МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ О.Г. Локтионова
«_21_» _03_ 2024 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ RC-ЦЕПЕЙ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по электротехнике

Курск 2024

УДК 621.3 (076.1)

Составители: А. С. Романченко, И. А. Башмакова, Е. В. Павлов

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент *А. С. Чернышёв*

Исследование RC-цепей : методические указания по выполнению лабораторной работы по электротехнике для студентов технических специальностей и направлений подготовки / Юго-Зап. гос. ун-т ; сост.: А. С. Романченко, И. А. Башмакова, Е. В. Павлов. - Курск, 2024. - 14 с.: ил. 5, табл. 3. - Библиогр.: с. 14.

Методические указания содержат сведения по исследованию линейного пассивного четырехполюсника, представляющего собой простейшую *RC*-цепь. Указывается порядок выполнения лабораторной работы, правила оформления отчета. Лабораторная работа охватывает материал по следующим темам: четырехполюсники, частотно-зависимые цепи и электрические фильтры, передаточные функции и частотные характеристики.

Методические указания соответствуют требованиям рабочих программ дисциплин «Электротехника», «Электротехника и электроника», «Теоретические основы электротехники».

Предназначены для студентов технических специальностей и направлений подготовки при проведении лабораторных занятий.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать **21.03.2024.** Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. *0,8*. Уч.-изд.л. *0,7*. Тираж 50 экз. Заказ 181. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Снятие и построение амплитудно-частотной характеристики простейших интегрирующей и дифференцирующей RC-цепей.

1.2. Получение опыта работы с электронными измерительными приборами: электронным осциллографом и генератором звуковых частот – при измерении параметров *RC*-цепей.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. Изучить по конспекту лекций и рекомендованному учебнику разделы «Четырехполюсники», «Частотно-зависимые цепи и электрические фильтры», «Передаточные функции и частотные характеристики».

2.2. Освоить методику выполнения лабораторной работы по настоящим методическим указаниям.

2.3. Заготовить отчёт со схемами экспериментальной установки, таблицами для экспериментальных данных.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

При рассмотрении электрических и электронных цепей, как правило, можно выделить два вывода, на которые подается входной сигнал, и два вывода, с которых снимается выходной сигнал.

Четырехполюсником называется электрическая (электронная) цепь или электротехническое (электронное) устройство, имеющие две пары внешних выводов (полюсов, зажимов).

Выводы четырёхполюсника делятся на входные (вход) и выходные (выход). Четырёхполюсники могут быть классифицированы по различным признакам. По признаку линейности элементов, входящих в них, разделяют линейные и нелинейные ЧП. По схеме внутренних соединений различают четырёхполюсники мостовые и лестничные: Г-образные (рисунок 3.1), Т-образные, П-образные. По присутствию в них источника электроэнергии или его отсутствию различают активные и пассивные четырёхполюсники. Если замена входных зажимов на выходные при подаче входного сигнала не меняет выходного сигнала, то четырехполюсник будет симметричным; в противном случае будет несимметричный четырехполюсник.

Четырехполюсник часто используют как передаточное звено для различных сигналов и как схему замещения для различных электротехнических и электронных устройств.

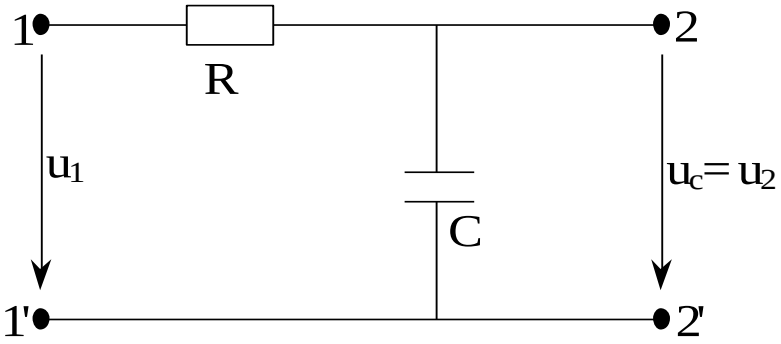


Рисунок 3.1 – *RC*-цепь как четырехполюсник

Схема четырехполюсника может состоять из различных элементов: как правило, это резисторы (активные сопротивления), индуктивности и емкости. Как известно, сопротивления индуктивных катушек и конденсаторов зависят от частоты: индуктивное сопротивление пропорционально частоте, а емкостное сопротивление обратно частоте. Поэтому характеристики четырехполюсника, составленного из этих элементов, зависят от частоты. В этом случае говорят о частотных характеристиках четырехполюсника.

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов, цепей, устройств и систем в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Зная частотную характеристику цепи, можно определить её реакцию на гармоническое воздействие любой частоты, а также на сумму гармонических воздействий различных частот. В последнем случае можно воспользоваться принципом суперпозиции. Это позволяет ограничиться изучением линейных систем только с одним входом. Частотные характеристики широко используются в теории цепей, радиотехнике, теории и практике автоматического управления, и их можно определить экспериментальным путём.

Если на зажимы 1-1′ цепи на рисунке 3.1 подано внешнее воздействие (входной сигнал – напряжение или ток) *x(t)*, а на зажимах 2-2′ наблюдаем отклик цепи (выходной сигнал – напряжение или ток) *y(t)*, то *комплексной частотной характеристикой (КЧХ) цепи называется отношение комплексных изображений отклика и воздействия:*

$$H(j\omega) = \frac{\underline{Y}_m}{\underline{X}_m} = \frac{\underline{Y}}{\underline{X}}, \qquad (3.1)$$

где $\underline{Y}_m$ и $\underline{Y} = \underline{Y}_m / \sqrt{2}$ – комплексные амплитуда и действующее значение реакции цепи; $\underline{X}_m$ и $\underline{X} = \underline{X}_m / \sqrt{2}$ – комплексные амплитуда и действующее значение внешнего воздействия.

Размерность КЧХ равна отношению размерностей отклика и внешнего воздействия. Она может иметь размерность сопротивления, проводимости или быть безразмерной. В общем виде

$$H(j\omega) = H(\omega)\exp[j\psi(\omega)] = H'(\omega) + jH''(\omega), \qquad (3.2)$$

где модуль $H(\omega)$ и фаза $\psi(\omega)$ или активная (вещественная) $H'(\omega)$ и реактивная (мнимая) $H''(\omega)$ составляющие являются функциями вещественной частоты и могут быть изображены в виде графиков. Эти функции называются *частотными характеристиками цепи. Зависимость модуля КЧХ от частоты называют амплитудной, а зависимость фазы КЧХ от частоты – фазовой частотными характеристиками (соответственно АЧХ и ФЧХ).* Следовательно, КЧХ сочетает в себе АЧХ и ФЧХ.

При графическом представлении КЧХ цепи обычно строят либо отдельно АЧХ и ФЧХ, либо изображают вещественную и мнимую частотные характеристики.

КЧХ делятся на входные и передаточные. Если отклик и внешнее воздействие рассматриваются на одних и тех же зажимах цепи, то КЧХ называется входной. Если отклик и внешнее воздействие задаются на разных зажимах, то КЧХ называется передаточной. Различают два вида входных и четыре вида передаточных характеристик, среди которых чаще всего используют:

- комплексное входное сопротивление:

$$H_{11}(j\omega) = Z_{11}(j\omega) = \underline{U}_1/\underline{I}_1;$$

- комплексный коэффициент передачи по напряжению:

$$K_{21}(j\omega) = \underline{U}_2 / \underline{U}_1.$$

Вид КЧХ будет зависеть не только от структуры цепи, но и от нагрузки. Поэтому часто рассматриваются частотные характеристики для режимов холостого хода и короткого замыкания. В частности, для *RC*-цепи на рисунке 3.1 при холостом ходе на выходных зажимах 2-2' (I_2=0) комплексное входное сопротивление равно:

$$Z_{1x}(j\omega) = \underline{U}_1 / \underline{I}_1 = R - j\frac{1}{\omega C}. \qquad (3.3)$$

Комплексный коэффициент передачи по напряжению *RC*-цепи на рисунке 3.1 при холостом ходе на выходных зажимах 2-2' равен:

$$K_{21}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{2x}}{\underline{U}_{1x}} = \frac{\underline{I}_{1x} \cdot 1/j\omega C}{\underline{U}_{1x}} = \frac{\underline{I}_{1x} \cdot 1/j\omega C}{\underline{I}_{1x}(R + 1/j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega CR}. \qquad (3.4)$$

При этом АЧХ данного коэффициента определяется выражением (с учетом $\omega = 2\pi f$):

$$K_{21}(f) = \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi fCR)^2}}. \qquad (3.5)$$

Так как четырехполюсник часто используют как передаточное звено, то, как правило, говоря об АЧХ цепи в виде четырехполюсника, имеют в виду АЧХ коэффициента передачи по напряжению.

К линейным электрическим цепям, являющимся передаточным звеном, относят частотно-избирательные цепи, называемые электрическими фильтрами, которые служат для выделения полезных сигналов на фоне различных помех и используются при обработке информации.

Электрический фильтр – это четырёхполюсник, пропускающий некоторую полосу частот с малым затуханием (ослаблением); вне этой полосы частот затухание велико.

Полоса частот, в которой ослабление мало, называется полосой пропускания фильтра. Полоса частот, в которой ослабление велико, называется полосой задерживания (затухания) фильтра. Между этими полосами находится переходная область. *Граничную частоту ω_c (или f_c) между полосой пропускания и полосой задерживания называют частотой среза.*

По расположению полосы пропускания на шкале частот различают следующие виды фильтров:

- фильтры нижних частот (ФНЧ), пропускающие сигналы в частотном диапазоне $0 < \omega < \omega_c$;
- фильтры верхних частот (ФВЧ), пропускающие сигналы в частотном диапазоне $\omega_c < \omega < \infty$;
- полосовые фильтры, пропускающие сигналы в частотном диапазоне $\omega_{c1} < \omega < \omega_{c2}$;
- заграждающие (режекторные) фильтры, пропускающие сигналы в частотном диапазоне $0 < \omega < \omega_{c1}$, $\omega_{c2} < \omega < \infty$, где $\omega_{c2} > \omega_{c1}$.

Простейшая электрическая цепь, состоящая из резистора и конденсатора, может создавать на выходе несинусоидальное напря-

жение, значительно отличающееся от входного несинусоидального напряжения. При определённых соотношениях R и C выходное напряжение может быть пропорционально производной по времени от входного напряжения. Действительно, для цепи на рисунке 3.2 запишем уравнение:

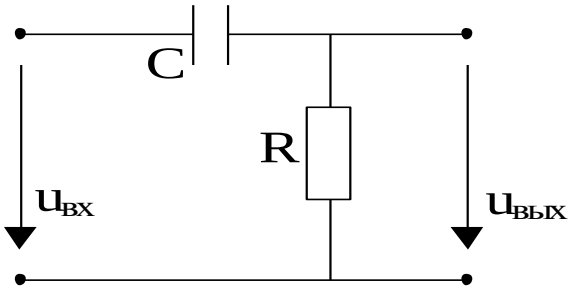


Рисунок 3.2 – Дифференцирующая *RC*-цепь

$$u_C + Ri = u_{\text{вх}}\,.$$

$$u_C + R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} = u_{\text{вх}}\,.$$

Если $\tau = RC << T$, где T – период несинусоидального входного напряжения $u_{\text{вх}}$, то:

$$u_{\text{вых}} = Ri = RC\frac{du}{dt} << u_C\,,$$

т.е. $u_C \approx u_{\text{вх}}$. Тогда ток в цепи и выходное напряжение равны:

$$i = C\frac{du_C}{dt} \approx C\frac{du_{\text{вх}}}{dt}\,,\;\; u_{\text{вых}} = Ri \approx RC\frac{du_{\text{вх}}}{dt}\,. \qquad (3.6)$$

Степень точности, с которой выполняется это равенство, зависит от соотношения параметров дифференцирующей цепи на рисунке 3.2. Чем точнее RC-цепь производит дифференцирование, тем меньше получается напряжение на выходе цепи. Изменение формы сигнала тем больше, чем меньше постоянная времени цепи $\tau=RC$. Дифференцирующую цепь можно рассматривать как фильтр, пропускающий высокочастотные составляющие сигнала и подавляющий низкочастотные составляющие, т.е. как ФВЧ.

Если поменять местами элементы в схеме на рисунке 3.2, то получим интегрирующую цепь (рисунок 3.1).

В частности, в цепи на рисунке 3.1 для выполнения равенства

$$u_{\text{вых}} \approx k\int u_{\text{вх}}dt$$

необходимо, чтобы $\tau=RC>>T$, где T – период входного напряжения. При этом основное падение напряжения будет на резисторе R, а вы-

ходное напряжение окажется малым. Поэтому $Ri \approx u_{вх}$ или $i \approx \frac{u_{вх}}{R}$, следовательно:

$$u_{вых} = \frac{1}{C}\int idt \approx \frac{1}{RC}\int u_{вх} dt . \qquad (3.7)$$

Таким образом, при достаточно большой постоянной времени $\tau = RC$ выходное напряжение будет почти пропорционально интегралу от входного напряжения. Чем больше постоянная времени, тем сильнее форма выходного сигнала отличается от формы входного сигнала.

АЧХ коэффициента передачи по напряжению *RC*-цепи на рисунке 3.2 при холостом ходе на выходных зажимах будет определяться формулой:

$$K_{21}(f) = 2\pi fCR\sqrt{\frac{1}{1+(2\pi fCR)^2}} . \qquad (3.8)$$

Схемы на рисунке 3.1 и рисунке 3.2 используются для изменения формы подводимого сигнала.

Интегрирующую цепь можно также рассматривать как фильтр, пропускающий низкочастотные составляющие сигнала и подавляющий составляющие более высоких частот, т.е. как ФНЧ.

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

При выполнении лабораторной работы используются генератор Г3-33 и осциллограф С1-70. Для формирования исследуемого четырехполюсника (интегрирующей и дифференцирующей *RC*-цепей) используются конденсатор емкостью 0,022 мкФ и постоянный резистор с сопротивлением 1,5 кОм.

Осциллограф – электронный прибор, предназначенный для отображения на экране формы сигналов: тока, напряжения – в функции времени.

Развертка электрических сигналов во времени осуществляется благодаря наличию в трубке осциллографа отклоняющих пластин. На горизонтальные отклоняющие пластины подают пилообразное напряжение развертки, а на вертикальные – исследуемый сигнал. В результате на экране появляется «картинка», показывающая изменение амплитуды сигнала во времени.

При равенстве частоты развертки и частоты сигнала на экране появляется один период колебания. При неравенстве этих частот число периодов, отображаемых на экране, определяется их отношением.

Для управления параметрами изображения «картинки» осциллограф содержит органы управления: регулятор чувствительности (амплитуды) сигнала и регулятор частоты развертки. Позиции регулятора чувствительности маркированы показателями, имеющими размерность «В/дел». Например, если размах сигнала по оси «Y» укладывается в три деления, а ручка чувствительности стоит на 0,5 В/дел, то амплитуда сигнала равна: 0,5×3=1,5 В.

Позиции регулятора частоты развертки имеют размерность *t*/дел, при этом время *t* приводится в «с» (секундах), «мс» (миллисекундах), «мкс» (микросекундах), отражающих длительность периода сигнала.

Для перевода длительности периода в частоту и наоборот используют формулу $f=1/T$, где f – частота колебаний сигнала, а T – длительность одного колебания (период). Если частота выражена в герцах, то длительность получает размерность секунд; если частота в кГц, то длительность измеряется в миллисекундах (мс); если частота в мегагерцах (МГц), то длительность – в микросекундах (мкс). Например, периоду в 50 мс соответствует частота: 1/0,05=20 Гц.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Перед выполнением измерений определить область частот (разную для дифференцирующей и интегрирующей цепей), где коэффициент передачи четырехполюсника, как отношение его выходного напряжения к входному напряжению (к напряжению на выходе генератора), максимален и равен 1. Установить ручками регулятора чувствительности «В/дел» и регулятора частоты развертки «Время/дел» осциллографа в этой области частот такое значение выходного напряжения генератора, при котором полный размах колебания на экране составляет 5 больших делений.

Для экспериментального определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) изменять частоту f выходного напряжения генератора дискретно и равномерно в логарифмическом масштабе, т.е. увеличивая или уменьшая в одинаковое число раз, например, в 2

раза (октавами): ...250, 500, 1000 (Гц), и измеряя на каждой частоте размах колебания по вертикали.

5.2. Снять АЧХ интегрирующей *RC*-цепи. Для этого:

1) подключить к выходу генератора Г3-33 интегрирующую *RC*-цепь и вход синхронизации осциллографа, как показано на рисунке 5.1;

2) установить режим внешней синхронизации осциллографа;

3) дискретно меняя частоту выходного сигнала генератора $f_Г$ и попеременно подключая вход осциллографа к выходу генератора и к выходу *RC*-цепи, измерить для каждой частоты амплитуду напряжения на конденсаторе U_C и амплитуду выходного напряжения генератора $U_Г$. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

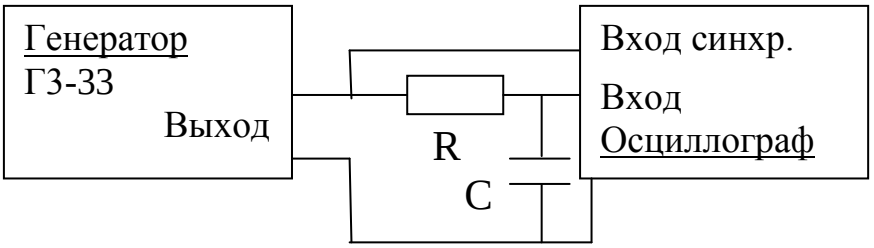


Рисунок 5.1 – Схема для исследования интегрирующей *RC*-цепи

Таблица 5.1 – Данные для построения АЧХ интегрирующей *RC*-цепи

Частота $f_Г$, Гц	100	1000	2000	4000	8000
U_C, В					
$U_Г$, В					
$K = U_C / U_Г$					

5.3. Определить «частоту среза» $F_{0,71}$ АЧХ интегрирующей *RC*-цепи, при которой коэффициент передачи по напряжению K равен 0,71, и произвести измерение сдвига фазы φ сигнала в *RC*-цепи на этой частоте. Для этого необходимо в режиме внешней синхронизации осциллографа вначале получить на экране изображение 1,5...2 периодов выходного напряжения генератора, а затем переключить вход осциллографа на выход *RC*-цепи и измерить сдвиг этих сигналов во времени. Сдвиг по фазе определяется (см. рисунок 5.2) пропорциональным соотношением

$$\varphi=(\Delta T/T)\cdot 360^0,$$

где T – период колебания, ΔT – сдвиг по времени.

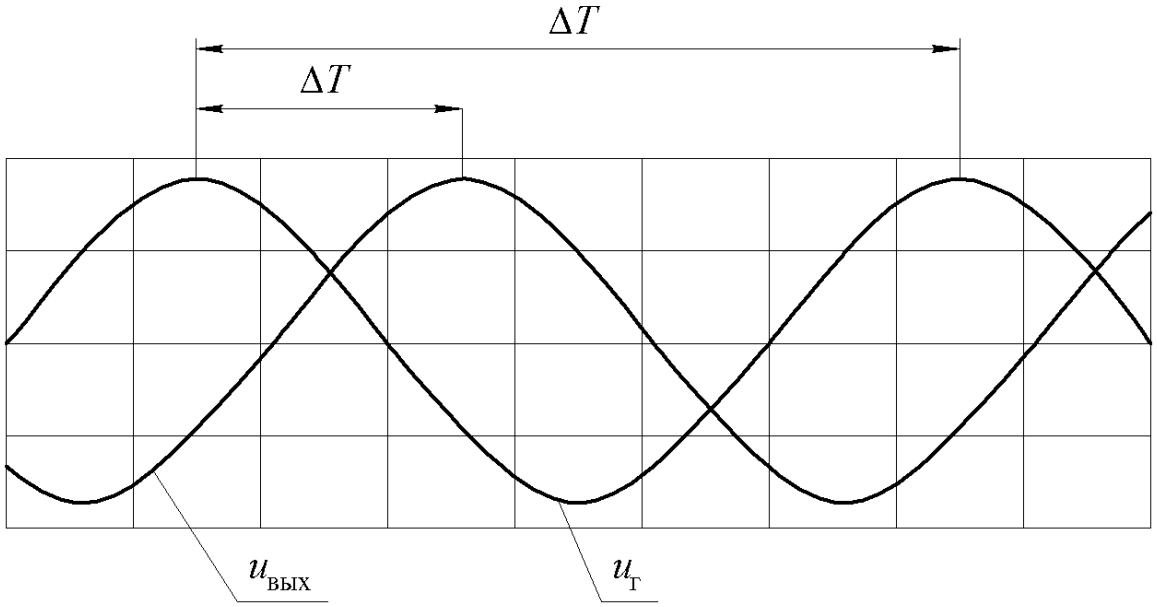


Рисунок 5.2 – Измерение сдвига фаз

Записать в отчет результат измерения сдвига фазы φ сигнала и отметить направление сдвига: задержка или опережение. При задержке сигнала φ<0, при опережении φ>0.

5.4. Снять АЧХ дифференцирующей *RC*-цепи. Для этого:

1) подключить к выходу генератора Г3-33 дифференцирующую *RC*-цепь и вход синхронизации осциллографа, как показано на рисунке 5.3;

2) установить режим внешней синхронизации осциллографа;

3) дискретно меняя частоту выходного сигнала генератора $f_Г$ и попеременно подключая вход осциллографа к выходу генератора и к выходу *RC*-цепи, измерить для каждой частоты амплитуду напряжения на резисторе U_R и амплитуду выходного напряжения генератора $U_Г$. Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

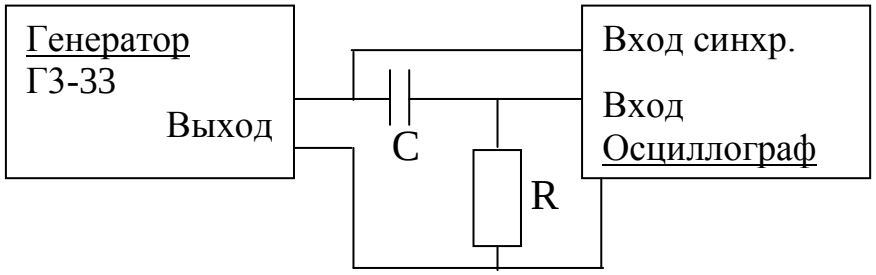


Рисунок 5.3 – Схема для исследования дифференцирующей *RC*-цепи

5.5. Определить «частоту среза» $F_{0,71}$ АЧХ дифференцирующей *RC*-цепи, при которой коэффициент передачи по напряжению *K* равен 0,71, и произвести измерение сдвига фазы φ сигнала в *RC*-цепи на этой частоте так, как указано в п. 5.3.

Записать в отчет результат измерения сдвига фазы φ сигнала и отметить направление сдвига: задержка или опережение. При задержке сигнала $\varphi<0$, при опережении $\varphi>0$.

Таблица 5.2 – Данные для построения АЧХ дифференцирующей *RC*-цепи

Частота $f_Г$, Гц	100	1000	2000	4000	8000
U_R, В					
$U_Г$, В					
$K = U_R / U_Г$					

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. По полученным экспериментальным данным подсчитать значения модуля коэффициента передачи *K*:

- для интегрирующей *RC*-цепи по формуле $K = U_C/U_Г$;
- для дифференцирующей *RC*-цепи по формуле $K = U_R/U_Г$

и внести их соответственно в таблицы 5.1 и 5.2.

6.2. На основании данных таблиц 5.1 и 5.2 построить отдельно амплитудно-частотные характеристики интегрирующей *RC*-цепи и дифференцирующей *RC*-цепи как зависимость коэффициента передачи *K* от частоты *f* (значения частоты *f* откладываются по горизонтальной оси, значения коэффициента передачи *K* откладываются по вертикальной оси). При построении графиков АЧХ точки следует располагать на частотной оси равномерно, через одинаковые промежутки.

На построенных графиках отметить «частоты среза» АЧХ, для которых коэффициент передачи *K* снижается до уровня 0,71.

6.3. Под таблицами 5.1 и 5.2 записать результат измерения сдвига фазы φ сигнала для интегрирующей и дифференцирующей *RC*-цепей и отметить направление сдвига: задержка или опережение.

6.4. Рассчитать для значений частоты, использованных при эксперименте, теоретические АЧХ интегрирующей *RC*-цепи по формуле (3.5) и дифференцирующей *RC*-цепи по формуле (3.8) при *C*=0,022 мкФ и *R*=1,5 кОм и занести результаты расчета в таблицу 6.1.

По результатам таблицы 6.1 построить расчетные АЧХ, совместив их с графиками экспериментальных АЧХ интегрирующей и дифференцирующей *RC*-цепей в одной системе координат.

Таблица 6.1 – Данные для построения расчетных АЧХ интегрирующей и дифференцирующей *RC*-цепей

Частота $f_Г$, Гц	100	1000	2000	4000	8000
$K_{инт}$					
$K_{диф}$					

6.5. Отчет должен содержать:

а) название и цель работы;

б) порядок проведения исследований;

в) схемы для исследования *RC*-цепей;

г) таблицы с экспериментальными и расчетными данными;

д) графики АЧХ, построенные по экспериментальным и расчетным данным;

е) выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Назначение и основные узлы электронного осциллографа.

2 Как устанавливается необходимый размах амплитуды сигнала на экране осциллографа?

3 Как устанавливается необходимая скорость горизонтальной развертки?

4 Виды синхронизации, применяемые при измерениях с помощью осциллографа.

5 Как выполняются амплитудные измерения сигналов осциллографом?

6 Как выполняются измерения временных параметров сигналов с помощью осциллографа?

7 Как и при каких условиях определяется коэффициент передачи четырехполюсника?

8 Что такое АЧХ электрической схемы?

9 Объяснить вид АЧХ интегрирующей и дифференцирующей цепей.

10 Как зависит от частоты сопротивление конденсатора?

11 Почему интегрирующую *RC*-цепь можно использовать как фильтр нижних частот?

12 Почему дифференцирующую *RC*-цепь можно использовать как фильтр верхних частот?

13 Что такое полоса пропускания электрического фильтра? Показать полосу пропускания на построенных АЧХ интегрирующей и дифференцирующей цепей.

14 Почему интегрирующую *RC*-цепь называют интегрирующей и при каком условии?

15 Почему дифференцирующую *RC*-цепь называют дифференцирующей и при каком условии?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. - Текст : непосредственный.

2 Бакалов, В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 1989. – 528 с. - Текст : непосредственный.

3 Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. - Текст : непосредственный.

4 Кореневский, Н. А. Общая электротехника : учебное пособие / Н. А. Кореневский, И. С. Некрасов, А. С. Романченко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Курский государственный технический университет. – Курск : КГТУ, 2005. – 291 с. - Текст : непосредственный.