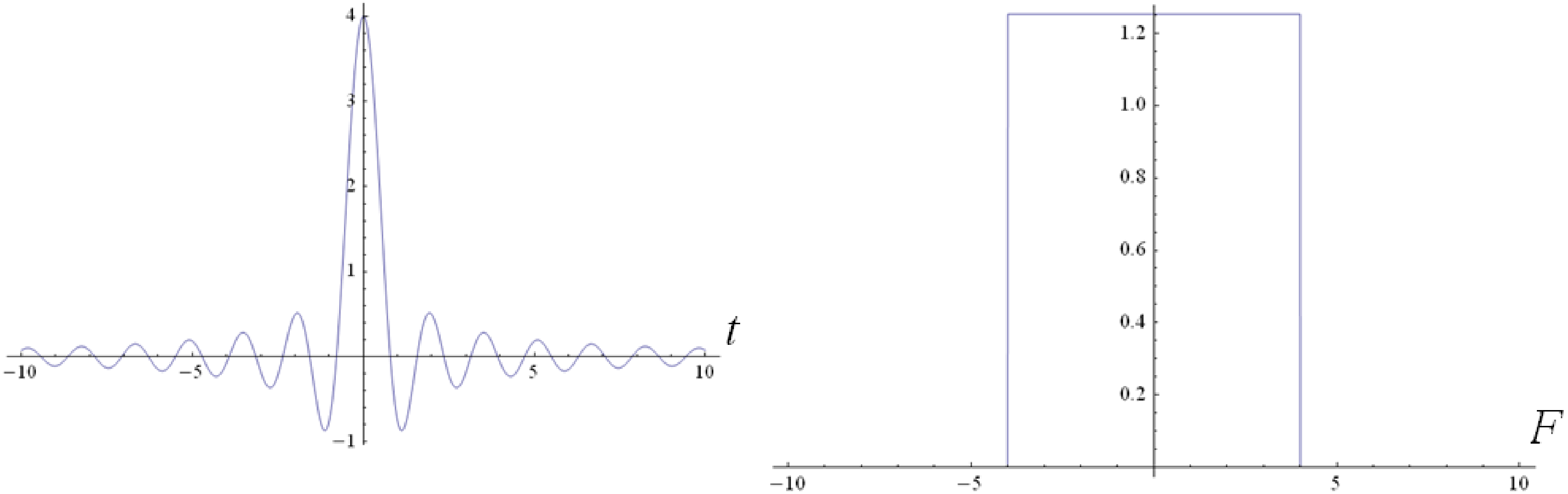


Рис. 13. Импульсная и передаточная функция и идеального низкочастотного фильтра

$$\begin{cases} \frac{\sin(Ft)}{t} \Leftrightarrow \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\left(\operatorname{Sign}(F-\omega) + \operatorname{Sign}(F+\omega)\right)\right\} \\ \mathcal{F}\left\{\frac{\sin(Ft)}{t}\right\} \Leftrightarrow \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\left(\operatorname{Sign}(F-\omega) + \operatorname{Sign}(F+\omega)\right) \end{cases}, \text{ для } F = 4$$

Белы

Бел [Б] – единица логарифмического отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную. В основе единицы лежит десятичный логарифм. Единица названа в честь американского учёного Александра Белла. Децибел – десятая доля бела $[\text{Б} \cdot 10^{-1}]$.

Напомним, что: $\log_a b^n = n \log_a b$.

Для энергетических величин (мощность, энергия) принято следующее отношение:

$$D = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1}\right). \quad (17)$$

Для силовых величин (сила, сила тока, напряжение, напряжённость) принято следующее отношение:

$$D = 20 \lg \left(\frac{U_2}{U_1}\right). \quad (18)$$

Александр Грейам Белл (3 марта 1847 – 2 августа 1922) – учёный, изобретатель и бизнесмен шотландского происхождения, один из основоположников телефонии.

Таблица 1. Соотношения для типичных значений «раз» и дБ

$\frac{A_2}{A_1}$, раз(а) (больше, меньше)	$10\lg\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$, дБ	$20\lg\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$, дБ
0.1	–10.0	–20.0
0.125	–9.031	–18.062
0.25	–6.021	–12.041
0.5	–3.01	–6.021
$1/\sqrt{2} \approx 0.7071$	–1.505	–3.010
1.0	0	0
$\sqrt{2} \approx 1.4142$	1.505	3.010
2.0	3.01	6.021
4.0	6.021	12.041
8.0	9.031	18.062
10	10.0	20.0

В качестве опорного сигнала для сравнения в различных задачах и приложениях может выбираться входной или выходной сигнал, максимальные или минимальные значения сравниваемого сигнала и пр.

Добротность

Добротность – характеристика колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан. Общая формула расчёта добротности:

$$Q = \frac{2\pi f_0 W}{P_a}, \tag{16}$$

где f_0 – частота резонанса [Гц]; W – энергия, запасённая в колебательной системе; P_a – рассеиваемая мощность. Для последовательного соединения RLC, добротность можно рассчитать как:

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_0 L}{R}. \tag{17}$$

Для параллельного контура RLC включены параллельно:

$$Q = \mathrm{R}\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\mathrm{R}}{\omega_0 L}. \tag{18}$$

Для колебательного контура с известной АЧХ, добротность можно рассчитать как:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\pi}{\delta} = \pi N_e, \tag{19}$$

где δ – логарифмический декремент затухания, равный отношению полуширины резонансной кривой к частоте резонанса; N_e – число колебаний за время релаксации; $\Delta\omega$ – ширина полосы рассчитывается по уровню – 3 дБ или ${}^{1}/{}_{\sqrt{2}}$ – раз.

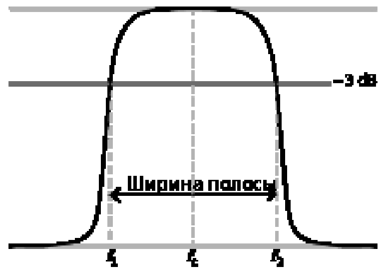


Рис. 14. Оценка полосы колебательного контура

Частотные характеристики фильтров

Характеристики реальных фильтров отличаются от характеристик идеальных фильтров.

Основные характеристики аналоговых фильтров следующие:

– амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость выходной амплитуды сигнала от частоты при постоянной амплитуде входного сигнала;

– фазо-частотная характеристика (ФЧХ) – зависимость выходной фазы сигнала от частоты относительно фазы входного сигнала;

– коэффициент нелинейных искажений (КНИ), характерен для фильтров содержащих нелинейные элементы.

Частота среза (фильтра) – частота на которой амплитуда выходного сигнала меньше амплитуды входного сигнала в $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$ раза или ~ 3 дБ.

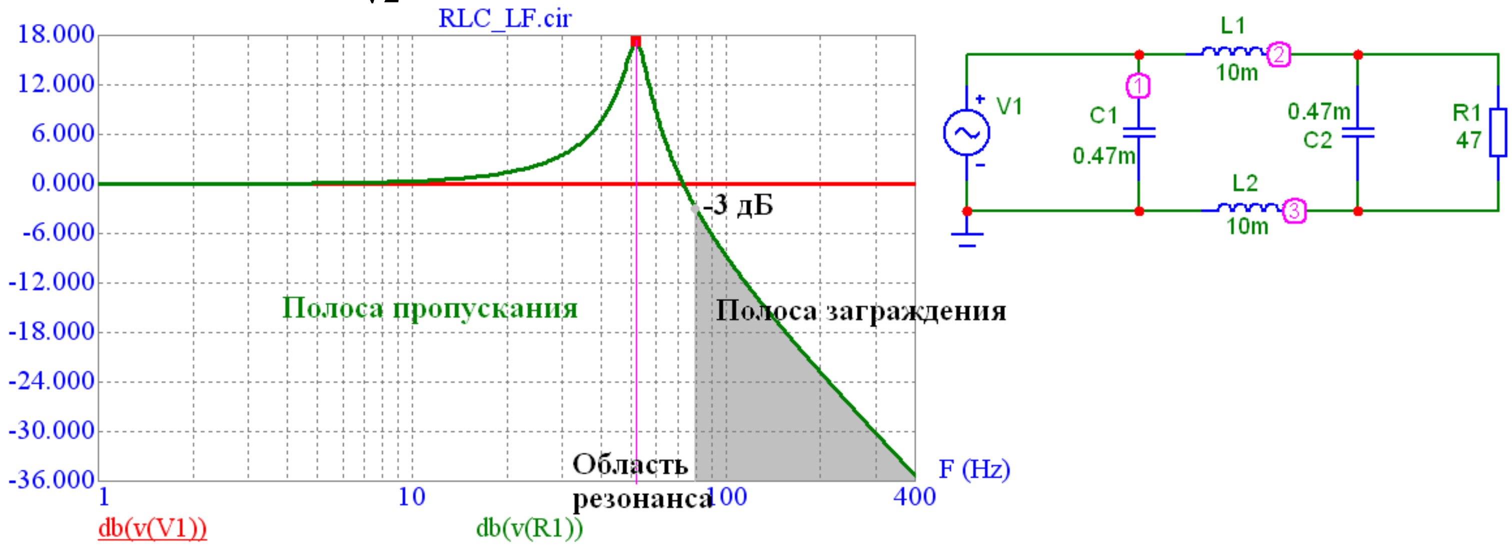


Рис. 15. Низкочастотный фильтр: полоса пропускания (до – 3 Дб), полоса запирания при уровне выходного сигнала менее – 3 Дб

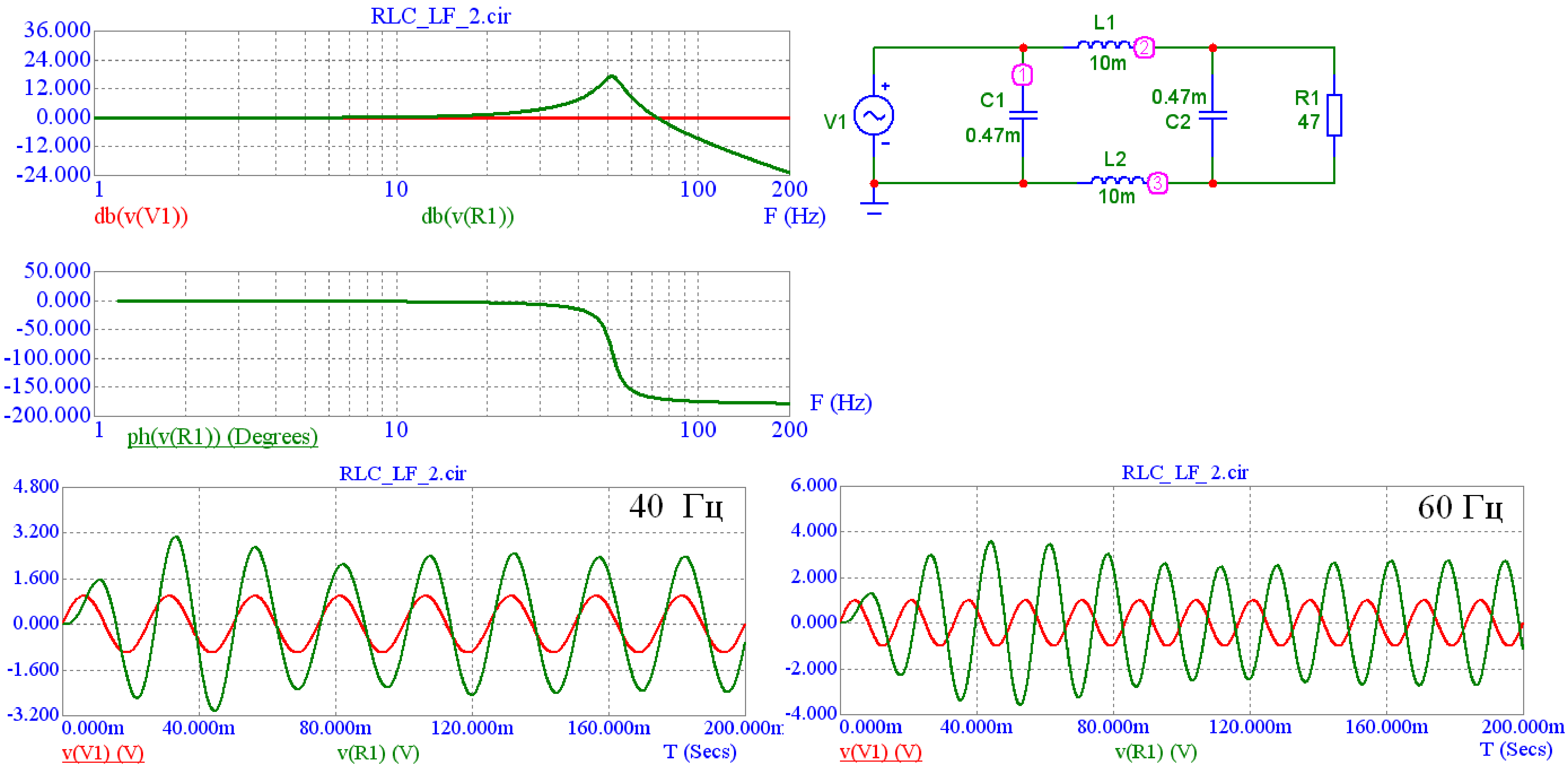


Рис. 16. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристика НЧ-фильтра

Делитель напряжения RC как фильтр

Передаточная характеристика RC-фильтра нижних частот:

$$H = \frac{Y}{X} = \frac{1/(j\omega C)}{\frac{1}{j\omega C}+R} = \frac{1}{1+j\omega RC}. \quad (19)$$

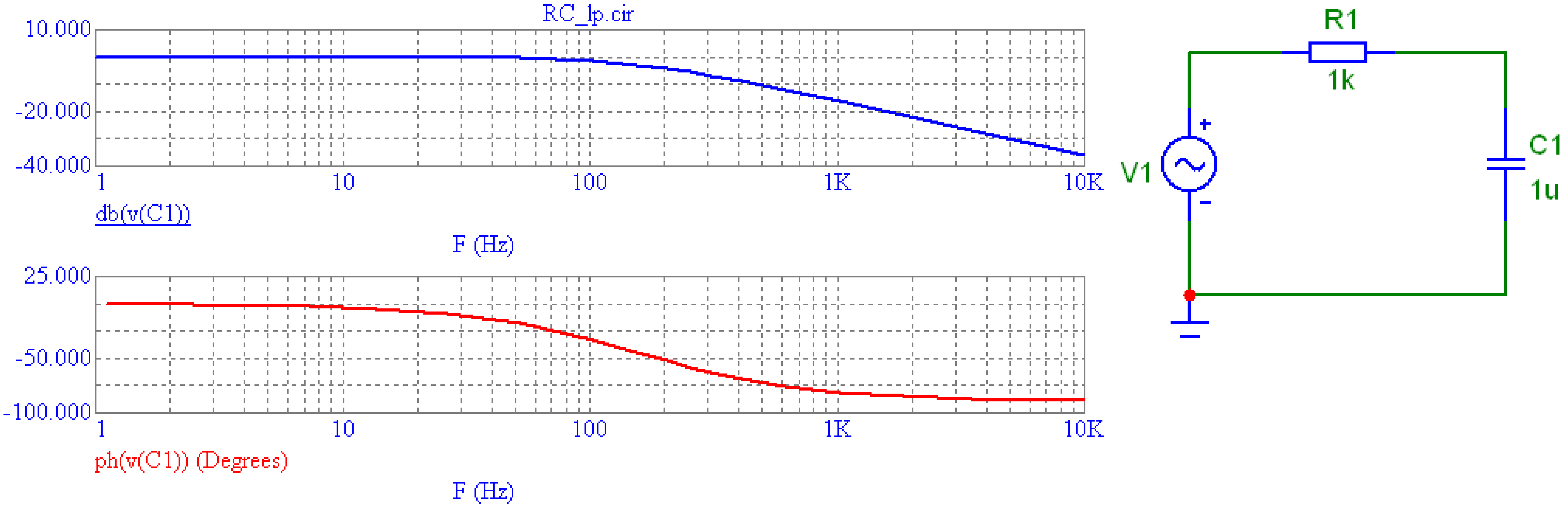


Рис. 17. RC-фильтр нижних частот

Синтез пассивных фильтров в MicroCap

Меню: Фильтры ⟹ Создание пассивных фильтров …

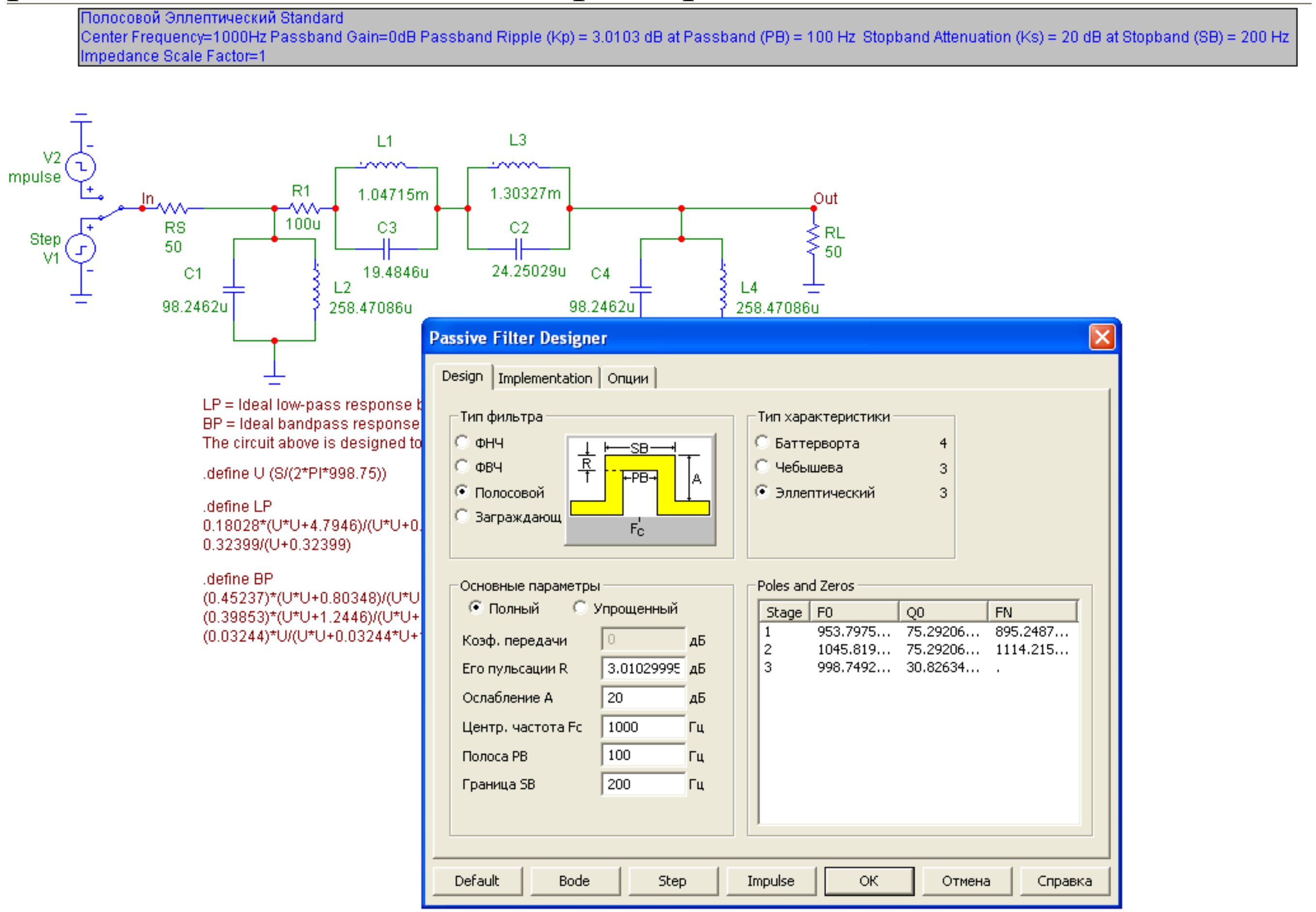


Рис. 17. Окно синтеза пассивных фильтров в МС

Трансформатор с идеальными линейными характеристиками

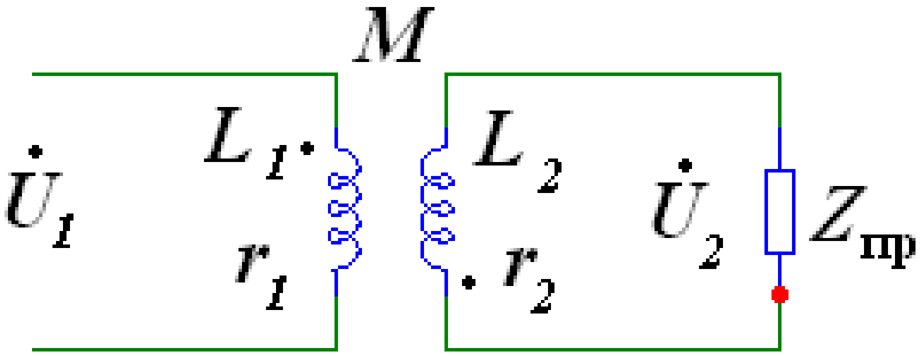


Рис. 18. Модель трансформатора

$$\begin{cases} u_1(t) = r_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} \\ -M \frac{di_1(t)}{dt} = r_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + u_2(t) \end{cases}, \tag{20}$$

где L_1, L_2 и r_1, r_2 – индуктивности и сопротивления обмоток; M - взаимные индуктивности обмоток.

При синусоидальном напряжении в установившемся режиме выполнив преобразование Фурье, получим операторные образы в комплексной форме:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \\ -j\omega M \dot{I}_1 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \end{cases}. \tag{21}$$

Причём $Z_{пр} = \dot{U}_2 / \dot{I}_2$ - есть комплексное сопротивление приёмника.

Степень магнитной связи контуров, называемая *коэффициент связи*:

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}}. \tag{22}$$

Трансформатор: идеальный, совершенный, реальный

При условиях $k = 1, r_2, r_2 = 0$ рассматривают две модели трансформаторов:

– совершенный трансформатор: $\frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = c$, ($const$) независимо от нагрузки;

– идеальный трансформатор: $\frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = c$, $\dot{U}_1 = -\mathrm{c}\dot{U}_2$ и $\dot{I}_1 = -\frac{1}{\mathrm{c}}\dot{I}_2$.

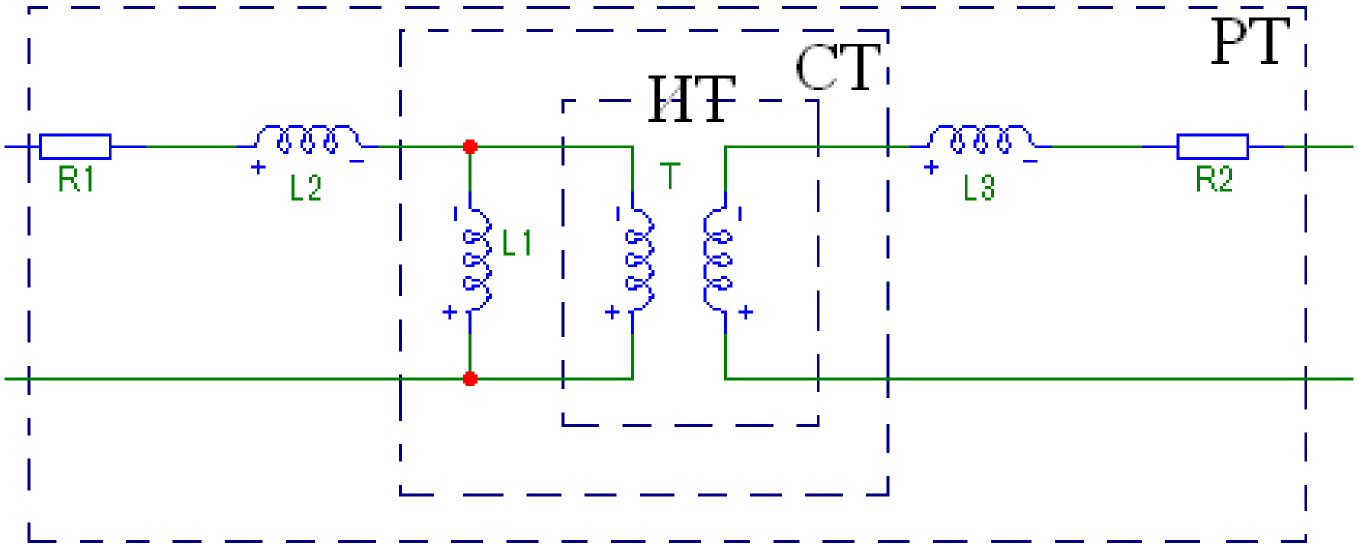


Рис. 19. Семы трёх моделей трансформаторов: ИТ, СТ и РТ

Поверхностный эффект, эффект близости

Поверхностный эффект – заключается в неравномерности распределения плотности переменного тока по сечению проводника, у поверхности проводника плотность тока имеет большие значения.

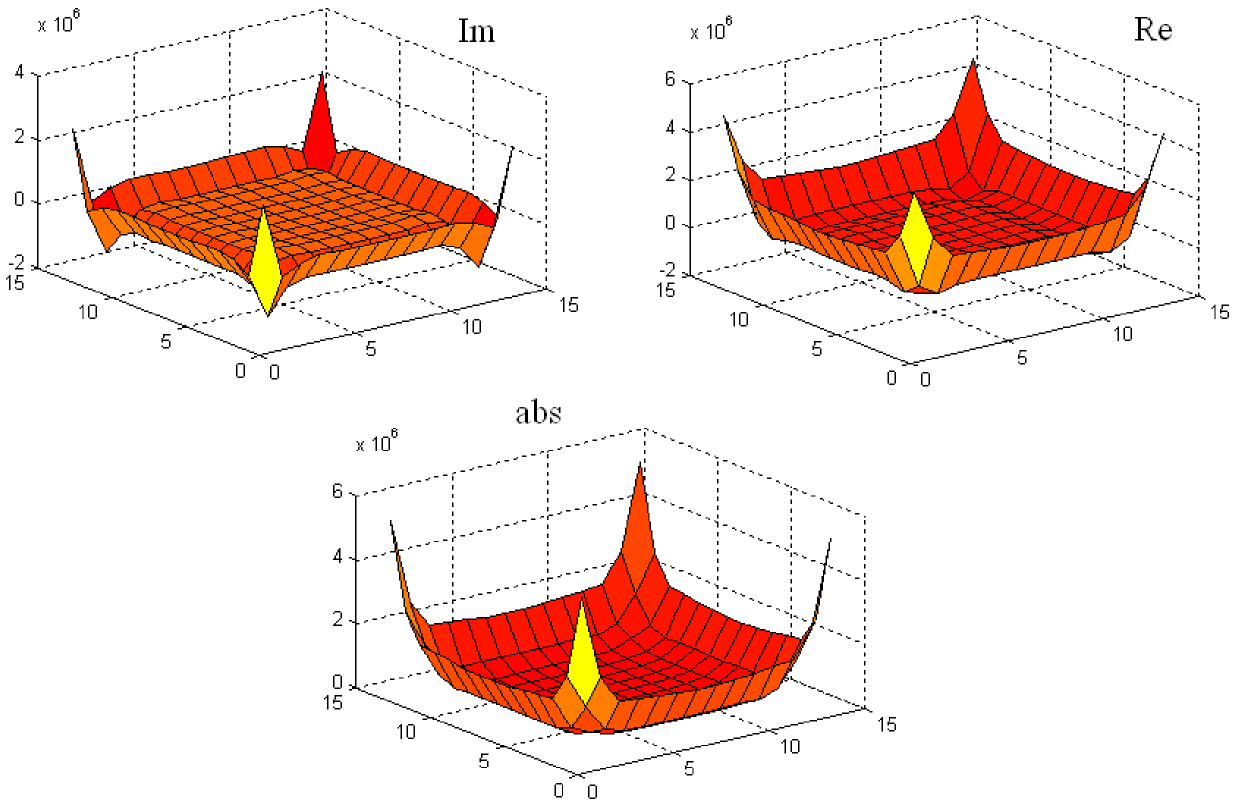


Рис. 20. Распределение комплексных компонент плотности тока по сечению медного проводника квадратного сечения с длиной стороны 14 мм

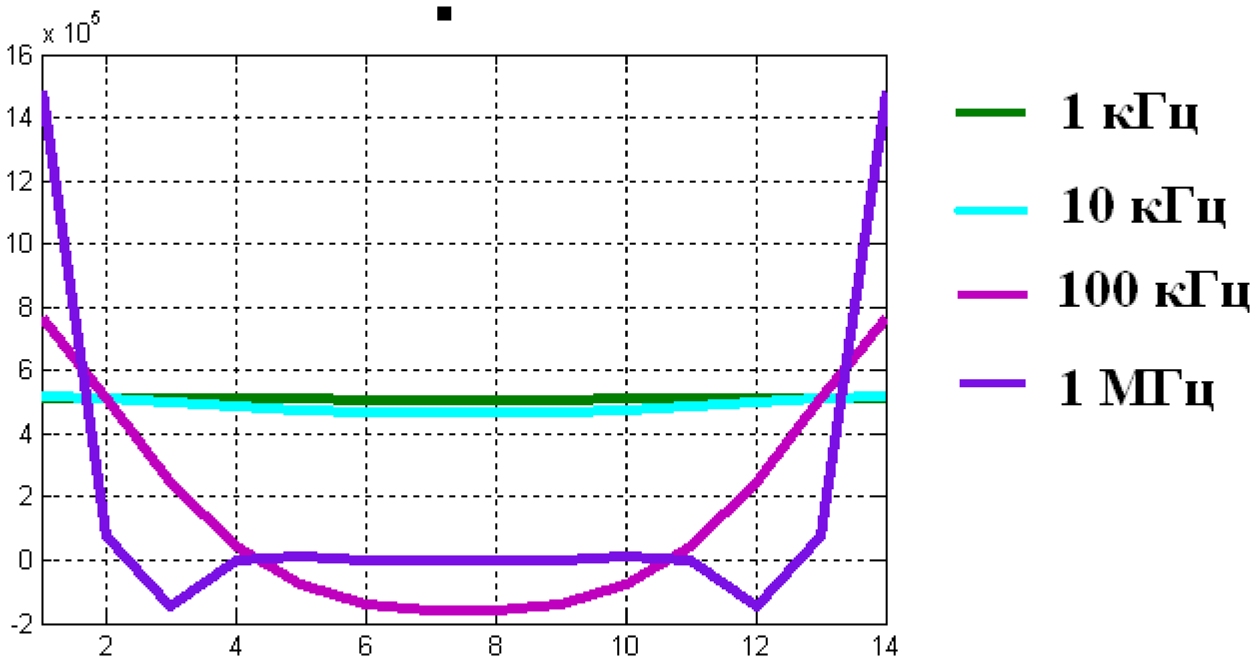


Рис. 21. Проявление поверхностного эффекта в зависимости от частоты

Оценить глубину проникновения возможно как:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}}, \tag{23}$$

где γ – удельная объемная электропроводность вещества; μ – абсолютная магнитная проницаемость вещества; ω – круговая частота гармонических колебаний.

Причина поверхностного эффекта и эффекта близости ЭДС самоиндукции проводника с переменным током, глубокие слои проводника сцеплены с большим числом линий магнитной индукции, чем поверхностные слои. При протекании переменного тока магнитное поле проводника с током изменяется. В результате изменения магнитного поля возникает ЭДС с током направленным противоположно первичному току (противо-ЭДС). В глубоких слоях проводника противо-ЭДС имеет большие значения, чем в поверхностных слоях.

Эффект близости

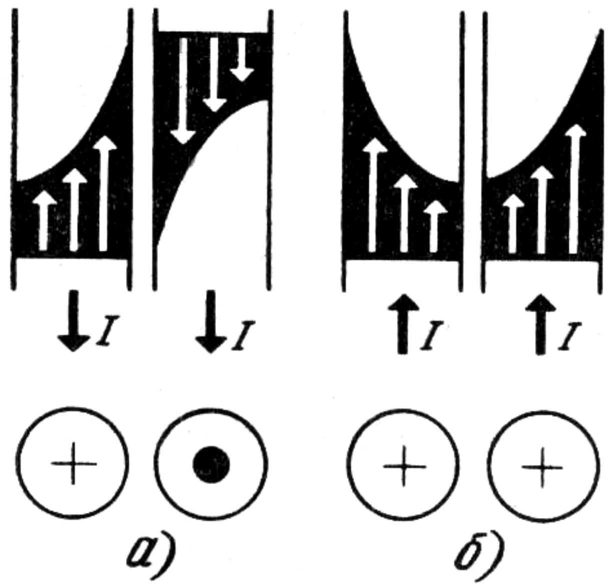


Рис. 22. Эффект близости

Виды электрических схем и элементы документации изделий схемотехники

Разделение по смысловой нагрузке:

функциональная схема; принципиальная схема; монтажная схема; эскизные чертежи; сборочный чертёж; схема деления на составные части; листинги программ; описания назначения и функционирования узлов; альбомы осциллограмм; спецификации; электронная модель.

Группирование по назначению:

эксплуатационная документация; ремонтно-техническая документация; отчётная документация; документация разработчика; тестовая документация.

Комплекс нормативных регулирующих документов: ЕСКД – единая система конструкторской документации.

Необходимо строго соблюдать соответствие формата документа требованиям ГОСТов

Изучить необходимые ГОСТЫ возможно на ресурсе

http://docs.cntd.ru/

Поиск производить по запросам:

«единая система конструкторской документации», «электрическая схема», «условные обозначения схемы электрические».

Литература по курсу Схемотехника

Основная литература

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р, Коровкин Н.В, Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники в 3-х томах // С-Пб.: Питер, 2003.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Перевод с английского. - Издание 2-е. - М: Издательство БИНОМ. - 2015. - 704 с.: ил.
3. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах // М.: «МИР», 1984. – 456 с. и 456 с.
4. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. 3-е изд. стер. // М.: ДМК Пресс, 2015 – 528 с.: ил.
5. Картер Б. Операционные усилители для всех // М.: Додэка-XXI, 2011 - 544 с.: ил.
6. Резевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. // М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.: ил.
7. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера-схемотехника // М.: Техносфера, 2008. – 608 с.
8. Стюарт Б. Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров // М.: Додэка-XXI, 2007. – 360 с.: ил.

Дополнительная литература

9. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов // М.: Техносфера, 2010. – 328 с.: ил.
10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров // М.: Наука, 1957. – 780 с.
11. Суходольский В. Ю. Altium Disigner: сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. // С-Пб.: БХВ-Питер, 2014 – 560 с.: ил.
12. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников // М.: Наука, 1977. – 672 с.
13. Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червоный И. Ф. и др. Технология полупроводникового кремния // М.: Металургия, 1992. – 408 с.: ил.