

Московский государственный университет

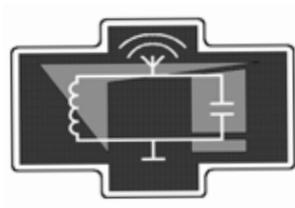
им М.В. Ломоносова

Физический факультет

С.Е. Стрыгин

РС-ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Методическая разработка для "Практикума по радиофизике"



Москва 2016 г.

УДК 621.375.123:621.382.333

Печатается по решению кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ

С.Е. Стрыгин

РС-цепи первого порядка. Методическая разработка для "Практикума по радиофизике". – М., изд. физического факультета МГУ, 2016, с. 19

Методическая разработка предназначена для студентов 3 курса физического факультета МГУ, выполняющих задачи в "Практикуме по радиофизике". В разработке изучаются характеристики интегрирующих и дифференцирующих РС-цепей, исследуются изменения формы прямоугольных импульсов при прохождении через эти цепи. Также изучаются характеристики РС-цепи Вина.

Объем 0.8 п.л.

Тираж 50 экз.

Заказ №

Отпечатано в отделе оперативной печати физического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова

Целью данной лабораторной работы является изучение характеристик интегрирующих и дифференцирующих RC-цепей, исследование изменения формы прямоугольных импульсов при прохождении через эти цепи. Также изучаются характеристики RC-цепи Вина.

1 Введение

В настоящее время RC- и RL-цепочки первого порядка широко применяются в вычислительной и импульсной технике. Порядок электрической цепи определяется числом реактивных элементов: цепь первого порядка включает один реактивный элемент – индуктивность или емкость и любое число резистивных элементов и независимых источников питания. С их помощью можно интегрировать или дифференцировать электрические сигналы, формировать рабочую полосу частот электронных устройств и выполнять другие полезные операции. В настоящей работе применение таких цепочек будет проиллюстрировано на примере RC-цепочек с омическим и емкостным выходами. Например, в физических приборах RC-цепочка с емкостным выходом часто встраивается в конечном каскаде усилителей (см. подробно в лабораторной работе "Операционный усилитель"). С помощью этой цепочки добиваются сглаживания или, как иногда говорят, интегрирования разного рода сигналов. Характеристикой, описывающей это сглаживание, является постоянная времени цепи $\tau = RC$. При выборе оптимальных условий измерений в эксперименте, таких как скорость и точность измерений, постоянная времени цепи играет важную роль. Отметим, что все выводы данной работы будут также справедливы и для RL-цепей, где постоянная времени равна $\tau = L/R$.

Стоит напомнить, что электрические цепи состоят из активных и пас-

сивных элементов. Активные элементы (биполярные и полевые транзисторы, усилители и др.) способны усиливать мощность колебаний, подводимых к ним. Пассивные элементы могут лишь изменить форму электрических сигналов, не увеличивая их мощность. К пассивным элементам, с одной стороны, относятся резисторы (активные сопротивления R , измеряются в омах - Ом), а с другой стороны, катушки индуктивности (индуктивности L , измеряются в генри - Гн) и конденсаторы (емкости C , измеряются в фарадах - Ф), создающие реактивные сопротивления.

Известно [1, 3], что любые непериодические сигналы $U(t)$ можно представить в виде разложения по гармоническим составляющим в виде интеграла Фурье

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (1)$$

Интеграл Фурье содержит непрерывный набор гармонических компонент. Комплексную функцию $\tilde{U}(\omega)$ называют комплексным спектром сигнала $U(t)$.

Свойства электрической цепи по изменению формы электрических сигналов очень часто описываются разного рода характеристиками, к которым относятся: передаточная (частотная) характеристика, являющаяся откликом цепочки на сигнал гармонической формы; переходная характеристика, являющаяся откликом цепи на единичный скачок (функция Хевисайда); импульсная характеристика, являющаяся откликом цепи на δ -импульс [1, 2, 3, 4]. В настоящей работе мы познакомимся с первыми двумя важными характеристиками, используемыми в современной радиотехнике.

2 Частотные характеристики RC-цепей

Передаточная частотная характеристика комплексного коэффициента передачи по напряжению $\tilde{K}(\omega)$ представляет собой зависимость от частоты отношения комплексной амплитуды выходного напряжения $\tilde{U}_{out}(\omega)$ цепи к комплексной амплитуде входного напряжения $\tilde{U}_{in}(\omega)$ (см. (1)):

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\tilde{U}_{out}(\omega)}{\tilde{U}_{in}(\omega)} = |\tilde{K}(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}, \quad (2)$$

где $|\tilde{K}(\omega)|$ – модуль комплексного коэффициента передачи (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента передачи напряжений); $\varphi(\omega)$ – аргумент комплексного коэффициента передачи (фаза-частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи напряжений). Частотные характеристики линейных электрических цепей имеют важное значение, так как позволяют наглядно судить о том, колебания каких частот пропускаются цепью, а какие "подавляются". АЧХ цепи показывает как соотносится амплитуда преобразованного гармонического сигнала на выходе с амплитудой гармонического сигнала на входе, а ФЧХ – на сколько различается фаза выходного сигнала по сравнению с входным. Подчеркнем, что в определении (2) речь идет об *установившихся* колебаниях, когда все переходные процессы в цепях затухли.

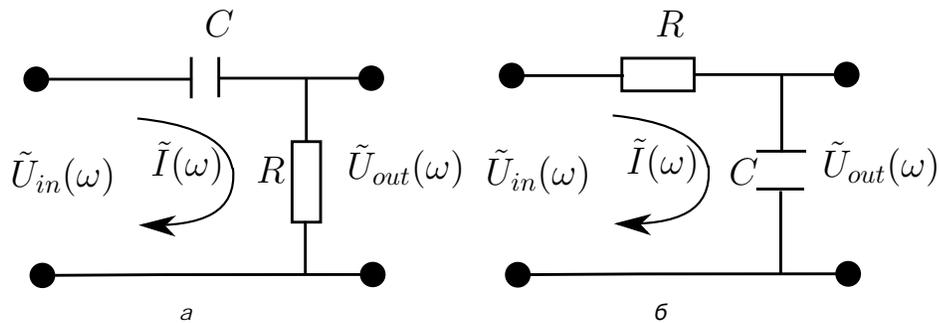


Рис. 1: а) RC-цепь с омическим выходом; б) RC-цепь с емкостным выходом.

Рассмотрим в качестве примера расчет передаточных частотных характеристик RC-цепей(Рис. 1).

2.1 RC-цепь с омическим выходом

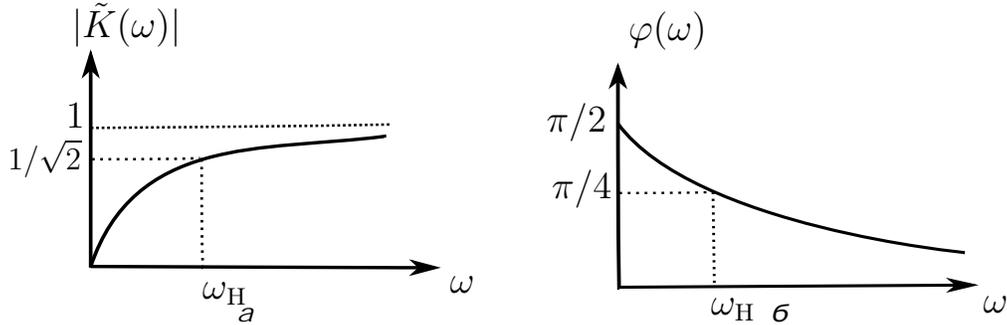


Рис. 2: Графики АЧХ(а) и ФЧХ(б) для RC-цепи с омическим выходом.

Схема RC-цепи с омическим выходом, приведенная на Рис. 1а, имеет общий импеданс $\tilde{Z}(\omega) = R + 1/i\omega C$. Поэтому комплексный коэффициент передачи по напряжению(2) будет равен

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\tilde{I}(\omega)R}{\tilde{I}(\omega)\tilde{Z}(\omega)} = \frac{R}{R + 1/i\omega C} = \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau}, \quad (3)$$

где $\tilde{I}(\omega)$ - комплексная амплитуда силы тока в цепи, $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи. АЧХ данной цепи имеет вид

$$|\tilde{K}(\omega)| = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}, \quad (4)$$

а ФЧХ –

$$\varphi(\omega) = \arg\tilde{K}(\omega) = \arg(i\omega\tau) - \arg(1 + i\omega\tau) = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega\tau). \quad (5)$$

Графики АЧХ и ФЧХ данной цепи изображены на Рис.2.

Таким образом, если входное напряжение цепи является гармоническим $U_{in}(t) = A \cos(\omega t) = \Re A e^{i\omega t}$, то выходное напряжение можно записать в

следующем виде:

$$U_{out}(t) = \Re \left(\tilde{K}(\omega) A e^{i\omega t} \right) = A |\tilde{K}(\omega)| \cos(\omega t + \varphi(\omega)). \quad (6)$$

Из формулы (4) хорошо видно, что такая цепь пропускает сигналы высоких частот (так как $|\tilde{K}(+\infty)| = 1$) и подавляет сигналы низких частот ($|\tilde{K}(0)| = 0$). Она называется фильтром высоких частот. Диапазон частот, в котором коэффициент передачи данной цепи уменьшается до уровня $1/\sqrt{2} \approx 0.7$ от ее максимального значения $K_{max} = 1$, называется полосой пропускания цепи, а частота границы полосы пропускания называется граничной частотой (см. Рис.2). В нашем случае нижняя циклическая граничная частота $\omega_H = 2\pi f_H$ (f_H – нижняя граничная частота) находится из выражения

$$|\tilde{K}(\omega_H)| = 1/\sqrt{2}. \quad (7)$$

Используя (4) и (7), рассчитаем ее для нашего примера RC-цепи с омическим выходом:

$$\omega_H RC = 1.$$

По известной граничной частоте полосы пропускания постоянную времени цепи можно найти по формуле

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_H}. \quad (8)$$

2.2 RC-цепь с емкостным выходом

Схема RC-цепи с емкостным выходом, приведенная на Рис.1б, также имеет общий импеданс $\tilde{Z}(\omega) = R + 1/i\omega C$. Поэтому комплексный коэффициент передачи по напряжению (2) будет равен

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\tilde{I}(\omega)(1/i\omega C)}{\tilde{I}(\omega)\tilde{Z}(\omega)} = \frac{R}{R + 1/i\omega C} = \frac{1}{1 + i\omega\tau}, \quad (9)$$

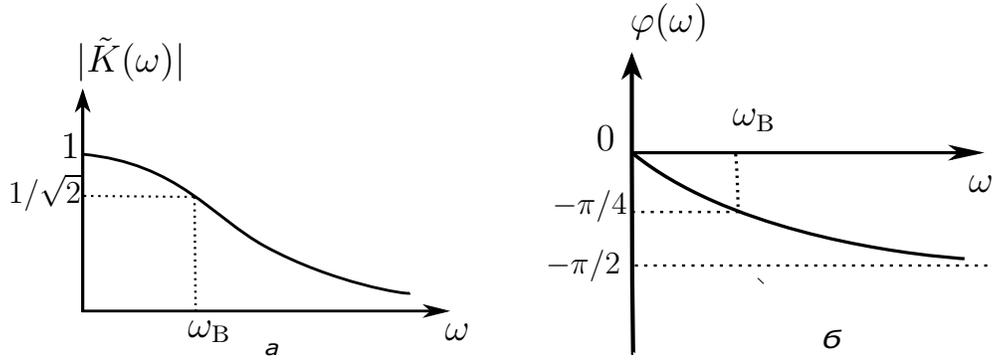


Рис. 3: Графики АЧХ(а) и ФЧХ(б) для RC-цепи с емкостным выходом.

где $\tilde{I}(\omega)$ - комплексная амплитуда силы тока в цепи, $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи. АЧХ данной цепи имеет вид

$$|\tilde{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}, \quad (10)$$

а ФЧХ –

$$\varphi(\omega) = \arg \tilde{K}(\omega) = -\arctg(\omega\tau). \quad (11)$$

Графики АЧХ и ФЧХ данной цепи изображены на Рис.3. Очевидно, что формула (6) справедлива и для этой цепочки.

Из формулы (9) хорошо видно, что такая цепь пропускает сигналы низких частот(так как $|\tilde{K}(0)| = 1$) и подавляет сигналы высоких частот ($|\tilde{K}(+\infty)| = 0$). Она называется фильтром низких частот. Верхняя циклическая граничная частота $\omega_B = 2\pi f_B$ (f_B – верхняя граничная частота) находится из выражения

$$|\tilde{K}(\omega_B)| = 1/\sqrt{2}. \quad (12)$$

Используя (9) и (12), рассчитаем ее для нашего примера RC-цепи с емкостным выходом:

$$\omega_B RC = 1.$$

По известной граничной частоте полосы пропускания постоянную времени цепи можно найти по формуле

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_B}. \quad (13)$$

2.3 Интегрирующие и дифференцирующие RC-цепи

RC-цепи могут быть использованы для интегрирования и дифференцирования разных сигналов. Найдем условие, при котором выходное напряжение в RC-цепи на Рис.1а подобно производной от входного. В случае гармонического напряжения получим

$$\frac{d}{dt}(\tilde{U}_{in}(\omega)e^{i\omega t}) = i\omega\tilde{U}_{in}(\omega)e^{i\omega t}.$$

Из (2) следует, что выходное напряжение будет пропорционально производной от $\tilde{U}_{in}(\omega)e^{i\omega t}$ в случае, если $\tilde{K}(\omega) \sim i\omega$. Следовательно, цепочку на Рис.1а можно считать дифференцирующей по отношению к гармоническому сигналу при условии(см. формулу (3))

$$\omega\tau \ll 1. \quad (14)$$

Условием точного дифференцирования произвольного входного напряжения является выполнение этих неравенств для всех спектральных компонент этой функции.

Цепочку на Рис.1б называют интегрирующей, так как напряжение на ее выходе подобно интегралу от входного сигнала. В случае гармонического напряжения получим

$$\int (\tilde{U}_{in}(\omega)e^{i\omega t}) dt = \frac{1}{i\omega}\tilde{U}_{in}(\omega)e^{i\omega t}.$$

Напряжение на выходе цепи будет подобно интегралу от гармонического входного сигнала, если выполняется условие(см. формулу (9))

$$\omega\tau \gg 1. \quad (15)$$

Условия интегрирования и дифференцирования сигналов во временном представлении имеют вид $\tau \left| \frac{dU_{out}}{dt} \right| \gg |U_{out}|$ и $\tau \left| \frac{dU_{out}}{dt} \right| \ll |U_{out}|$ соответственно[1].

3 Переходные характеристики РС-цепей

3.1 Переходные характеристики

В основе метода анализа линейных цепей лежит принцип суперпозиции: сумма откликов $\sum U_i(t)$ от отдельных воздействий $\psi_i(t)$ на линейную цепь должна быть равна отклику $U(t)$ от суммы воздействий $\sum \psi_i(t)$. Принцип суперпозиции позволяет представить отклик цепи $U(t)$ на сложный сигнал как сумму откликов на отдельные его составляющие. Эти составляющие выбираются так, чтобы анализ цепей был наиболее простым.

Возможность представления отклика цепи на сложный сигнал в виде суммы откликов на стандартные сигналы позволяет использовать стандартные отклики в качестве соответствующих характеристик цепи. В случае передаточной характеристики сложный сигнал мы раскладывали по гармоническим функциям(в форме ряда или интеграла Фурье). Удобно также находить отклик на воздействия в виде единичной ступеньки $\sigma(t)$. При разложении сигнала по единичным ступенькам характеристикой цепи является переходная характеристика цепи $h(t)$ - отклик цепи на сигнал в виде единичной ступеньки (функция Хевисайда)[1, 3]:

$$\sigma(t - \tau_o) = \begin{cases} 0, & t < \tau_o, \\ \frac{1}{2}, & t = \tau_o, \\ 1, & t > \tau_o. \end{cases}$$

Известно[1, 3], что любую непрерывную функцию времени $x(t)$ (ограниченную при $t > 0$) можно представить как суперпозицию ступенчатых функций Хе-

висайда:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x'(\xi)\sigma(t - \xi)d\xi.$$

Зная переходную характеристику $h(t)$, на основании принципа суперпозиции можно найти отклик на произвольное воздействие $x(t)$ в следующем виде(интеграл Дюамеля)[1, 3]:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x'(\xi)h(t - \xi)d\xi.$$

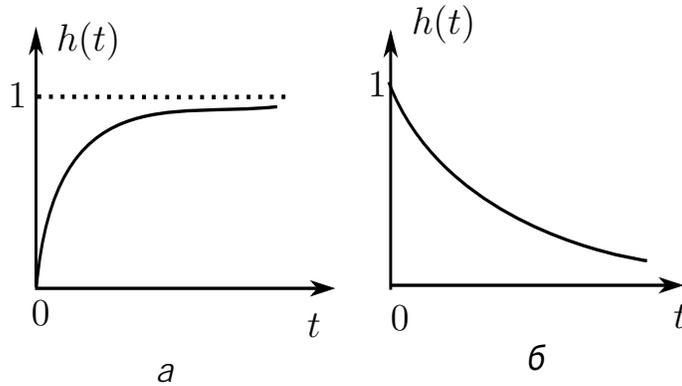


Рис. 4: а) Переходная характеристика интегрирующей RC-цепи; б) переходная характеристика дифференцирующей RC-цепи.

Переходные характеристики цепи вычисляются путем решения дифференциального уравнения цепи с правой частью в форме ступеньки единичной высоты[1, 3]. Можно получить, что переходная характеристика дифференцирующей RC-цепи имеет вид(см. Рис.4б)

$$h(t) = \exp(-t/\tau), \quad t \geq 0, \quad (16)$$

а переходная характеристика интегрирующей RC-цепи(см. Рис.4а):

$$h(t) = 1 - \exp(-t/\tau), \quad t \geq 0. \quad (17)$$

3.2 Отклик RC-цепей на прямоугольные импульсы

Известно, что единичный прямоугольный импульс можно представить в виде суммы двух сдвинутых относительно друг друга ступенчатых функций Хевисайда разных знаков (см. Рис.5). Тогда общий отклик цепи на прямоугольный импульс есть сумма откликов вида (16) или (17) на каждую единичную ступеньку. Стоит отметить, что при различных соотношениях между длительностью прямоугольных импульсов $\tau_{И}$ и постоянной времени цепочек получаются разные эпюры выходных напряжений для RC-цепей.

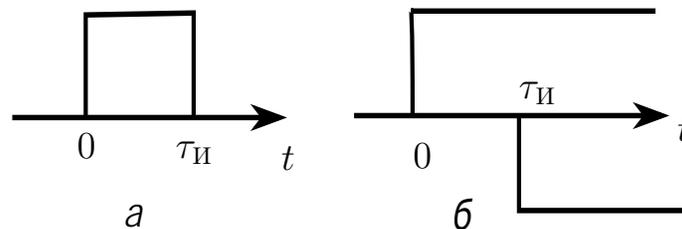


Рис. 5: а) Единичный прямоугольный импульс длительности $\tau_{И}$; б) две сдвинутые относительно друг друга ступенчатые функции Хевисайда разных знаков.

На Рис.6а показано изменение формы прямоугольного сигнала с амплитудой U_o и длительностью $\tau_{И}$ на выходе RC-цепочки с омическим выходом при различных соотношениях длительности импульса и постоянной времени цепи ($RC \ll \tau_{И}$ и $RC \gg \tau_{И}$). При больших значениях $\tau = RC$ по сравнению с $\tau_{И}$ форма выходного сигнала близка к форме входного. При малых значениях $\tau/\tau_{И}$ выходной сигнал превращается в два импульса разной полярности, начало которых совпадает с фронтом и срезом входного прямоугольного сигнала. Длительность импульса одной полярности может быть значительно меньше длительности входного сигнала. Несложно догадаться, что в этом случае RC-цепь дифференцирует прямоугольный сигнал,

что приводит к появлению двух импульсов на выходе цепи.

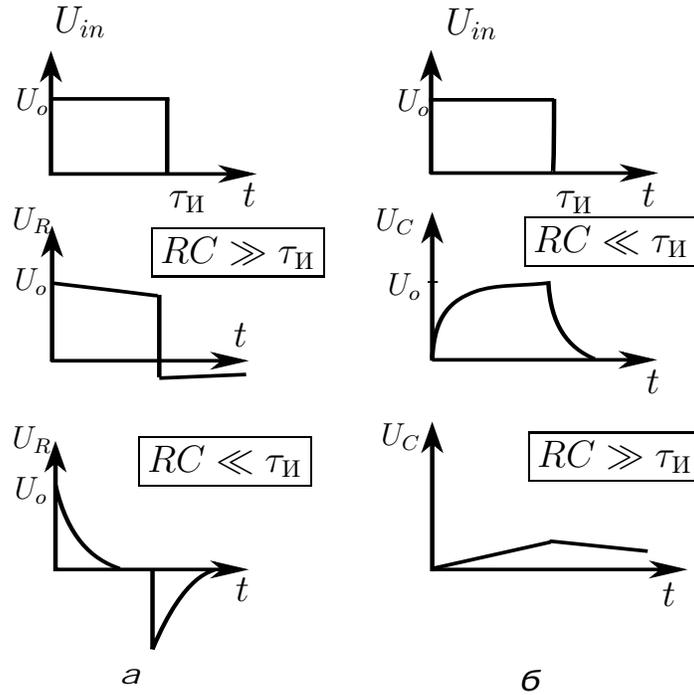


Рис. 6: а) Отклики RC-цепи с омическим выходом на единичный прямоугольный импульс; б) отклики RC-цепи с емкостным выходом на единичный прямоугольный импульс.

На Рис.6б показаны графики выходного напряжения RC-цепи с емкостным выходом для различных соотношений длительности импульса и постоянной времени цепи ($RC \ll \tau_{И}$ и $RC \gg \tau_{И}$). При малых значениях $\tau = RC$ по сравнению с $\tau_{И}$ форма выходного сигнала близка к форме входного. При увеличении $\tau/\tau_{И}$ выходной сигнал растягивается во времени. Это соответствует зарядке и последующей разрядке конденсатора. В этом случае RC-цепь интегрирует прямоугольный сигнал, что и дает сглаживание сигнала.

4 Цепь Вина

Цепь Вина (см. Рис. 7) соединяет свойства описанных выше RC-цепей. На низких частотах она ведет себя как RC-цепь с омическим выходом, а на высоких частотах – как RC-цепь с емкостным выходом. Найдем передаточную характеристику цепи

$$\tilde{K}(\omega) = \tilde{I}(\omega)\tilde{Z}_1(\omega)/\tilde{I}(\omega)\tilde{Z}_{total}(\omega) = \frac{1}{1 + C_3/C_4 + R_4/R_3 + i\frac{\omega^2 C_3 C_4 R_3 R_4 - 1}{\omega C_4 R_3}}, \quad (18)$$

где $\tilde{I}(\omega)$ – комплексная амплитуда силы тока в цепи, а $\tilde{Z}_1(\omega) = R_3/(1 + i\omega R_3 C_3)$ и $\tilde{Z}_{total}(\omega) = R_4 + 1/i\omega C_4 + \tilde{Z}_1(\omega)$ – выходной и общий импедансы цепи Вина. Тогда АЧХ цепи Вина имеет вид

$$|\tilde{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 + C_3/C_4 + R_4/R_3)^2 + \left(\frac{\omega^2 C_3 C_4 R_3 R_4 - 1}{\omega C_4 R_3}\right)^2}}, \quad (19)$$

а ФЧХ цепи –

$$\varphi(\omega) = \arg \tilde{K}(\omega) = \arctg \left(\frac{1 - \omega^2 C_3 C_4 R_3 R_4}{(1 + C_3/C_4 + R_4/R_3)\omega C_4 R_3} \right). \quad (20)$$

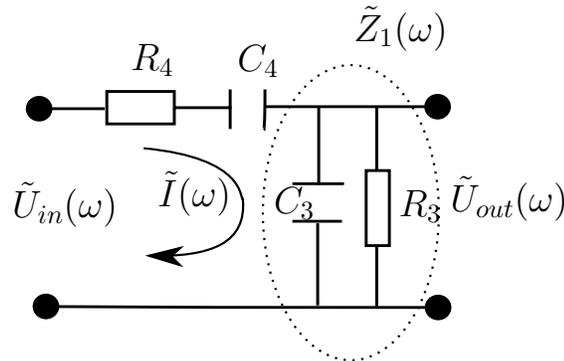


Рис. 7: Цепь Вина

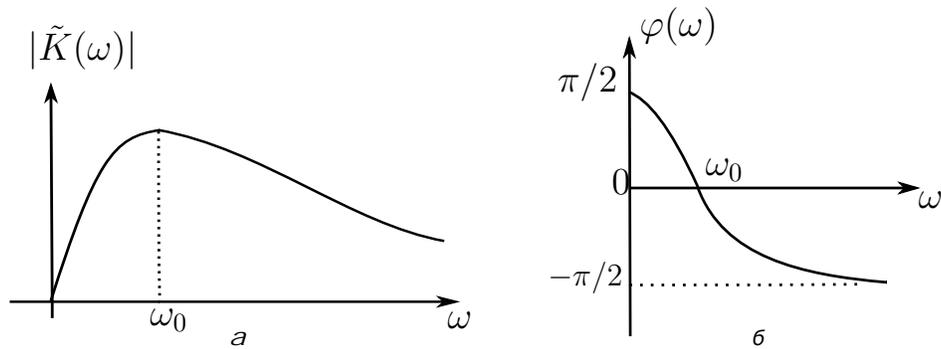


Рис. 8: а) АЧХ цепи Вина; б) ФЧХ цепи Вина.

Графики АЧХ и ФЧХ для цепи Вина приведены на Рис. 8. Стоит отметить, что модуль коэффициента передачи максимален на частоте

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_3 C_4 R_3 R_4}}, \quad (21)$$

а сдвиг фаз между выходным и входным напряжением цепи Вина на этой частоте ω_0 равен нулю. Данное значение частоты называется квазирезонансным, исходя из аналогии с резонансной частотой колебательного контура. Свойства цепи Вина на квазирезонансной частоте часто используются при конструировании генераторов гармонических сигналов [1, 2, 3, 4]. Пример RC-генератора, собранного на цепи Вина, будет подробно разобран в лабораторной работе "RC-генераторы".

5 Упражнения

5.1 Упражнение 1: RC-цепь с омическим выходом

5.1.1 Измерение АЧХ

По заданному значению f_H рассчитайте параметры цепи R и C, используя формулу (8). Стоит учесть, что резистор R необходимо выбирать так, чтобы входное сопротивление измерительного прибора $R_{вх} \gg R$. Входное

сопротивление, например, осциллографов составляет порядка нескольких мегаом. Измерьте значение емкости конденсатора и сопротивление резистора и соберите цепь.

Подайте на вход цепочки гармонический сигнал с генератора низкочастотных колебаний и снимите с помощью осциллографа зависимость модуля коэффициента передачи от частоты (разумно менять частоту с шагом в 2 или в 3 раза). **Стоит заметить, что табло генератора показывает обычную частоту f !** Постройте график АЧХ $|\tilde{K}(f)|$, используя логарифмический масштаб по оси частот. Сравните экспериментальную кривую с расчетной.

5.1.2 Изучение прохождения прямоугольного импульса

Задайте длительность $\tau_{\text{И}}$ и период повторения T прямоугольных импульсов. Период повторения должен быть много больше постоянной времени цепи. Рекомендуемые диапазоны: $1\text{мкс} \ll \tau_{\text{И}} \ll 100\text{мкс}$ и $100\text{мкс} \ll T \ll 1000\text{мкс}$.

Подайте на вход цепочки последовательность прямоугольных импульсов произвольной амплитуды. Пронаблюдайте на экране осциллографа форму отдельного выходного импульса для случаев $\tau_{\text{И}} \ll RC$ и $\tau_{\text{И}} \gg RC$. Зарисуйте эюры входного и выходного напряжений и объясните их формы и физический смысл.

5.2 Упражнение 2: RC-цепь с емкостным выходом

5.2.1 Измерение АЧХ и изучение прохождения прямоугольного импульса

Выполните аналогичные задания параграфов 5.1.1 и 5.1.2 для RC-цепи с емкостным выходом. В этом случае параметры цепи рассчитывайте по формуле (13) для верхней частоты f_V .

5.3 Упражнение 3: Интегрирование сигналов

С генератора сигналов подайте на вход RC-цепи с емкостным выходом сигналы прямоугольной и пилообразной форм. Задайте правильно длительность $\tau_{и}$ и период повторения T импульсов таким образом, чтобы выполнялось условие интегрирования. Зарисуйте эпюры входного и выходного напряжений и объясните их формы и физический смысл.

5.4 Упражнение 4: Измерение квазирезонансной частоты цепи Вина

По заданному значению квазирезонансной частоты $f_0 = \omega_0/2\pi$ рассчитайте параметры цепи Вина для случая $R_4 = R_3$ и $C_4 = C_3$. Соберите цепочку. Значение квазирезонансной частоты, на которой сдвиг фаз равен нулю, для цепочки Вина можно определить, используя фигуры Лиссажу. В этом случае осциллограф переводится в режим внешней развертки, на вход X подается сигнал с выхода низкочастотного генератора, а на вход Y - сигнал с выхода цепочки. Снимите зависимость модуля коэффициента передачи от частоты. Постройте график АЧХ $|\tilde{K}(f)|$, используя логарифмический масштаб по оси частот.

6 Контрольные вопросы

1. Начертите схемы основных типов RC-цепей. Для чего они используются?
2. Чему равна постоянная времени для RC-цепи? Какова ее размерность?
3. АЧХ и ФЧХ RC-цепей. Нарисовать графики и объяснить их физический смысл.
4. Что такое граничная частота и полоса пропускания RC-цепи?
5. Как влияют значения R и C на АЧХ и ФЧХ цепи?
6. Известно, что условия интегрирования и дифференцирования можно обеспечить при различных величинах R и C. Из каких соображений следует выбирать конкретные величины R и C?
7. Что называется переходным процессом в электрической цепи? Переходная характеристика RC-цепей и ее физический смысл.
8. Эшоры выходного напряжения RC-цепей при входном сигнале прямоугольной формы. Объяснить физический смысл данных кривых.
9. АЧХ И ФЧХ цепи Вина. Что такое квазирезонансная частота?

7 Содержание отчета

- Расчеты величин, полученные при подготовке к работе.
- Принципиальная схема лабораторного макета RC-цепей и цепи Вина.
- Таблицы с данными для построения АЧХ цепей.

- Графики измерения АЧХ цепей.
- Расчеты, выполненные по результатам измерений.
- Анализ результатов расчета и эксперимента.

Список литературы

- [1] Основы радиофизики. А.А. Белов, Г.В. Белокопытов, Ю.И. Кузнецов, А.С. Логгинов, И.В. Иванов, К.С. Ржевкин; под ред. А.С. Логгинова.— М.: Изд-во УРСС, 1996.
- [2] И.Т. Трофименко, Е.В. Лебедева, Н.С. Седлецкая. Практикум по радиоэлектронике. Под ред. А.П. Сухорукова.— М.: Изд-во Мос. ун-та, 1997.
- [3] Краткое пособие по радиофизике. Ю.И. Воронцов, И.А. Биленко; под ред. А.С. Логгинова, Изд-во КДУ, 2007.
- [4] Ю.И. Кузнецов, А.С. Логгинов, В.П. Митрофанов. Усилители и РС-генераторы низкой частоты на транзисторах и интегральных схемах.— М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009.