

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»
Филиал «Минский радиотехнический колледж»

Учебный предмет
«Электрические измерения»

Инструкция
по выполнению лабораторной работы №22
«Снятие амплитудно-частотных характеристик электронных устройств»

Минск 2022

Лабораторная работа №22

Тема работы: «Снятие амплитудно-частотных характеристик электронных устройств»

1 Цель работы

Исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) линейных четырехполюсников (RC-цепей).

2 Задание

Снять АЧХ дифференцирующей RC-цепи, интегрирующей RC-цепи.

3 Оснащение работы

Техническое задание, генератор низкочастотный ГЗ-109, милливольтметр ВЗ-38, RC-цепи, калькулятор.

4 Основные теоретические сведения

4.1 Понятие четырехполюсника

Четырехполюсник – это электрическая цепь, имеющая два входных и два выходных вывода и, следовательно, имеющая четыре полюса, рисунок 22.1. На практике часто требуется определить связь между сигналами на входе и выходе четырехполюсника, не описывая внутренние процессы, протекающие в нем. В этом случае в теории цепей четырехполюсник принято называть «черным ящиком».

Электрические цепи состоят из активных и пассивных элементов. Активные элементы способны усиливать мощность колебаний, подводимых к ним. Пассивные элементы могут лишь изменить форму электрических сигналов.

К пассивным элементам относятся резисторы (сопротивление, измеряется в омах – Ом), катушки индуктивности (индуктивности, измеряются в генри, Гн), конденсаторы (емкости, измеряются в фарадах – Ф).

Мгновенные значения напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в этих элементах связаны следующими соотношениями:

$$u_R = iR, u_L = L \frac{di}{dt}, u_C = \frac{1}{C} \int idt, \quad (22.1)$$

(аргумент t в функциях напряжения и тока здесь опущен – для удобства восприятия).

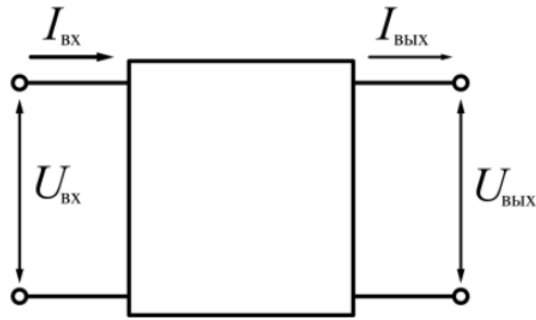


Рисунок 22.1 – Электрическая цепь: четырехполюсник

Свойства линейных цепей (линейных четырехполюсников) можно определить с помощью такого параметра, как частотный коэффициент передачи, который равен отношению амплитуды напряжения на выходе четырехполюсника к амплитуде напряжения на входе:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (22.2)$$

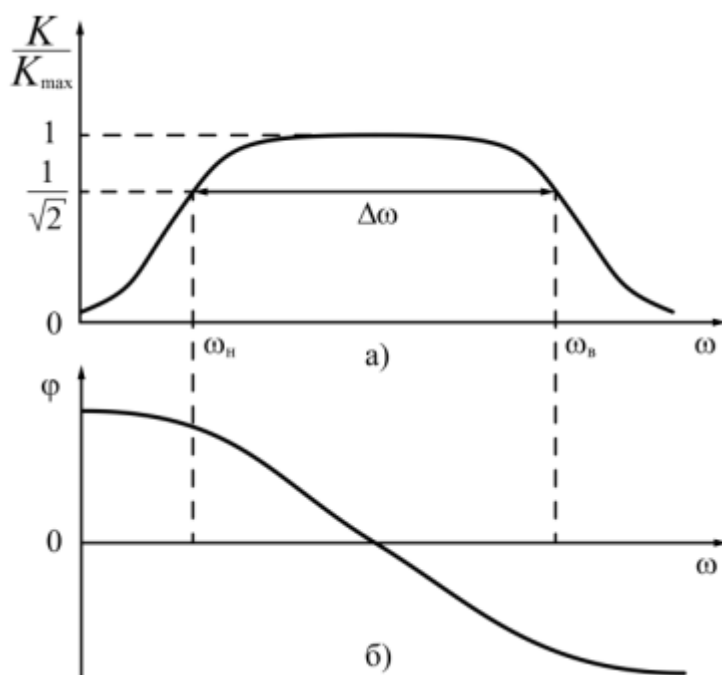
Здесь используются понятия комплексных амплитуд входного $U_{\text{ВХ}}$ и выходного $U_{\text{ВЫХ}}$ гармонических напряжений. Комплексные амплитуды зависят от угловой частоты ω , поэтому их часто записывают через общепринятые обозначения:

$$U_{\text{ВХ}} = \dot{U}_{\text{ВХ}}(\omega), U_{\text{ВЫХ}} = \dot{U}_{\text{ВЫХ}}(\omega). \quad (22.3)$$

Частотный коэффициент передачи (чаще просто коэффициент передачи) линейной цепи (линейного четырехполюсника) определяется следующим образом:

$$K(\omega) = \dot{K}(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = |K(\omega)|e^{j\varphi(\omega)}. \quad (22.4)$$

Модуль коэффициента передачи $|K(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент $\varphi(\omega)$ – фазочастотной характеристикой (ФЧХ) линейного четырехполюсника. Как правило, АЧХ имеет один максимум, а ФЧХ изменяется монотонно при изменении частоты, рисунок 22.2.



а – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); б – фазочастотная характеристика (ФЧХ)

Рисунок 22.2 – Характеристики линейной цепи

В области некоторой полосы частот отклик линейной цепи на входное воздействие начинает уменьшаться. В связи с этим используют понятие полосы пропускания (рабочей полосы) – области частот, где модуль коэффициента передачи $|K(\omega)|$ имеет значение не менее $1/\sqrt{2}$ от своего максимального значения. Часто, при практических расчетах используют нормированный модуль коэффициента передачи K/K_{\max} , максимальное значение которого равно единице. Значение $1/\sqrt{2} = 0,707$, по которому определяют полосу пропускания линейной цепи, введено не случайно. Дело в том, что на границах полосы пропускания модуль коэффициента передачи по мощности, равный отношению выходной и входной мощностей, уменьшается в два раза.

На рисунке 22.2 полоса пропускания линейной цепи заключена в области от нижней ω_H до верхней ω_B круговой частоты, и поэтому ее ширина определяется как $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$. При практических расчетах часто пользуются не круговой, а циклической частотой $f = \omega/(2\pi)$. В этом случае полоса пропускания цепи

$$\Delta f = f_B - f_H, \quad (22.5)$$

где f_H – нижняя, и f_B – верхняя граничные циклические частоты.

4.2 Дифференцирующие цепи

Рассмотрим одну из схем простейшего линейного четырехполюсника – последовательную электрическую RC -цепь, рисунок 22.3.

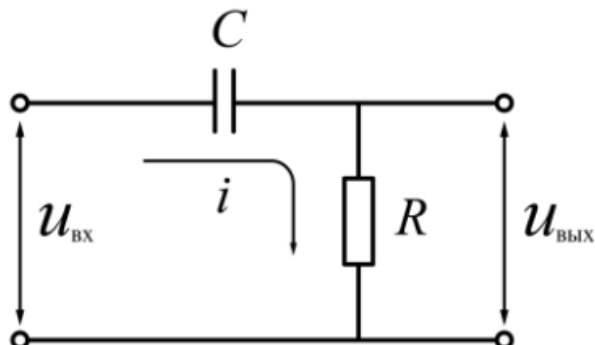


Рисунок 22.3 – Дифференцирующая цепь

Пусть на входе цепи действует напряжение $u_{ВХ}(t)$, а выходное напряжение $u_{ВЫХ}(t)$ снимается с резистора R .

Попытаемся выяснить, в каких условиях эта цепь будет дифференцировать входной сигнал.

Воспользовавшись известным в физике вторым законом Кирхгофа, запишем мгновенное значение напряжения для всей линейной цепи

$$u_{ВХ}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + u_{ВЫХ}(t), \quad (22.6)$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока.

Продифференцируем по времени обе части этого соотношения:

$$\frac{du_{ВХ}(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) + \frac{du_{ВЫХ}(t)}{dt}. \quad (22.7)$$

Умножив и поделив первое слагаемое в правой части на R и учитывая, что $u_{ВЫХ}(t) = i(t)R$, получим

$$u_{ВЫХ}(t) + \tau \frac{du_{ВЫХ}(t)}{dt} = \tau \frac{du_{ВХ}(t)}{dt}, \quad (22.8)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи.

Если постоянная времени цепи τ настолько мала, что

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) \gg \tau \frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt}, \quad (22.9)$$

то выражение (22.7) примет вид

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) \approx \tau \frac{du_{\text{ВХ}}(t)}{dt}. \quad (22.10)$$

Таким образом, получили, что анализируемая RC -цепь, рисунок 22.3, при соблюдении неравенства (22.8) может осуществлять линейную операцию дифференцирования, поданного на нее сигнала.

Чтобы определить частотную зависимость коэффициента передачи дифференцирующей цепи, запишем комплексную амплитуду тока:

$$I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (22.11)$$

Выразим комплексную амплитуду выходного напряжения через ток: $U_{\text{ВЫХ}} = IR$, после чего найдем частотный коэффициент передачи

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{IR}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}. \quad (22.12)$$

Теперь вычислим модуль частотного коэффициента передачи и определим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) дифференцирующей цепи:

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2}}}. \quad (22.13)$$

Вычислим фазу частотного коэффициента передачи и определим фазочастотную характеристику (ФЧХ) дифференцирующей цепи:

$$\arg \dot{K}(\omega) = \varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{\omega\tau}. \quad (22.14)$$

На рисунке 22.4 приведен график АЧХ дифференцирующей цепи.

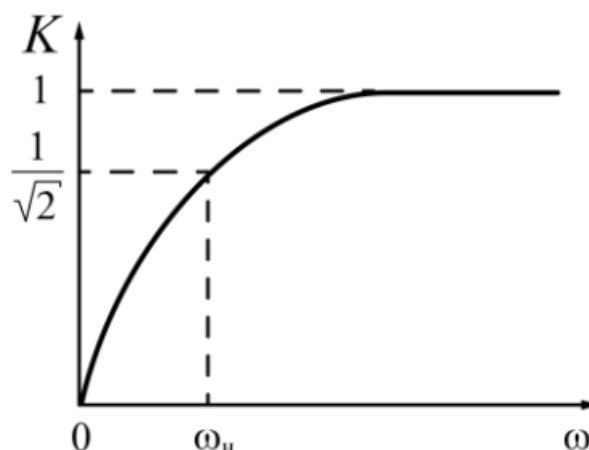


Рисунок 22.4 – АЧХ дифференцирующей цепи

Из графика АЧХ видно, что дифференцирующая цепь пропускает высокие частоты, задерживая низкие, т.е. является фильтром верхних частот (ФВЧ). Полоса пропускания дифференцирующей цепи ограничена только со стороны низких частот. Приравняв правую часть (22.12) к $1/\sqrt{2}$, вычислим нижнюю граничную частоту полосы пропускания:

$$\omega_H = \frac{1}{\tau}. \quad (22.15)$$

Применительно к фильтрам, граничные частоты полосы пропускания называют частотами среза фильтра.

4.3 Интегрирующие цепи

Рассмотрим RC -цепь, в которой выходной сигнал снимается с конденсатора C , рисунок 22.5.

Определим условие, при котором цепь интегрирует сигнал. Используя аналогию с формулой (22.5), запишем

$$u_{\text{ВХ}}(t) = i(t)R + u_{\text{ВЫХ}}(t), \quad (22.16)$$

где $u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$.

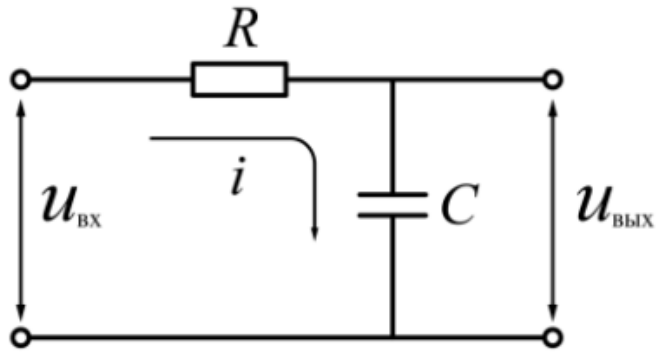


Рисунок 22.5 – Интегрирующая цепь

Продифференцируем $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ по времени:

$$\frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = \frac{1}{C}i(t), \quad (22.17)$$

и записав выражение для $i(t)$, подставим его в формулу (22.5). Учтя, что $\tau = RC$ – постоянная времени цепи, получим:

$$u_{\text{ВХ}}(t) = \tau \frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + u_{\text{ВЫХ}}(t). \quad (22.18)$$

Пусть постоянная времени цепи настолько велика, что

$$\tau \frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} \gg u_{\text{ВЫХ}}(t), \quad (22.19)$$

тогда

$$u_{\text{ВХ}}(t) \approx \tau \frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt}. \quad (22.20)$$

Интегрирование последнего выражения дает:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t u_{\text{ВХ}}(t) dt. \quad (22.21)$$

Итак, RC -цепь с большой постоянной времени интегрирует входной сигнал.

Для определения частотного коэффициента передачи интегрирующей цепи запишем комплексную амплитуду тока через комплексное входное напряжение

$$I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (22.22)$$

Учитывая, что $U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{j\omega C}$, и используя последнее выражение, запишем

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{\frac{U_{\text{ВХ}}}{j\omega C}}{U_{\text{ВХ}} \cdot \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right)} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}. \quad (22.23)$$

Вычислив модуль данного частотного коэффициента передачи, находим АЧХ интегрирующей цепи

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}. \quad (22.24)$$

Вычислим фазу частотного коэффициента передачи и определим ФЧХ интегрирующей цепи:

$$\arg \dot{K}(\omega) = \varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{\omega\tau}. \quad (22.25)$$

На рисунке 22.6 приведен график АЧХ интегрирующей цепи.

Из рисунка 22.6 следует, что интегрирующая цепь пропускает низкие частоты, задерживая высокие, т.е. является фильтром нижних частот (ФНЧ). Верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи можно определить, приравняв правую часть формулы (22.23) к $1/\sqrt{2}$, вычислим нижнюю граничную частоту полосы пропускания:

$$\omega_{\text{В}} = \frac{1}{\tau}. \quad (22.26)$$

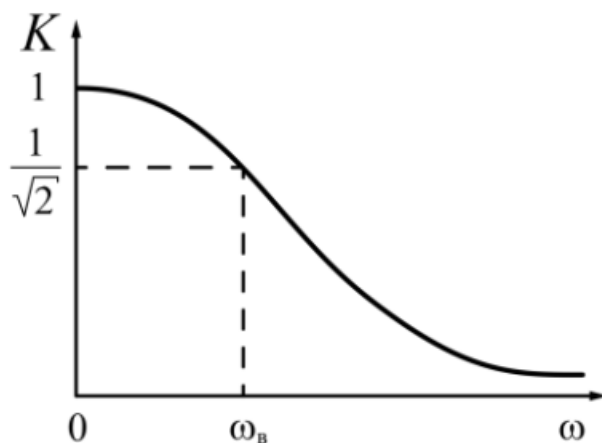


Рисунок 22.6 – АЧХ интегрирующей цепи

В радиоэлектронных устройствах такие цепи используют в качестве так называемых сглаживающих (*smoothing*), или низкочастотных, фильтров.

Технические данные приборов

1 Технические данные генератора низкочастотного ГЗ-109 приведены в описании лабораторной работы 1, с. 18.

Передняя панель генератора показана на рисунке 3.10.

2 Технические данные милливольтметра ВЗ-38 приведены в описании лабораторной работы 1, с. 18.

5 Порядок выполнения работы

5.1 Снятие амплитудно-частотной характеристики дифференцирующей RC-цепи

5.1.1 Собрать схему измерений, рисунок 22.7.

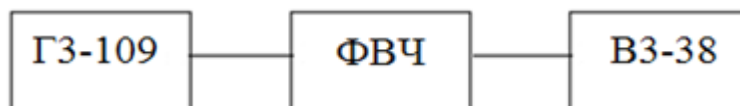


Рисунок 22.7 – Схема измерений

5.1.2 Установить напряжение на выходе генератора 1 В.

5.1.3 Меняя частоту сигнала от 50 Гц до 20 кГц, снять АЧХ цепи. Шаг изменения частоты выбирать в соответствии с характером и скоростью изменения коэффициента передачи.

5.1.4 Результаты измерений представить в виде графика АЧХ.

5.2 Снятие амплитудно-частотной характеристики интегрирующей RC-цепи

5.2.1 Собрать схему измерений, рисунок 22.8.



Рисунок 22.8 – Схема измерений

5.2.2 Установить напряжение на выходе генератора 1 В.

5.2.3 Меняя частоту сигнала от 50 Гц до 20 кГц, снять АЧХ цепи. Шаг изменения частоты выбирать в соответствии с характером и скоростью изменения коэффициента передачи.

5.2.4 Результаты измерений представить в виде графика АЧХ.

6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы учащегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Оснащение работы: _____

Результат выполнения работы: _____

Таблицы с исходными данными и результатами расчетов в соответствии с вариантом.

Расчеты.

Ответы на контрольные вопросы.

Выводы по работе.

7 Контрольные вопросы и задания

1 Понятие четырехполюсника, активные и пассивные элементы цепи.

2 Схемы дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей.

3 Основные соотношения для дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей

4 Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей.

8 Рекомендуемая литература

Бабер, А.И. Электрические измерения: учеб. пособие / А.И. Бабер, Е.Т. Харевская. - Минск: РИПО, 2019.

Нефедов В.И., Электрорадиоизмерения / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков, Е.В. Самохина. — М.: Издательство «Форум» Инфра-М, 2018.

Новикова Н.В., Электрические измерения. Лабораторный практикум / Н.В. Новикова, В.О. Афонько. Минск : РИПО, 2018.

Шишмарев, В.Ю. Электрорадиоизмерения: учеб. для средн. проф. образования/ Шишмарев, В.Ю., Шанин В.И. 3-е изд. - М.: Изд-во «Юрайт», 2019.