

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
«Севастопольский государственный университет»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы №1
по дисциплине «Электроника»

для студентов очной и очно-заочной форм обучения, обучающихся по
направлению 09.03.02 Информационные системы и технологии

Севастополь
2015

УДК 621.3.01

Исследование линейных электрических цепей. Методические указания к выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине «Электроника»/ Сост. И.В. Кудрявченко. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. – 45с.

Целью методических указаний является обеспечение наглядного изучения принципов функционирования электрических цепей первого и второго порядков с источниками синусоидального тока (напряжения), а так же приобретение студентами практических навыков исследования простейших электрических цепей и их моделей.

На выполнение работы отводится 8 часов, из них 4 часа СРС

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 09.03.02 очной и очно-заочной форм обучения

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры информационных систем (протокол №1 от 31 августа 2015 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевГУ в качестве методических указаний

Рецензент: Карлусов В.Ю., к.т.н., доцент кафедры информационных систем

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы.....	3
2 Краткие теоретические сведения.....	3
3 Описание лабораторной установки.....	25
4 Порядок выполнения экспериментальных исследований.....	26
5 Порядок выполнения теоретических расчетов.....	31
6 Содержание отчета о выполнении лабораторной работы.....	33
7 Контрольные вопросы.....	33
Библиографический список.....	34
Приложение А. Краткие сведения о программе CircuitMaker.....	34
Приложение Б. Уравнения АЧХ, ФЧХ и частот среза ЭЦ.....	41
Приложение В. Параметры элементов блока нагрузок.....	43
Приложение Г. Преобразования Лапласа.....	44
Приложение Д. Уравнения переходных характеристик ЭЦ.....	45

© И.В. Кудрявченко, 2015

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – синтезировать и исследовать линейные RC-цепи заданной конфигурации; построить их амплитудно-частотные, фазо-частотные и переходные характеристики; сравнить результаты расчета и эксперимента; изучить явление резонанса токов и напряжений в RLC-цепях.

2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Линейные электрические цепи и элементы

В электронных устройствах автоматизированных систем обработки информации применяются электрические цепи, содержащие резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Если сопротивления, емкости и индуктивности перечисленных элементов не зависят от токов и напряжений, то такие элементы называются *линейными*, а их вольтамперные, вольткулонные и веберамперные характеристики изображаются прямыми линиями (рисунок 1).

Электрические цепи, содержащие только линейные элементы, называются *линейными цепями*. Процессы, происходящие в линейных цепях описываются линейными алгебраическими и дифференциальными уравнениями, составленными на основе законов Кирхгофа и Ома.

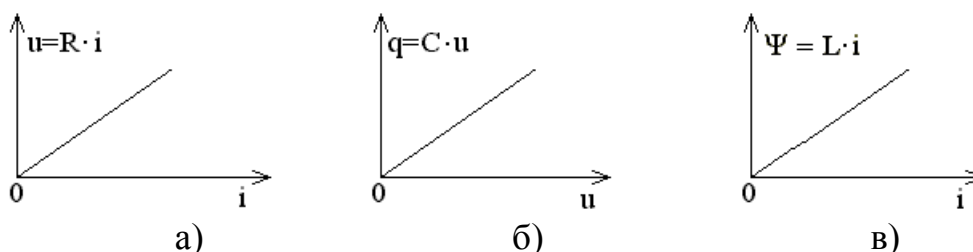


Рисунок 1 – Характеристики линейных элементов: резистора (а); конденсатора (б) и катушки индуктивности (в)

На рисунке 1 применены следующие обозначения:

- u – падение напряжения на сопротивлении или напряжение на обкладках конденсатора, В;
- i – ток, протекающий через сопротивление или индуктивность, А;
- R – сопротивление резистора, Ом;
- q – заряд конденсатора, Кл;
- C – емкость конденсатора, Ф;
- Ψ – потокосцепление катушки индуктивности, Вб;
- L – индуктивность катушки индуктивности, Гн.

Линейные элементы в электрических цепях обеспечивают:

- необходимые амплитудные значения постоянных и переменных токов и напряжений;
- коррекцию формы электрических сигналов;
- разделение цепей преобразования электрических сигналов;

- рабочие режимы электронных ламп, диодов, транзисторов, интегральных микросхем;
- каскадное соединение нелинейных элементов, а также соединение нелинейного элемента с источником сигнала или нагрузкой;
- частотную избирательность сигналов.

Примечание. *Электрическими сигналами* обычно называют токи или напряжения, которые позволяют однозначно отображать информацию об исследуемых объектах. В качестве простейших *тестовых* сигналов для исследования электрических цепей применяются гармонические (синусоидальные) токи и напряжения.

2.2 Математическое представление гармонических сигналов

В электронике и электротехнике широко применяются гармонические (синусоидальные) сигналы, которые математически могут быть представлены в тригонометрической, комплексной форме или с помощью временных и векторных диаграмм.

Запишем синусоидальные функции для ЭДС, напряжения и тока:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad (1a)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1б)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1в)$$

где e, u, i – *мгновенные* значения ЭДС, напряжения и тока;

E_m, U_m, I_m – наибольшие значения функций (1), называемые *амплитудами*;

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ – *угловая частота*;

$f = \frac{1}{T}$ – *частота* ЭДС, напряжения или тока;

T – *период* колебаний;

ψ_e, ψ_u, ψ_i – *начальная фаза* ЭДС, напряжения и тока.

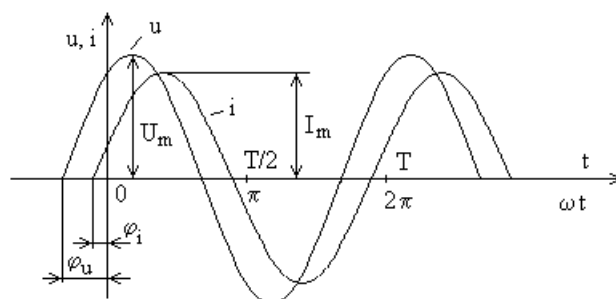


Рисунок 2 – Временные диаграммы для синусоидальных напряжения и тока

На рисунке 2 изображены синусоидальное напряжение и ток с одним и тем же периодом T . Отметим, что положительные значения фазы $\psi_u > 0$ и $\psi_i > 0$ откладывают от начала координат влево. По оси абсцисс

откладывают время t , или пропорциональную ему угловую величину ωt – «набег фазы».

Действующие значения гармонических сигналов. Для сравнения ЭДС, напряжений и токов, изменяющихся по периодическому закону, кроме амплитудных применяют *действующие значения*, обозначаемые соответственно символами E , U и I :

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} ; \quad (2a)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} ; \quad (2б)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} . \quad (2в)$$

Связь действующего значения синусоидальной ЭДС с ее амплитудой получают подстановкой (1а) в (2а):

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_e) dt} = E_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t + 2\psi_e)}{2} dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} . \quad (3a)$$

По аналогии с формулой (3а) записывают действующие значения для синусоидальных напряжения и тока:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} ; \quad (3б)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} . \quad (3в)$$

Отметим, что значительная часть приборов, используемых для измерения периодических напряжений и токов, показывает действующие значения этих величин.

Векторные диаграммы. Гармонические ЭДС, напряжения и токи, имеющие угловую частоту ω , принято изображать вращающимися с угловой скоростью ω векторами, длины которых в соответствующем масштабе равны амплитудным, либо действующим значениям ЭДС, напряжения или тока. На рисунке 3а синусоидальная ЭДС изображена с помощью вращающегося вектора: $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$. Если угол $(\omega t + \psi)$ отсчитывается от горизонтальной оси, то проекция вращающегося вектора на вертикальную ось в избранном масштабе равна мгновенному значению ЭДС.

Пусть ЭДС e , равна сумме ЭДС e_1 и e_2 одной и той же частоты:

$$e = e_1 + e_2 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2) = E_m \sin(\omega t + \psi) . \quad (4)$$

Такую ЭДС представляют как сумму двух вращающихся векторов (рисунок 3б).

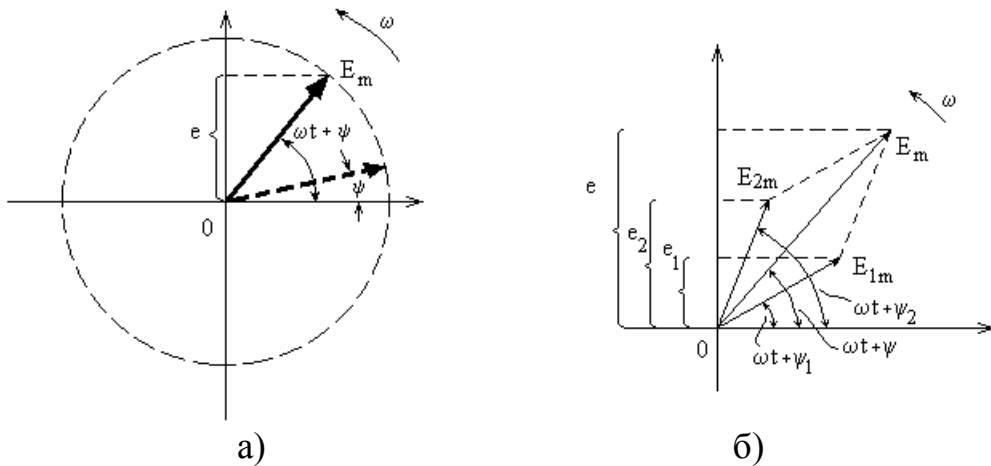


Рисунок 3 – Изображение синусоидальных ЭДС:

а) вращающийся вектор; б) сумма вращающихся векторов

Совокупность векторов, характеризующих процессы, происходящие в линейной цепи переменного тока, и построенных с соблюдением правильной ориентации их друг относительно друга, называют *векторной диаграммой*. Обычно на векторной диаграмме длину векторов выбирают равной действующим значениям ЭДС, токов и напряжений.

Метод комплексных амплитуд. При расчете электрических цепей в установившемся режиме применяется метод, основанный на изображении гармонических функций времени комплексными числами. Этот метод называется *символическим* или методом *комплексных амплитуд*.

Из рисунка 3 следует, что между мгновенным значением ЭДС, которая является действительной синусоидальной функцией (действительную синусоидальную функцию иначе называют *оригиналом*) и изображающим вектором можно установить взаимно однозначное соответствие. Если принять, что ось абсцисс является осью действительных величин на комплексной плоскости, а ось ординат – мнимых, то каждый из рассмотренных векторов соответствует определенному комплексному числу. Модуль комплексного числа равен действующему значению (либо амплитуде), а аргумент – фазе ЭДС. Те же рассуждения справедливы для синусоидальных напряжения и тока.

Таким образом, для перехода от оригинала к изображающей комплексной величине необходимо модуль и фазу комплексной величины взять равным амплитуде (действующему значению) и фазе синусоидальной функции. Для обратного перехода от комплексного числа, изображающего действительную функцию, к самой действительной функции, необходимо взять мнимую часть комплексного числа.

Математически этот переход (например, для тока i) записывается следующим образом

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \doteq I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = \dot{I}_m e^{j\omega t}, \quad (5)$$

где $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$ – комплексная амплитуда тока;

$\doteq$ – знак соответствия.

Основанием для применения метода комплексных амплитуд к расчету линейных электрических цепей с источниками синусоидальных ЭДС и токов является принцип суперпозиции. Отклик цепи на «экспоненциальное» периодическое воздействие, стоящее в правой части (5) равен сумме откликов на суммарное воздействие, обозначаемое $I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Мнимая единица j выполняет роль маркера, позволяющего после произведенных вычислений разделить отклики линейной электрической цепи на синусоидальное и косинусоидальное периодические воздействия. Преимуществом символического метода является упрощение расчетов с изображающими комплексными величинами по сравнению с расчетами над синусоидальными величинами. То есть, с помощью *комплексных* чисел облегчается нахождение связей между *действительными* величинами.

Примечание – *принцип суперпозиции* для линейных электрических цепей формулируется следующим образом: ток в любой ветви равен алгебраической сумме частичных токов в этой ветви при действии каждого источника в отдельности. При этом остальные источники заменяются их внутренними сопротивлениями. В механике принцип суперпозиции именуется принципом *независимого действия сил*, согласно которому движение тела под действием нескольких сил можно рассматривать как результат сложения движений, вызываемых каждой силой в отдельности.

2.3 Линейные четырехполюсники

Четырехполюсником (ЧП) принято называть любую сколь угодно сложную электрическую цепь, рассматриваемую относительно входной и выходной пар своих полюсов (контактов). На рисунке 4 ЧП изображен в виде прямоугольника с контактами 1-1' (первичными) и 2-2' (вторичными). Входные ток и напряжение обозначены $\dot{I}_1$, $\dot{U}_1$, выходные ток и напряжение – $\dot{I}_2$ и $\dot{U}_2$. Предполагается, что в процессе работы ЧП схема внутренних соединений и ее сопротивления остаются неизменными.

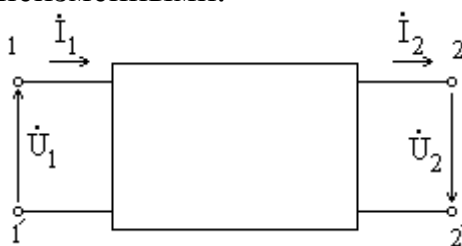


Рисунок 4 – Обобщенная схема линейного четырехполюсника

Комплексный коэффициент передачи (ККП). Одной из основных характеристик электрической цепи является ее ККП (или передаточная комплексная функция). ККП цепи характеризует ее реакцию на внешнее гармоническое воздействие и определяется как отношение комплексных значений выходной и входной величин. Обычно применяют ККП по напряжению $\dot{K}_U(j\omega)$ и току $\dot{K}_I(j\omega)$:

$$\dot{K}_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2(j\omega)}{\dot{U}_1(j\omega)} ; \quad \dot{K}_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_2(j\omega)}{\dot{I}_1(j\omega)} . \quad (6)$$

ККП цепи также можно представить в экспоненциальной форме:

$$\dot{K}(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7)$$

где $K(\omega)$ – модуль ККП;

$\varphi(\omega)$ – аргумент (фаза) ККП.

Определения

1. *Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* – зависимость модуля ККП электрической цепи от частоты.
2. *Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)* – зависимость аргумента ККП электрической цепи от частоты.
3. *Частотные электрические фильтры* – четырехполюсники, имеющие резко выраженную избирательность для отдельных частот или полос частот.

Различают фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ) полосовые (ПФ) и режекторные или заграждающие фильтры (РФ). На рисунке 5 изображены АЧХ идеальных фильтров.

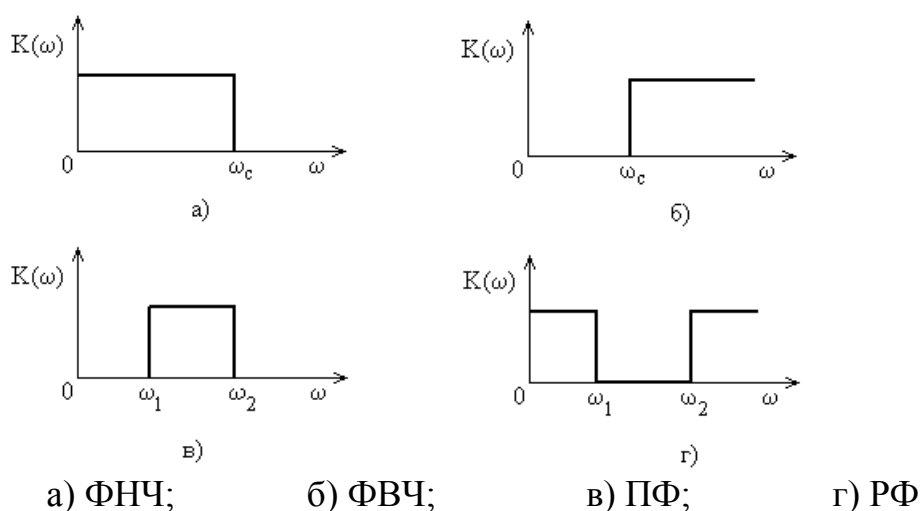


Рисунок 5 – АЧХ идеальных фильтров

Полосы пропускания электрических фильтров находятся в следующих пределах:

ФНЧ: от $\omega = 0$

ПФ: от $\omega = \omega_1$ до $\omega = \omega_2$;

до $\omega = \omega_c$;

ФВЧ: от $\omega = \omega_c$; до

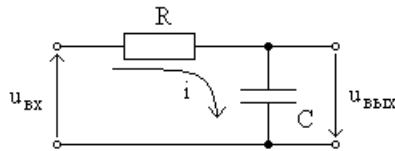
РФ: от 0 до $\omega = \omega_1$ и от $\omega = \omega_2$ до $\omega = \infty$.

$\omega = \infty$;

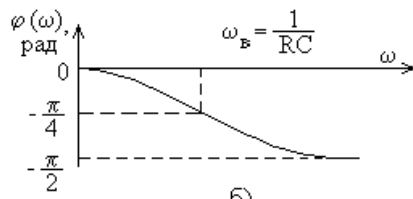
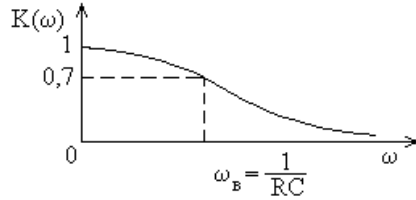
где ω_c частота среза или граничная частота фильтра;

ω_1 – нижняя граничная частота; ω_2 – верхняя граничная частота.

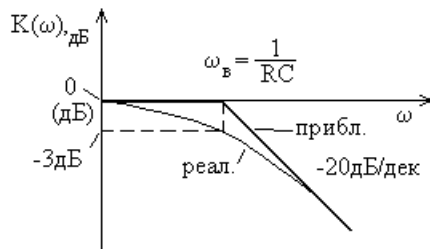
На рисунках 6 и 7 изображены RC-фильтры и их характеристики (АЧХ, ФЧХ и логарифмическая АЧХ – ЛАЧХ).



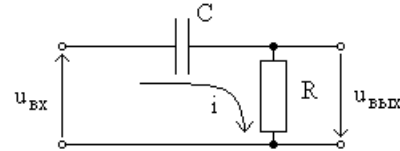
а)



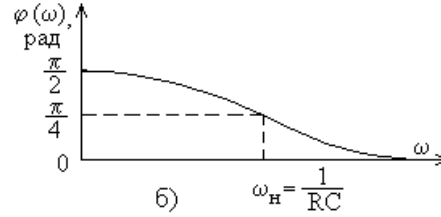
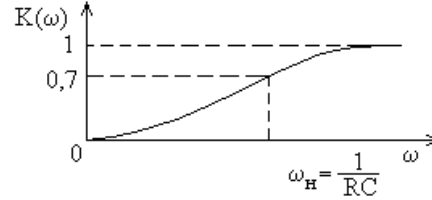
б)



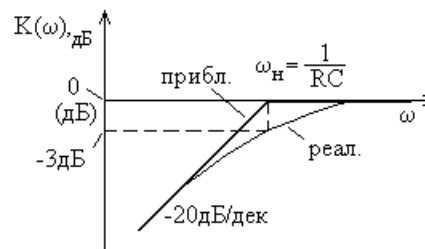
в)



а)



б)



в)

- а) схема ФНЧ;
б) АЧХ и ФЧХ;
в) ЛАЧХ

Рисунок 6 – ФНЧ и его характеристики

- а) схема ФВЧ;
б) АЧХ и ФЧХ;
в) ЛАЧХ

Рисунок 7 – ФВЧ и его характеристики

АЧХ и ФЧХ на рисунках 6б и 7б построены по формулам (8) – (13), а ЛАЧХ на рисунках 6в и 7в – по формулам (14), (9) и (14), (12):

ФНЧ:
$$K(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}; \quad (8)$$

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad (9)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega RC). \quad (10)$$

ФВЧ:
$$K(j\omega) = \frac{\omega RC}{\omega RC - j}; \quad (11)$$

$$K(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}}; \quad (12)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega RC} ; \quad (13)$$

$$K(\omega)_{\text{дБ}} = 20 \lg K(\omega) . \quad (14)$$

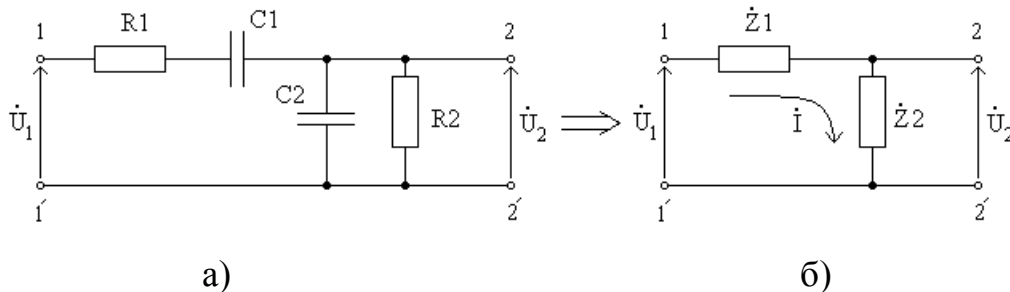
На рисунках 6 и 7 используются следующие сокращения:

- дек. – декада (интервал частот у которого отношение верхнего граничного значения к нижнему равно десяти);
- пригл. – приближенный;
- реал. – реальный.

Отметим, что оси частот на рисунках 6в и 7в размечены в логарифмическом масштабе.

2.4 Методика расчета АЧХ и ФЧХ электрической цепи

Представим электрическую цепь, изображенную на рисунке 8а, в виде эквивалентного делителя напряжения (рисунок 8б).



а) исходная электрическая цепь;

б) эквивалентный делитель напряжения

Рисунок 8 – Преобразование электрической цепи

Из формулы (6) и закона Ома следует:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2(j\omega)}{\dot{U}_1(j\omega)} = \frac{\dot{I} \cdot \dot{Z}2}{\dot{I} \cdot (\dot{Z}1 + \dot{Z}2)} = \frac{\dot{Z}2}{\dot{Z}1 + \dot{Z}2} , \quad (15)$$

где $\dot{Z}1 = R1 + \frac{1}{j\omega C1}$ и $\dot{Z}2 = \frac{R2 / j\omega C2}{R2 + 1 / j\omega C2}$.

Подставим $\dot{Z}1$ и $\dot{Z}2$ в уравнение (15)

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{1}{1 + R1/R2 + C2/C1 + j[\omega C2 \cdot R1 - 1/(\omega C1 \cdot R2)]} \quad (16)$$

и упростим формулу (16). Для этого произведем замену $A = 1 + R1/R2 + C2/C1$ и $B = \omega C2 \cdot R1 / A - 1/(\omega C1 \cdot R2 \cdot A)$. В результате получим выражение:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{1}{A(1 + jB)} . \quad (17)$$

Из (17) следуют формулы для нахождения АЧХ и ФЧХ цепи:

$$K(\omega) = \frac{1}{A\sqrt{1+B^2}} , \quad (18)$$

$$\varphi(\omega) = - \arctg B . \quad (19)$$

Частоту квазирезонанса находим из условия $B=0$:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R1C1 \cdot R2C2}} . \quad (20)$$

Примечание – quasi (лат.) – вроде, как будто.

2.5 Последовательный и параллельный колебательные контуры

Элементы линейных RLC-цепей могут образовывать последовательный (рисунок 9а) и параллельный (рисунок 9б) колебательные контуры.

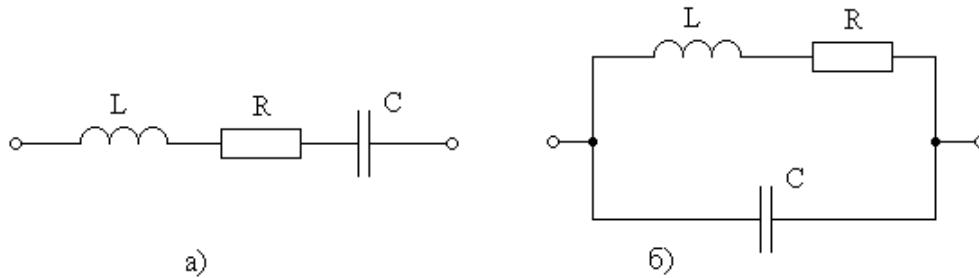


Рисунок 9 – Последовательный (а) и параллельный (б) колебательные контуры

Последовательный колебательный контур. Резонанс в последовательном колебательном контуре наступает при условии, что реактивное сопротивление контура x равно нулю: $x = x_L - x_C = 0$. Тогда

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} . \quad (21)$$

Резонанс в рассматриваемой цепи называют *резонансом напряжений*, так как при $x_L = x_C$ значения напряжений на индуктивности и емкости равны и противоположны по фазе. Из (21) определяется значение угловой частоты, при которой наступает резонанс

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} , \quad (22)$$

где ω_0 – *резонансная угловая частота* (ее размерность – радиан в секунду). Соответственно *резонансная частота* f_0 , имеющая размерность c^{-1} или герц (сокращенное обозначение Гц), определяется по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} . \quad (23)$$

Индуктивное и емкостное сопротивления контура при резонансе равны *характеристическому сопротивлению* контура ρ :

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho . \quad (24)$$

Отношение напряжения U_L на индуктивном или U_C на емкостном элементах к напряжению питания U при резонансе обозначают буквой Q и называют *добротностью* контура или коэффициентом резонанса

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho I}{RI} = \frac{\rho}{R} = Q , \quad (25)$$

где R – активное сопротивление контура (например, активное сопротивление индуктивной катушки), причем $Q > 1$, если $\rho > R$.

Добротность контура показывает, во сколько раз напряжение на индуктивном (или емкостном) элементе при резонансе больше, чем напряжение на входных выводах. С другой стороны, добротность колебательного контура характеризует отношение реактивной энергии, запасенной в индуктивности L и емкости C (то есть суммарной энергии электрического и магнитного полей) к энергии, рассеиваемой на активном сопротивлении R .

Обычно добротности колебательных контуров имеют значения от десятков до сотен единиц.

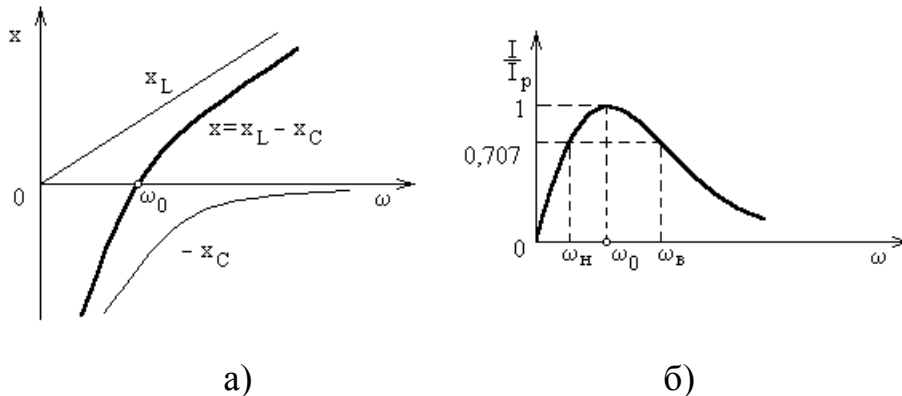


Рисунок 10 – Частотные характеристики (а) и резонансная кривая (б) последовательного колебательного контура

На рисунке 10а приведены *частотные характеристики* последовательного колебательного контура, а на рисунке 10б его нормированная *резонансная кривая*. Отметим, что частотными характеристиками называют зависимости от частоты параметров контура, а резонансными кривыми – зависимости действующих или амплитудных значений тока и напряжения от частоты.

Для оценки избирательных свойств колебательного контура вводят понятие *ширины полосы пропускания* контура ($\omega_B - \omega_H$), которую определяют как разность верхней и нижней частот, соответствующих уровню 0,707 (или $1/\sqrt{2}$) резонансной кривой. По резонансной кривой можно определить добротность колебательного контура в соответствии с формулой

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_B - \omega_H} . \quad (26)$$

Запишем формулу для определения входного сопротивления цепи, изображенной на рисунке 10а:

$$\dot{Z} = j \omega L + 1/j \omega C + R . \quad (27)$$

Из (27) следует, что на резонансной частоте ω_0 сопротивление последовательного контура $R_{p|}$ активно и минимально: $R_{p|} = R$.

Параллельный колебательный контур состоит из двух параллельных ветвей, одна из которых содержит индуктивность, а другая – емкость (рисунок 9б). В параллельном контуре может иметь место *резонанс токов*, когда ток на

входе контура значительно меньше токов в ветвях. На рисунке 11 изображена частотная характеристика идеального параллельного колебательного контура, где $\dot{Z}_{ex} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$ – входное комплексное сопротивление параллельного контура

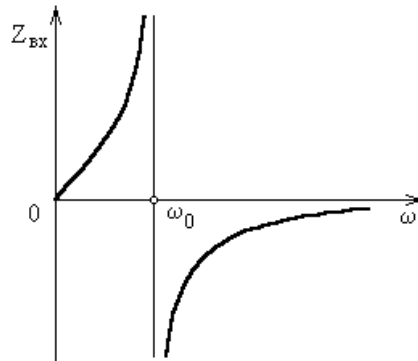


Рисунок 12 – Входное сопротивление идеального параллельного контура

При резонансе токи параллельных ветвей равны и сдвинуты по фазе относительно напряжения на угол $+\pi/2$ и $-\pi/2$, то есть входной ток контура равен нулю. Следовательно, на частоте резонанса входное сопротивление контура бесконечно велико.

Для цепи, изображенной на рисунке 9б запишем выражение для комплексного сопротивления $\dot{Z}$:

$$\dot{Z} = (j\omega L + R) / (j\omega RC - \omega^2 LC + 1). \quad (28).$$

Из (28) следует, что на резонансной частоте ω_0 сопротивление параллельного контура $R_{p\parallel}$ активно и максимально:

$$R_{p\parallel} \approx L / RC, \quad (29)$$

где $R_{p\parallel}$ получено с учетом того, что активное сопротивление катушки индуктивности мало ($R \ll 1 \text{ Ом}$).

2.6 Общие положения о переходных процессах

Переходные процессы возникают в ЭЦ в результате коммутаций и продолжаются определенное (теоретически бесконечно большое) время. Переходный процесс возникает в ЭЦ при переходе от одного принужденного или установившегося режима к другому. Физической причиной возникновения переходных процессов в ЭЦ является наличие в них реактивных элементов: индуктивностей и емкостей. Для расчета переходных процессов в линейных ЭЦ используют классический и операторный методы решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами.

Классический метод основан на применении методов классической математики к решению дифференциальных уравнений линейных ЭЦ.

Операторный метод основан на применении прямого и обратного преобразований Лапласа к расчету процессов в линейных ЭЦ.

Определения

- 1 *коммутации* – это «мгновенные» включения (отключения) ветвей, внезапные изменения параметров или короткие замыкания отдельных участков ЭЦ;
- 2 *принужденный режим* устанавливается в ЭЦ после того, как в ней произошла коммутация и с переходным процессом можно уже не считаться;
- 3 *установившийся режим* – это принужденный режим, создаваемый источником периодически изменяющейся ЭДС или тока;

2.7 Составление дифференциальных уравнений ЭЦ

При составлении уравнений ЭЦ обычно полагают, что время начала коммутации $t = 0$. Момент времени непосредственно предшествующий коммутации обозначают $t=0_-$, а наступающий сразу после коммутации $t = 0_+$.

Составим дифференциальное уравнение ЭЦ, схема которой изображена на рисунке 13.

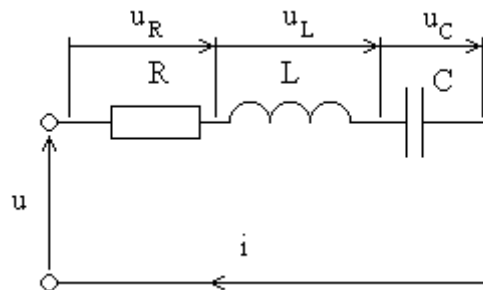


Рисунок 13 – Схема линейной ЭЦ

Применяя второй закон Кирхгофа, запишем:

$$u(t) = u_R + u_L + u_C = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u_C(0) , \quad (30)$$

где $u_R = i \cdot R$ – падение напряжения на сопротивлении R ;

$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u_C(0)$ – напряжение на конденсаторе;

$u_L = L \frac{di}{dt}$ – напряжение на катушке индуктивности.

Дифференцируя обе части уравнения (30), получим дифференциальное уравнение второго порядка для тока i в рассматриваемой цепи:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du}{dt} . \quad (31)$$

Из рассмотренного примера видно, что порядок дифференциального уравнения ЭЦ зависит от ее конфигурации.

Для отыскания токов и напряжений в переходном процессе необходимо найти *полные решения* дифференциальных уравнений ЭЦ.

Характеристическое уравнение ЭЦ. Если в уравнении (31) операторы дифференцирования заменить символом «р» в степени, соответствующей порядку производной, а переменную – единицей (переменная является производной нулевого порядка) и приравнять правую часть уравнения нулю, то получим *характеристическое уравнение* (х.у.) рассмотренной ЭЦ

$$LCp^2 + rCp + 1 = 0 .$$

Корни х.у. Если х.у. представляет собой уравнение *первой степени*, то оно имеет один отрицательный действительный корень.

Х.у. *второй степени* может иметь:

- два действительных неравных отрицательных корня;
- два действительных равных отрицательных корня;
- два комплексно сопряженных корня с отрицательной вещественной частью.

2.8 Решение линейных дифференциальных уравнений ЭЦ классическим методом

Полное решение линейного уравнения образуется как сумма *частного* решения *неоднородного* уравнения, содержащего заданные ЭДС или напряжения и решения *однородного* уравнения. Однородное уравнение получают из исходного уравнения ЭЦ, принимая в нем заданные ЭДС или напряжения равными нулю. Например, полное решение для тока в переходном процессе равно:

$$i(t) = i_{np}(t) + i_{cv}(t), \quad (32)$$

где $i_{np}(t)$ – частное решение неоднородного уравнения;

$i_{cv}(t)$ – решение однородного уравнения.

Из выражения (32) следует, что переходный процесс, происходящий в ЭЦ, можно рассматривать как наложение двух процессов – *принужденного* (который будет продолжаться и после окончания переходного процесса) и *свободного*, который имеет место только во время переходного процесса.

При $t \rightarrow \infty$ ток $i_{cv}(t)$ стремится к нулю и $i(t)$ стремится к $i_{np}(t)$.

Таким образом, отыскание токов и напряжений в принужденном режиме сводится к нахождению частных решений дифференциальных уравнений ЭЦ.

Постоянные интегрирования, входящие в выражение для свободного тока (напряжения), определяют в результате совместного решения системы линейных алгебраических уравнений по известным значениям корней х.у. и известным значениям свободной составляющей тока (напряжения) и ее производных, взятых при $t(0_+)$.

Законы коммутации. Начальные условия

1. Ток через индуктивность непосредственно до коммутации равен току через ту же индуктивность сразу после коммутации:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) . \quad [\text{первый закон коммутации}]$$

2. Напряжение на емкости непосредственно до коммутации равно напряжению на этой же емкости сразу после коммутации:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) . \quad [\text{второй закон коммутации}]$$

С энергетической точки зрения первый закон коммутации не допускает возможность существования источников бесконечно большой мощности; второй закон коммутации не допускает возможность скачкообразного изменения энергии электрического поля, запасенной в емкости.

Определения

- 1 *Независимые* начальные условия – значения переходных токов в индуктивностях и напряжений на емкостях при $t = 0$;
- 2 *зависимые* начальные условия – все остальные токи и напряжения ЭЦ при $t=0$. Их определяют с учетом независимых условий с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа;
- 3 *нулевые* начальные условия – токи и напряжения на пассивных элементах ЭЦ, которые равны нулю при $t=0_-$;
- 4 *ненулевые* начальные условия – токи и напряжения на пассивных элементах ЭЦ, которые не равны нулю при $t=0_-$.

Постоянная времени цепи

Решение однородного дифференциального уравнения записывают в виде показательных функций вида Ae^{pt} . Например, для свободного тока ЭЦ

$$i_{св} = Ae^{pt} , \quad (33)$$

где A – *постоянная интегрирования*;

p – *показатель затухания*, причем p – отрицательное число.

$$\text{Величину} \quad \tau = \frac{1}{|p|} \quad (34)$$

называют *постоянной времени* ЭЦ. Постоянная времени измеряется в секундах и зависит от схемы ЭЦ.

Из (34) и (35) следует, что постоянная времени численно равна промежутку времени, в течение которого свободный ток изменяет свое значение в e раз ($e \approx 2,71828...$ – основание натуральных логарифмов).

Обычно считают, что переходный процесс продолжается в течение 3τ .

Особенности свободного процесса для ЭЦ второго порядка

Апериодический процесс имеет место в случае, когда х.у. ЭЦ содержит два действительных неравных отрицательных корня: $p_1 = -a$ и $p_2 = -b$. Тогда

$$i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{-at} + A_2 \cdot e^{-bt} . \quad (35)$$

Критический переходный процесс имеет место в случае, когда х.у. ЭЦ содержит два действительных равных отрицательных корня: $p_1 = p_2 = -a$. Тогда

$$i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{-at} + A_2 \cdot t \cdot e^{-at} = (A_1 + A_2 \cdot t) e^{-at} . \quad (36)$$

Колебательный процесс имеет место в случае, когда х.у. ЭЦ содержит два комплексно сопряженных корня с отрицательной вещественной частью: $p_1 = -\delta + j\omega_0$ и $p_2 = -\delta - j\omega_0$. Тогда

$$i_{св}(t) = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi_0) . \quad (37)$$

Уравнение (37) описывает затухающее синусоидальное колебание с угловой частотой свободных колебаний ω_0 и начальной фазой ψ_0 (рисунок 14). Множитель $Ae^{-\delta t}$ задает *огibaющую* колебания, которая на рисунке 2 отмечена штриховой линией. Чем больше коэффициент затухания δ , тем быстрее затухает колебательный процесс.

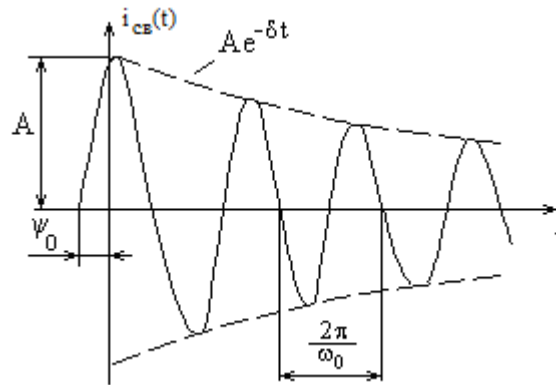


Рисунок 14 – Характер изменения свободного тока в колебательном процессе

Примечание – значения A и ψ_0 определяются параметрами схемы, начальными условиями и ЭДС источника, а значения ω_0 и δ зависят только от параметров ЭЦ после коммутации.

2.9 Единичная функция и переходная характеристика ЭЦ

Включение цепи под действие источника постоянной ЭДС при нулевых начальных условиях можно рассматривать как действие в этой ЭЦ ЭДС, имеющей временную зависимость, изображенную на рисунке 15а.

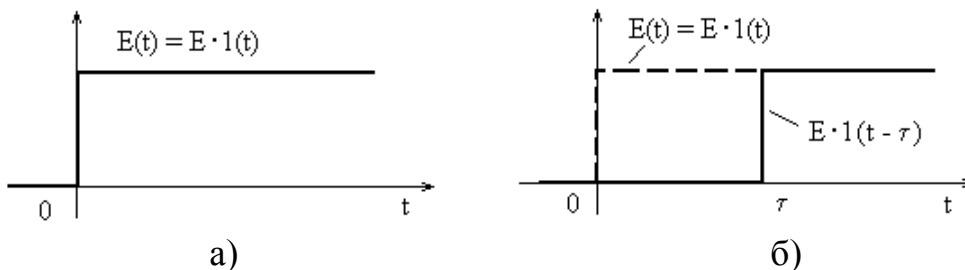


Рисунок 15 – Скачкообразные функции

Функции вида $E(t) = E \cdot 1(t)$ называются *скачкообразными функциями*. Функция $1(t)$ - *единичная функция* или *функция Хэвисайда*:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Смещенную вправо на промежуток времени τ скачкообразную функцию (рисунок 15б) можно записать в виде: $E \cdot 1(t - \tau)$. Эта функция равна нулю при $t < \tau$ и равна E при $t \geq \tau$.

Отметим, что возникающие в линейной цепи токи и напряжения прямо пропорциональны приложенной к ЭЦ скачкообразной ЭДС $E(t)$. Поэтому имеет место равенство

$$x(t) = E(t) \cdot h(t), \quad (38)$$

где $x(t)$ – искомая величина (ток или напряжение на некотором участке цепи в переходном процессе);

$h(t)$ – функция времени, называемая *переходной* характеристикой цепи, которая характеризует отклик ЭЦ на единичное входное воздействие (единичную функцию).

Из (38) следует, что функцию $h(t)$ можно определить, рассчитав классическим или операторным методом искомую величину $x(t)$ при включении исследуемой линейной ЭЦ под действие источника постоянной ЭДС ($E = \text{const}$):

$$h(t) = \frac{x(t)}{E}. \quad (39)$$

Примечание – с помощью переходной характеристики определяют отклик ЭЦ и на сигналы произвольной формы (метод интеграла Дюамеля).

2.10 Операторный метод расчета переходных процессов

При использовании операторного метода действительные функции времени, называемые *оригиналами*, заменяют их операторными *изображениями*. Соответствие между оригиналом и изображением устанавливают с помощью прямого преобразования Лапласа. Это преобразование позволяет заменить операции дифференцирования и интегрирования оригиналов алгебраическими операциями над их изображениями: операция дифференцирования заменяется умножением, а интегрирования – делением. При этом дифференциальные уравнения для оригиналов переходят в алгебраические уравнения для их изображений.

Прямое и обратное преобразования Лапласа

Прямое преобразование Лапласа устанавливает связь между оригиналом $f(t)$ и его изображением $F(p)$:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt, \quad (40)$$

где $p = \delta + j\sigma$ – комплексное число;

$f(t)$ – функция времени (ток, напряжение, ЭДС или заряд).

Кратко прямое преобразование Лапласа записывают в виде:

$$F(p) = L[f(t)].$$

Для того, чтобы *несобственный* интеграл (40) имел конечное значение, должны выполняться следующие условия

- 1 функция $f(t)$ должна иметь конечное число разрывов первого рода за любой конечный промежуток времени и конечное число максимумов и минимумов (условия Дирихле);

$$2 \quad |f(t)| < A e^{\alpha t} \text{ при } t > 0,$$

где A и α – некоторые положительные числа.

Числа A и α выбирают так, чтобы модуль функции $f(t)$ возрастал медленнее, чем $A e^{\alpha t}$. Все реальные токи и напряжения удовлетворяют этим условиям. Для того, чтобы интеграл (40) имел конечное значение, необходимо полагать $\delta > \alpha$.

Обратное преобразование Лапласа позволяет найти оригинал по его изображению:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\delta_0 - j\omega}^{\delta_0 + j\omega} F(p) e^{pt} dp. \quad (41)$$

Иначе обратное преобразование Лапласа записывается следующим образом

$$L^{-1}[F(p)] = f(t).$$

Примечания

- 1 Не каждая функция $F(p)$ имеет обратное преобразование.
- 2 Символ δ_0 имеет смысл нижнего предела абсолютной сходимости интеграла Лапласа: если интеграл (11) абсолютно сходится при $\delta = \delta_0$, то он абсолютно и равномерно сходится и для $\delta \geq \delta_0$.

Свойства изображений

Основные свойства изображений и изображения некоторых функций даны в приложении Г.

Применение преобразований Лапласа к анализу линейных ЭЦ

Рассмотрим участок цепи с ЭДС (рисунок 16).

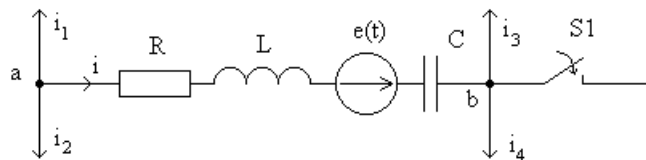


Рисунок 16 – Участок цепи с ЭДС

Между узлами a и b схемы включена ветвь с элементами R , L , C и источником ЭДС $e(t)$. На рисунке 16 приняты следующие обозначения: i – ток ветви $a - b$; i_1 , i_2 – токи ветвей, примыкающих к узлу a ; i_3 и i_4 – токи ветвей, примыкающих к узлу b . При замыкании выключателя $S1$ в ЭЦ происходит переходный процесс.

Запишем выражение для напряжения u_{ab} между узлами a и b после коммутации

$$u_{ab} = u_R + u_L + u_C - e(t),$$

или

$$u_{ab} = iR + L \frac{di}{dt} + u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt - e(t). \quad (42)$$

Применим прямое преобразование Лапласа к уравнению (42).

Учитывая свойство линейности, заменим каждое слагаемое (42) его изображением:

$$\begin{aligned} iR &\rightarrow RI(p); & u_{ab} &\rightarrow U_{ab}(p); & L \frac{di}{dt} &\rightarrow LpI(p) - Li(0); \\ u_C(0) &\rightarrow \frac{u_C(0)}{p}; & \frac{1}{C} \int_0^t i dt &\rightarrow \frac{I(p)}{Cp}; & e(t) &\rightarrow E(p). \end{aligned}$$

После преобразования вместо дифференциального уравнения (42), получим алгебраическое уравнение (43), связывающее изображения тока $I(p)$, напряжения $U_{ab}(p)$ и ЭДС $E(p)$

$$U_{ab}(p) = I(p) \left(R + pL + \frac{1}{C \cdot p} \right) - Li(0) + \frac{u_C(0)}{p} - E(p). \quad (43)$$

В уравнении (43) слагаемое $Li(0)$ – расчетная ЭДС, которая вызвана запасом энергии магнитного поля индуктивности L при протекании через нее тока $i(0)$ непосредственно до коммутации.

Слагаемое $\frac{u_C(0)}{p}$ – расчетная ЭДС, которая обусловлена запасом энергии электрического поля конденсатора вследствие действия напряжения $u_C(0)$ непосредственно перед коммутацией.

Закон Ома в операторной форме

Из уравнения (43) следует

$$I(p) = \frac{U_{ab}(p) + Li(0) - \frac{u_C(0)}{p} + E(p)}{Z(p)}, \quad (44)$$

где $Z(p) = R + pL + \frac{1}{C \cdot p}$ – операторное сопротивление участка цепи между узлами а и б.

Уравнение (44) – закон Ома в операторной форме для участка цепи с ЭДС.

Если на участке цепи а – б отсутствует источник ЭДС, а начальные условия нулевые, то уравнение (44) упрощается

$$I(p) = \frac{U_{ab}(p)}{Z(p)}. \quad (45)$$

Законы Кирхгофа в операторной форме

Первый закон. Алгебраическая сумма изображений токов ветвей, сходящихся в узле разветвленной цепи, равна нулю:

$$I_1(p) + I_2(p) + \dots + I_n(p) = \sum_{k=1}^n I_k(p) = 0, \quad (46)$$

где $I_1(p), I_2(p), \dots, I_n(p)$ – изображения токов $i_1, i_2, \dots, i_n$ для выбранного узла, причем

$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = 0.$$

Второй закон. Для любого замкнутого контура, состоящего из n ветвей, алгебраическая сумма изображений источников ЭДС, входящих в состав контура, равна сумме изображений напряжений на пассивных элементах контура:

$$\sum_{k=1}^n r_k I_k(p) + \sum_{k=1}^n L_k [p I_k(p) - i_k(0)] + \sum_{k=1}^n \frac{u_{Ck}(0)}{p} + \sum_{k=1}^n \frac{I_k(p)}{C_k p} = \sum_{k=1}^n E_k(p), \quad (47)$$

или, при нулевых начальных условиях:

$$\sum_{k=1}^n Z_k(p) I_k(p) = \sum_{k=1}^n E_k(p), \quad (48)$$

где k – номер ветви в составе замкнутого контура.

Операторные схемы замещения цепей

При расчете переходного процесса в ЭЦ операторным методом применяют схемы замещения, изображенные на рисунке 17.

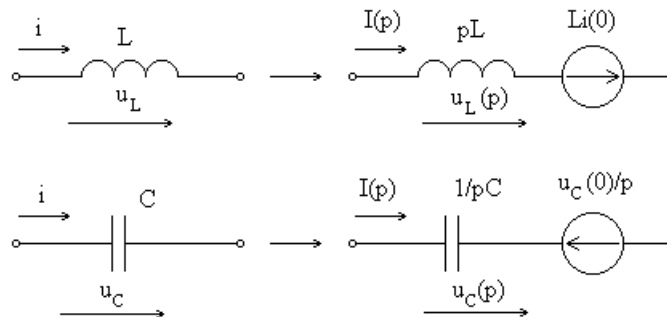


Рисунок 17 – Операторные схемы замещения элементов электрической цепи

Особенности расчета переходных процессов в линейных ЭЦ операторным методом

1. Непосредственное решение дифференциального уравнения, заданного вместе с начальными условиями в пространстве оригиналов, в операторном методе заменяется косвенным решением в пространстве изображений.
2. После преобразования исходной схемы с использованием элементов замещения, изображенных на рисунке 17, составляют систему алгебраических уравнений в пространстве изображений на основе законов Ома и Кирхгофа в операторной форме (что соответствует прямому преобразованию Лапласа заданного дифференциального уравнения).
3. Решают полученную систему *изображающих* алгебраических уравнений и осуществляют переход с помощью обратного преобразования Лапласа в пространство оригиналов (для этого используют таблицы соответствия оригиналов и их изображений или *теорему разложения*). В результате получают решение поставленной задачи.

4. В *изображающих уравнениях* учтены начальные условия. Это позволяет найти единственное решение среди множества возможных решений исходного дифференциального уравнения.

Основные соотношения для операторных сопротивлений

1. Операторное сопротивление (резистивное или омическое)

$$Z(p) = R$$

2. Операторное сопротивление индуктивности

$$Z(p) = pL$$

3. Операторное сопротивление емкости

$$Z(p) = \frac{1}{pC}.$$

Примечание – переход от операторного сопротивления к комплексному сопротивлению формально осуществляется заменой символов $p \rightarrow j\omega$.

Передаточная и переходная функции

Передаточная и переходная функции применяются при расчете ЭЦ (четыреполюсников) и их экспериментальном исследовании.

Передаточная функция $K(p)$ устанавливает функциональную зависимость между изображениями выходного и входного напряжения (тока) исследуемого четырехполюсника

$$K_U(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}; \quad (49a)$$

$$K_I(p) = \frac{I_2(p)}{I_1(p)}, \quad (49б)$$

где $K_U(p)$ и $K_I(p)$ – передаточные функции по напряжению и току;

$U_1(p), U_2(p)$ – изображения входного и выходного напряжений четырехполюсника;

$I_1(p), I_2(p)$ – изображения входного и выходного токов.

Переходная функция $h(t)$. Если в качестве входного воздействия при исследовании четырехполюсника использовать единичный скачок напряжения или тока, то в выражения (49a) или (49б) вместо $U_1(p)$ и $I_1(p)$ необходимо подставить изображение единичной функции $L[1(t)] = \frac{1}{p}$. В результате такой

подстановки получают изображения *переходной функции* ЭЦ $H_U(p)$ или $H_I(p)$, которые численно равны изображениям напряжения $U_2(p)$ или тока $I_2(p)$ и характеризуют отклик ЭЦ на единичное входное воздействие в пространстве изображений:

$$H_U(p) = U_2(p) = \frac{K_U(p)}{p}; \quad (50a)$$

$$H_I(p) = I_2(p) = \frac{K_I(p)}{p}. \quad (50б)$$

Для того, чтобы получить выражение для переходной функции ЭЦ во временной области, необходимо к выражениям (21а) или (21б) применить обратное преобразование Лапласа

$$h_U(t) = L^{-1} [H_U(p)] , \quad (51a)$$

$$h_I(t) = L^{-1} [H_I(p)] . \quad (51б)$$

Примечания

- 1 Из (50) и (51) следует, что между переходной и передаточной функциями имеется взаимно однозначное соответствие.
- 2 Переход от ККП по напряжению $\dot{K}_U(j\omega)$ или току $\dot{K}_I(j\omega)$, к передаточным функциям $K_U(p)$ и $K_I(p)$ осуществляется простой заменой символов $j\omega \rightarrow p$.

2.11 Пример расчета процессов в линейной ЭЦ

Определим переходной ток в линейной ЭЦ при включении постоянного напряжения U_0 при нулевых начальных условиях. Схема ЭЦ изображена на рисунке 18.

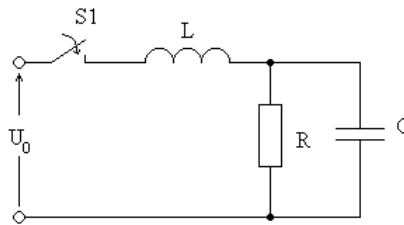


Рисунок 18 – Схема линейной ЭЦ

Запишем операторное сопротивление ЭЦ:

$$Z(p) = pL + \frac{R \frac{1}{pC}}{R + \frac{1}{pC}} = \frac{p^2 RLC + pL + R}{1 + pRC}.$$

Изображение приложенного напряжения $L[U_0] = \frac{U_0}{p}$.

Из закона Ома (45) следует, что изображение тока в неразветвленной части цепи равно

$$I(p) = \frac{\frac{U_0}{p}}{Z(p)} = \frac{\frac{U_0}{RLC}(1 + pRC)}{p(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)}, \quad (52)$$

где $2\delta = \frac{1}{RC}$; $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

Для определения тока $i(t)$ в неразветвленной части цепи применим теорему разложения

$$i(t) = \sum_{k=1}^n \frac{G(p_k)}{H'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (53)$$

где $G(p) = \frac{U_0}{RLC}(1 + pRC)$ – полином числителя выражения (52);

$H(p) = p(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)$ – полином знаменателя выражения (52);

$n = 3$ – количество корней полинома $H(p)$;

$p_1 = 0$, $p_2 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$, $p_3 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ – корни $H(p)$;

$H'(p) = 3p^2 + 4\delta p + \omega_0^2$ – производная полинома $H(p)$.

Подставляя корни p_k в (53), можно записать

$$i(t) = \frac{U_0}{R} + \frac{\frac{U_0}{RLC}(1 + p_2 RC)}{p_2 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_2 t} - \frac{\frac{U_0}{RLC}(1 + p_3 RC)}{p_3 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_3 t}. \quad (54)$$

Первое слагаемое в (54) определяет принужденную составляющую тока в цепи.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка для исследования линейных цепей выполнена на базе учебного макета УМ-16. Макет содержит блок нагрузок, который состоит из двух магазинов сопротивлений, двух магазинов индуктивностей и двух магазинов емкостей. Многопозиционные переключатели позволяют изменять сопротивления в пределах от 1 до 100 кОм, емкости – от 33 до 10000 пФ, индуктивности – от 1 до 500 мкГн. Исследуемая схема собирается в наборном поле УМ-16 с применением соединительных проводов и коммутационных гнезд. Подключение осциллографа и генератора стандартных сигналов к исследуемой схеме производится с помощью специальных малогабаритных штепселей.

Компьютерное моделирование исследуемых схем выполняют с использованием студенческой версии программы CircuitMaker, краткие сведения о которой даны в Приложении А.

На рисунке 19 изображена схема лабораторной установки.

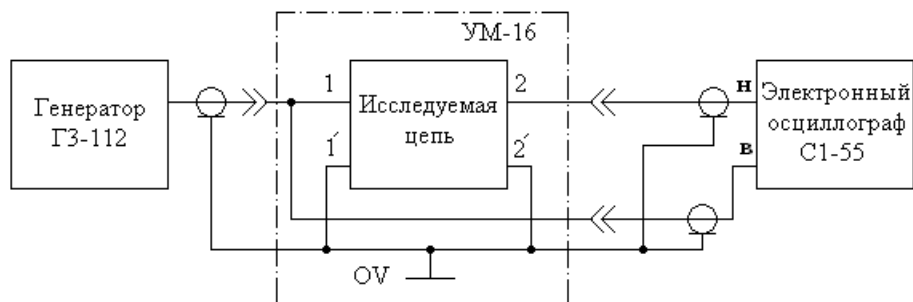


Рисунок 19 – Схема лабораторной установки

Примечание – на рисунке 19 приняты следующие обозначения: н – вход усилителя нижнего луча осциллографа; в – вход усилителя верхнего луча осциллографа; 1 - 1'; 2 - 2' – входные и выходные контакты исследуемой цепи

На рисунке 20 даны варианты исследуемых цепей.

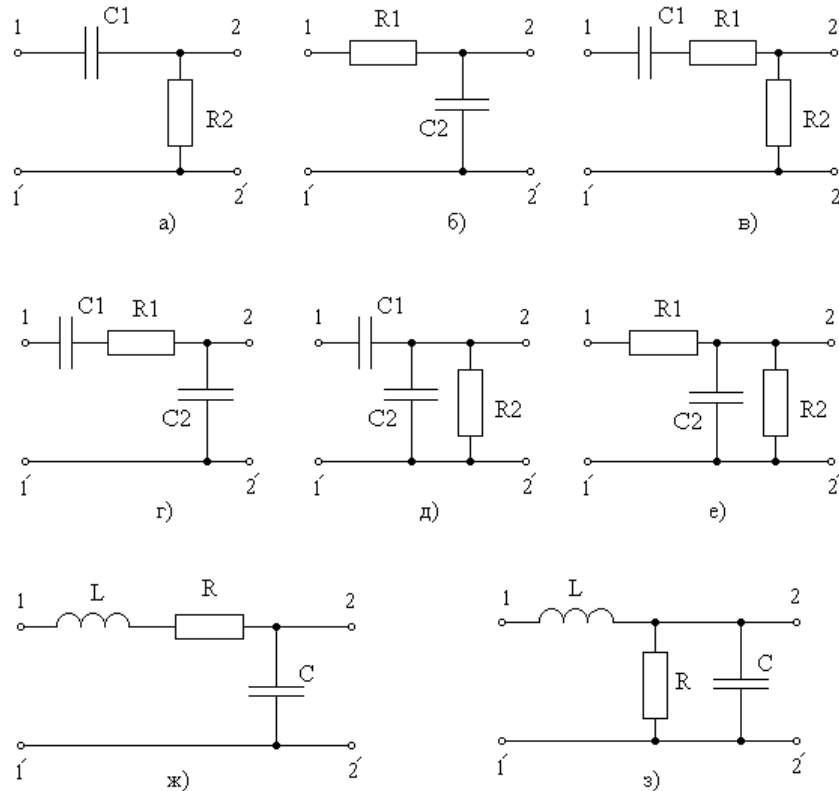


Рисунок 20 – Варианты схем исследуемых цепей

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Выбрать для исследования RC-цепь (п.1 таблицы 1). Используя коаксиальные кабели и соединительные провода, собрать схему лабораторной установки в соответствии с рисунком 19. Контакты 1-1' исследуемой цепи соединить с выходом генератора ГЗ-112 и со входом усилителя верхнего луча осциллографа С1-55. Контакты 2-2' соединить со входом усилителя нижнего луча осциллографа С1-55. Установить частоту гармонического входного напряжения $f = 1000$ Гц, а амплитуду $U_1 = 1$ В (по осциллограмме верхнего луча осциллографа).

Таблица 1 – Варианты заданий

Вид исследуемой цепи	Варианты заданий					
	1	2	3	4	5	6
1. RC (рисунок 20 а), ..., е))	а	б	в	г	д	е
2. RC (рисунок 8)						
3. RLC (рисунок 20 ж), з))	ж	з	ж	з	ж	з

Примечание – вариант задания согласовать с преподавателем.

4.2 С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой схемы в соответствии с результатами расчетов по п.5.1.

4.3 Изменяя частоту входного сигнала f от 100 Гц до 100 кГц, выполнить 6...8 измерений амплитудных значений выходного напряжения $U_2(f)$ (по осциллограмме нижнего луча осциллографа) и соответствующих им фазовых сдвигов $\varphi_{\text{экс.}}(f)$. Для определения фазового сдвига между выходным и входным напряжениями цепи необходимо измерить временной сдвиг τ между осциллограммами нижнего и верхнего лучей осциллографа. Угол φ (град) определить по формуле: $\varphi = 360\tau / T$, где T – период гармонического колебания.

Результаты измерений коэффициента передачи $K_{\text{экс.}}$ и $\varphi_{\text{экс.}}(f)$ занести в таблицу 2 ($K_{\text{экс.}} = U_2 / U_1 = U_2 / 1\text{В}$ при установленном значении $U_1 = 1\text{В}$).

4.4 Повторить операции п.п.4.2 и 4.3 для исследуемой цепи с параметрами, соответствующими расчетным значениям п.п.5.2 и 5.3.

Таблица 2 – Исходные данные для построения АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи

	$U_1 = 1\text{В}$		$f, \text{Гц}$			
	Параметры цепи	Экспериментальные и расчетные данные	10^2	...	10^5	f_c
1.	$R1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$U_2, \text{В} (K_{\text{экс.}})$				
	$R2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$\varphi_{\text{экс.}}(f)$				
	$C1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$K_{\text{расч.}}$				
	$C2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$\varphi_{\text{расч.}}$				
2.	$R1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$U_2, \text{В} (K_{\text{экс.}})$				
	$R2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$\varphi_{\text{экс.}}(f)$				
	$C1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$K_{\text{расч.}}$				
	$C2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$\varphi_{\text{расч.}}$				
3.	$R1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$U_2, \text{В} (K_{\text{экс.}})$				
	$R2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{кОм}$	$\varphi_{\text{экс.}}(f)$				
	$C1 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$K_{\text{расч.}}$				
	$C2 = \underline{\hspace{1cm}}, \text{пФ}$	$\varphi_{\text{расч.}}$				

4.5 Собрать схему цепи, изображенную на рисунке 8. Контакты 1-1' схемы соединить с выходом генератора ГЗ-112 и со входом усилителя верхнего луча осциллографа. Контакты 2-2' соединить со входом усилителя нижнего луча осциллографа. Установить частоту генератора $f = 1000 \text{ Гц}$, а амплитудное значение напряжения на выходе генератора $U_1 = 1 \text{ В}$ (по осциллограмме верхнего луча осциллографа). С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой схемы в соответствии с результатами расчетов по п.5.4.

4.6 Изменяя частоту входного сигнала f от 100 Гц до 100 кГц, выполнить 6...8 измерений амплитудных значений выходного напряжения $U_2(f)$ (по

осциллограмме нижнего луча осциллографа) и соответствующих им фазовых сдвигов $\varphi_{\text{эксн.}}(f)$. Результаты измерений коэффициента передачи $K_{\text{эксн}}$ и $\varphi_{\text{эксн.}}(f)$ занести в таблицу 3 ($K_{\text{эксн.}} = U_2 / U_1 = U_2 / 1\text{В}$ при установленном значении $U_1 = 1\text{В}$).

Таблица 3 – Исходные данные для построения АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи

$U_1 = 1\text{В}$		$f, \text{Гц}$			
Параметры цепи	Экспериментальные и расчетные данные	10^2		10^5	f_0
$R = \text{____}, \text{кОм};$ $C = \text{____}, \text{пФ}$	$U_2, \text{В} (K_{\text{эксн.}})$				
	$\varphi_{\text{эксн.}}(f)$				
	$K_{\text{расч.}}$				
	$\varphi_{\text{расч.}}$				

4.7 Выбрать для исследования схему RLC-цепи по номеру варианта задания (п.3 таблицы 1). Контакты 1-1' схемы соединить с выходом генератора и со входом усилителя верхнего луча осциллографа. Контакты 2-2' соединить со входом усилителя нижнего луча осциллографа. Установить частоту генератора $f = 1000 \text{ Гц}$, а амплитудное значение напряжения на выходе генератора $U_1 = 1 \text{ В}$. С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой схемы в соответствии с результатами расчетов по п.5.5.

4.8 Изменяя частоту входного сигнала f от 100 Гц до 100 кГц , выполнить 6...8 измерений амплитудных значений выходного напряжения $U_2(f)$ (по осциллограмме нижнего луча осциллографа) и соответствующих им фазовых сдвигов $\varphi_{\text{эксн.}}(f)$. Результаты измерений коэффициента передачи $K_{\text{эксн}}$ и $\varphi_{\text{эксн.}}(f)$ занести в таблицу 4 ($K_{\text{эксн.}} = U_2 / U_1 = U_2 / 1\text{В}$ при установленном значении $U_1 = 1\text{В}$).

Таблица 4 – Исходные данные для построения АЧХ RLC - цепи

$U_1 = 1\text{В}$		$f, \text{Гц}$			
Параметры цепи	Экспериментальные и расчетные данные	10^2	...	10^5	f_0
$R = \text{____}, \text{Ом};$ $C = \text{____}, \text{пФ};$ $L = \text{____}, \text{мкГн}$	$U_2, \text{В} (K_{\text{эксн.}})$				
	$\varphi_{\text{эксн.}}(f)$				

4.9 Используя коаксиальные кабели и соединительные провода, собрать схему лабораторной установки в соответствии с рисунком 19. Контакты 1-1' исследуемой цепи соединить с выходом генератора ГЗ-112 и со входом усилителя верхнего луча осциллографа С1-55. Контакты 2-2' соединить со входом усилителя нижнего луча осциллографа. Установить частоту генератора $f = 10000 \text{ Гц}$ и задать режим генерации прямоугольных импульсов. Установить

амплитудное значение скачка напряжения на выходе генератора $U_0 = 1$ В (по осциллограмме верхнего луча осциллографа – см. рисунок 19).

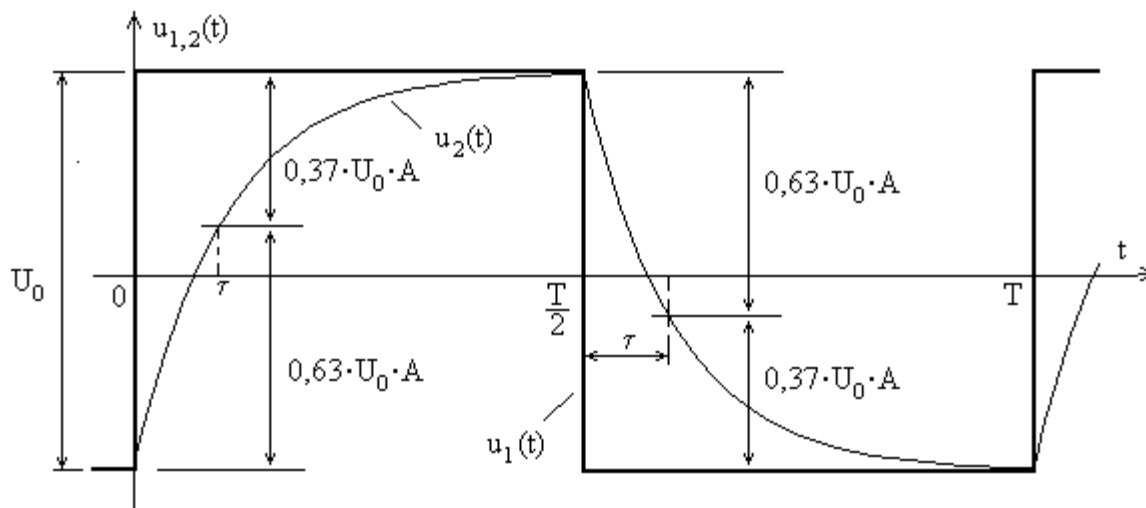
4.10 С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой ЭЦ в соответствии с результатами расчетов по п.5.7. Зарисовать осциллограммы входного $u_1(t)$ и выходного $u_2(t)$ напряжений исследуемой цепи. Определить значение постоянной времени цепи τ_{19} . Для экспериментального определения постоянной времени цепи выполнить геометрические построения в соответствии с рисунком 21.

На рисунке 21 даны приближенные значения коэффициентов:

$$0,37 \approx 1/e; \quad 0,63 \approx (1-1/e),$$

где $e = 2,71828...$ – основание натуральных логарифмов.

Значение постоянной времени τ_{19} занести в таблицу 5.



$u_1(t)$ – напряжение на входе цепи;

$u_2(t)$ – напряжение на выходе цепи;

τ – постоянная времени цепи;

T – период следования импульсов;

$A \in [0, 1]$ – постоянный коэффициент (см. таблицу Д.1)

Рисунок 21 – Измерение постоянной времени цепи

4.11 С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой ЭЦ в соответствии с результатами расчетов по п.5.8.

Зарисовать осциллограммы входного $u_1(t)$ и выходного $u_2(t)$ напряжений исследуемой цепи. Определить значение постоянной времени цепи τ_{29} и занести его в таблицу 5.

Таблица 5 – Данные для построения переходной характеристики RC-цепи

$U_0 = 1\text{В}; f = 10000\text{ Гц}$		Экспериментальные и расчетные данные			
Параметры цепи	Характеристика (осциллограмма)	Время t , мкс			
		0	$0,1T$	...	$0,5T$
1. ($\tau_{1p} = ___\text{ мкс}$, $\tau_{1э} = ___\text{ мкс}$)	$h(t)_p$				
	$u_{2э}(t)$, В				
2. ($\tau_{2p} = ___\text{ мкс}$, $\tau_{2э} = ___\text{ мкс}$)	$h(t)_p$				
	$u_{2э}(t)$, В				
3. ($\tau_{3p} = ___\text{ мкс}$, $\tau_{3э} = ___\text{ мкс}$)	$h(t)_p$				
	$u_{2э}(t)$, В				
Примечание – τ_{p} – расчетное значение постоянной времени ЭЦ; $\tau_{э}$ – измеренное значение постоянной времени ЭЦ; $T = 1/f$ – период следования импульсов; $u_{2э}(t)$ – измеренные значения выходного напряжения в моменты времени $t = 0; 0,1 T; \dots; 0,5 T$. Момент времени $t = 0$ соответствует $t = 0_+$ (начало коммутации).					

4.12 С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой схемы в соответствии с результатами расчетов по п.5.9. Зарисовать осциллограммы входного $u_1(t)$ и выходного $u_2(t)$ напряжений исследуемой цепи. Определить значение постоянной времени цепи $\tau_{3э}$ и занести его в таблицу 5.

4.13 Выбрать для исследования схему RLC- цепи по номеру варианта задания (п.3 таблицы 1). Контакты 1-1' схемы соединить с выходом генератора ГЗ-112 и со входом усилителя верхнего луча осциллографа С1-55. Контакты 2-2' соединить со входом усилителя нижнего луча осциллографа. Установить частоту генератора $f = 10000\text{ Гц}$ и задать режим генерации прямоугольных импульсов с амплитудой скачка напряжения на выходе генератора $U_0 = 1\text{ В}$ (см. рисунок 21).

4.14 С помощью многопозиционных переключателей макета УМ-16 задать параметры линейных элементов исследуемой схемы в соответствии с результатами расчетов по п.5.10. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений исследуемой цепи. Результаты измерений занести в таблицу 6.

4.15 Установить частоту генератора $f_2 = 5000\text{ Гц}$ и, не изменяя параметров элементов схемы, повторить измерения по п.4.14.

4.16 Установить частоту генератора $f_3 = 50000\text{ Гц}$ и, не изменяя параметров элементов схемы, повторить измерения по п.4.14.

Таблица 6 – Данные для построения переходной характеристики RLC-цепи

$U_0 = 1\text{В}$		Результаты расчета и эксперимента				
Параметры цепи	Характеристика (осциллограмма)	Время t , с				
		0	$0,05 T_i$	...	$0,5 T_i$	
1. ($f_1 = 10000 \text{ Гц}; f_0 = ___\text{ Гц}$)	$h(t)_p$					
	$u_{2\gamma}(t), \text{В}$					
2. ($f_2 = 5000 \text{ Гц}; f_0 = ___\text{ Гц}$)	$h(t)_p$					
	$u_{2\gamma}(t), \text{В}$					
3. ($f_3 = 50000 \text{ Гц}; f_0 = ___\text{ Гц}$)	$h(t)_p$					
	$u_{2\gamma}(t), \text{В}$					
Примечание – $u_{2\gamma}(t)$ – измеренные значения выходного напряжения $u_2(t)$ в моменты времени $t = 0; 0,05 \cdot T_i; \dots; 0,5 \cdot T_i$; $T_i = 1/f_i$ – период следования импульсов. Момент времени $t = 0$ соответствует $t = 0_+$ (начало коммутации); $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$.						

4.17. Выполнить компьютерное моделирование цепей по вариантам таблицы 1 в соответствии с рекомендациями, изложенными в Приложении А.

Примечания

- 1 При выполнении п.4.17 параметры цепей выбирать произвольно.
- 2 При моделировании RLC-цепи значения сопротивления выбирать в диапазоне от 0,01 до 1 Ом.

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

5.1 Используя формулы приложения Б, для заданного варианта RC - цепи рассчитать требуемые значения ее параметров по частоте среза f_c , находящейся в интервале от 100 до 1000 Гц. По данным таблицы В.1 приложения В подобрать наиболее подходящие значения соответствующих параметров. Уточнить значение частоты среза.

Определить значения $K_{расч}$ и $\varphi_{расч}$ по формулам приложения Б для каждого значения частоты, приведенного в таблице 2. Результаты расчетов занести в таблицу 2.

5.2 Повторить расчеты п. 5.1 для частоты среза f_c , находящейся в интервале от 1000 до 10000 Гц.

5.3 Повторить расчеты п. 5.1 для частоты среза f_c , находящейся в интервале от 10000 до 100000 Гц.

5.4 Для цепи, изображенной на рисунке 9, принять $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$. По формуле (20) рассчитать требуемые значения параметров цепи, полагая, что частота кватирезонанса f_0 находится в диапазоне от 5000 до 50000 Гц. По данным таблицы В.1 приложения В подобрать наиболее подходящие значения соответствующих параметров. Уточнить значение частоты кватирезонанса.

Определить значения $K_{расч}$ и $\phi_{расч}$ по формулам приложения Б для каждого значения частоты, приведенного в таблице 3. Результаты расчетов занести в таблицу 3.

5.5 По формуле (23) для заданного варианта RLC-цепи рассчитать требуемые значения индуктивности и емкости по частоте резонанса f_0 , находящейся в интервале от 10000 до 100000 Гц. По данным таблицы В.1 приложения В подобрать наиболее подходящие значения соответствующих параметров. Уточнить значение частоты резонанса.

5.6 По данным таблиц 2 – 4 построить АЧХ и ФЧХ исследуемых цепей.

5.7 Используя формулы приложения Д, для заданного варианта RC-цепи рассчитать требуемые значения ее параметров (R и C) по значению постоянной времени τ , находящемуся в интервале от 5 до 10 мкс ($\tau = 5 \dots 10$ мкс). По данным таблицы В.1 приложения В подобрать наиболее подходящие значения сопротивления и емкости. Уточнить расчетное значение постоянной времени цепи τ_{1p} .

Рассчитать переходную характеристику цепи при значениях аргумента t , находящихся в следующем интервале:

$$t \in \left[0, \frac{T}{2} \right],$$

где $T = 1/f$ – период следования импульсов;

f – частота следования импульсов.

Результаты расчетов занести в таблицу 5.

Примечание – $T = 100$ мкс при установленном значении частоты генератора $f = 10000$ Гц.

5.8 Повторить расчеты п.5.7 для значения постоянной времени цепи τ_2 , находящегося в интервале от 10 до 15 мкс. Результаты расчетов занести в таблицу 5.

5.9 Повторить расчеты п.5.7 для значения постоянной времени цепи τ_3 , находящегося в интервале от 15 до 20 мкс. Результаты расчетов занести в таблицу 5.

5.10 Используя формулы (Д.7) и (Д.8) приложения Д, для заданного варианта RLC-цепи рассчитать требуемые значения индуктивности и емкости по значению резонансной частоты f_0 , находящемуся в интервале от 50000 до 500000 Гц. По данным таблицы В.1 приложения В подобрать наиболее подходящие значения соответствующих параметров (L и C). Уточнить расчетное значение резонансной частоты. При выполнении моделирования с использованием макета УМ-16 принять значение сопротивления резистора равным одному килоому ($R = 1$ кОм).

Рассчитать переходную характеристику цепи при значениях аргумента t , находящихся в интервале от 0 до 50 мкс. Результаты расчетов занести в таблицу 6.

5.11 По данным таблиц 5 и 6 построить расчетные переходные характеристики исследуемых цепей.

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1 Название и цель работы.

6.2 Схемы лабораторной установки и исследуемой цепи.

6.3 Расчет и графики АЧХ, ФЧХ и переходных характеристик исследуемых цепей, выполненные в процессе домашней подготовки.

6.4 Результаты экспериментальных исследований по п.п. 4.1–4.8 и 4.10–4.16 в виде таблиц и графиков.

6.5 Результаты компьютерного моделирования по п. 4.17. в виде таблиц и осциллограмм (скриншотов).

6.6 Выводы о влиянии параметров исследуемых цепей на их АЧХ, ФЧХ и переходные характеристики.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1 Чем объясняется зависимость коэффициента передачи RC-цепи от частоты?

7.2 Чем объясняется зависимость угла сдвига фазы RC-цепи от частоты?

7.3 Что называют комплексным коэффициентом передачи цепи?

7.4 Какие преимущества дает использование комплексных амплитуд гармонических токов и напряжений?

7.5 Почему удобно представление законов Ома и Кирхгофа в комплексной форме?

7.6 Поясните методику нахождения модуля и аргумента функции комплексного переменного.

7.7 Почему в цепи с последовательно соединенными реактивными и активными элементами сумма амплитуд напряжений на элементах в контуре не равна амплитуде источника гармонического напряжения?

7.8 Как зависит от частоты реактивное сопротивление последовательно соединенных катушки и конденсатора? Как изменится эта зависимость при параллельном соединении этих элементов?

7.9 Почему в RLC- цепях возникает резонанс токов, резонанс напряжений?

7.10 Почему при резонансе напряжений уменьшается сопротивление контура на частоте резонанса?

7.11 Почему при резонансе токов возрастает сопротивление контура на частоте резонанса?

7.12 Объясните методику составления дифференциальных уравнений ЭЦ.

7.13 Сформулируйте и объясните законы коммутации.

7.14 Объясните физический смысл постоянной времени ЭЦ.

7.15 Что называют передаточной функцией цепи?

7.16 Каковы основные идеи классического метода расчета переходных процессов в ЭЦ.

7.17 Какие особенности имеют апериодический, критический и колебательный переходные процессы в ЭЦ второго порядка.

7.18 Что называют переходной характеристикой ЭЦ? Какова ее размерность? В каких случаях применяют переходную характеристику?

7.19 Как определяют параметры операторных схем замещения цепей?

7.20 Как определяют начальные условия при анализе переходных процессов в ЭЦ?

7.22 Почему удобно представление законов Ома и Кирхгофа в операторной форме?

7.23 Поясните методику нахождения переходной характеристики цепи с использованием преобразований Лапласа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника [Текст]: учеб. пособие /В.И.Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 703с.

2 Новиков Ю. В. Введение в цифровую схемотехнику [Текст]: учеб. пособие/ Ю.В. Новиков. – М. : Бином: Лаборатория Знаний, 2007. – 344с.

3 Бабич Н.П. Основы цифровой схемотехники [Текст]: учеб. пособие/ Н.П. Бабич. – М. : К. : Додэка – XXI : МК – Пресс, 2007. – 480с.

4 Немцов М.В. Электротехника: [Текст]: учебник: В 2 кн. Кн.1/М.В. Немцов. – М. : «Академия», 2014. – 240с.

5 Немцов М.В. Электротехника [Текст]: учебник: В 2 кн. Кн.2/М.В. Немцов. – М. : «Академия», 2014. – 288с.

6 Белов Н.В. Электротехника и основы электроники [Текст]: учеб. пособие /Н. В. Белов, Ю.С. Волков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2012. – 430с.

7 Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника [Текст]: учебник /В. Г. Гусев. – М. : КНОРУС, 2013. – 800 с.

8 Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД [Текст]: Справочник/ С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.

9 ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – М.: Изд. Стандартов, 2001. – 22с.

10 Кузовкин В.А. Электротехника и электроника [Текст]/ В. А. Кузовкин, В.В. Филатов. – М.: Юрайт, 2014. – 430с.

11 Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств [Текст]: учеб. пособие/Б.Ф. Лаврентьев. – М.: Академия, 2010. – 336с.

12 Применение интегральных схем [Текст]: практ. руководство. В 2 кн. Кн.1/под ред. А.Уильямса. – М.: Мир, 1987. – 432с.

13 Применение интегральных схем [Текст]: практ. руководство. В 2 кн. Кн.2/под ред. А.Уильямса. – М.: Мир, 1987. – 413с.

Приложение А (обязательное) Краткие сведения о программе CircuitMaker

А.1 Основные инструменты программы CircuitMaker

А.1.1 Вызов программы осуществляется обращением к файлу Cirmaker.exe.

А.1.2 Программа предусматривает наличие библиотеки элементов, обращение к которой осуществляется по команде **Devices>Browse**, либо с помощью пиктограммы .

Измерительными приборами являются: мультиметр, генератор сигналов, осциллограф и графопостроитель (измеритель АЧХ и ФЧХ).

Основные инструменты курсора выбираются с помощью следующих пиктограмм:

-  – стрелка (Arrow Tool) – **Alt + A** – предназначена для выделения, перемещения и редактирования элементов цепи, проводников и текста;
-  – проводник (Wire Tool) – **Alt + W** – обеспечивает соединение элементов цепи;
-  – удаление (Delete Tool) – **Alt + D** – применяется для удаления элементов цепи, проводников и текста;
-  – пробник (Probe Tool) – **Alt + P** – используется для индикации напряжений в заданных точках цепи.

Команда ПУСК (Run/Stop) – пиктограмма  – **F10** используется для запуска и останова программы симуляции.

А.2 Монтаж исследуемой схемы

А.2.1 Используя пиктограмму , разместить на рабочем поле элементы схемы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, заземление) и произвести необходимые соединения. Размещение выбранного элемента осуществляется щелчком «мыши» по кнопке Place (разместить) диалогового окна Device Selection (выбор устройства).

Численные значения параметров можно задавать в поле Label – Value диалогового окна Device Selection при размещении элементов или в процессе редактирования схемы. В последнем случае курсор-стрелку наводят на требуемый элемент и двойным щелчком открывают окно Edit Device Data.

А.2.2 Режим генерации гармонических сигналов (далее – режим 1).

Разместить на экране генератор синусоидальных сигналов, используя команду **Signal Gen [Device Selection (General) > Minor Device Class (Instruments) > Device Symbol (Signal Gen)]**. После подключения генератора к схеме необходимо задать его параметры. Для этого навести курсор – стрелку на изображение генератора и двойным щелчком открыть окно редактора Edit Sine Wave Data. В поле Peak Amplitude задать амплитуду напряжения сигнала, а в поле Frequency – значение частоты сигнала. Переключатель Output установить в положение Volts.

А.2.3 Режим генерации периодических прямоугольных импульсов (далее режим 2).

Разместить на рабочем поле генератор синусоидальных сигналов, используя команду Signal Gen [Device Selection (General) > Minor Device Class (Instruments) > Device Symbol (Signal Gen)]. После подключения генератора к схеме необходимо задать его параметры. Для этого навести курсор – стрелку на изображение генератора и двойным щелчком «мыши» открыть окно редактора Edit Sine Wave Data. Последовательно нажать клавишу Wave и в раскрывающемся окне Edit Signal Generator клавишу Pulse. В окне Edit Pulse Data заполнить соответствующие поля. В полях Initial Amplitude и Pulse Amplitude задать необходимые амплитудные значения. Если сигнал однополярный, то в поле Initial Amplitude требуется установить 0.0V. Если сигнал биполярный, то в полях Initial Amplitude и Pulse Amplitude следует задать равные по модулю и противоположные по знаку значения напряжений. В поле Period указать значение периода следования импульсов, а в поле Pulse Width – требуемое значение длительности импульсов. Рекомендуется устанавливать длительность импульса равной половине периода. В полях Rise Time и Fall Time установить нулевые значения длительностей фронта и среза импульса. Переключатель Output установить в положение Volts.

Примечание – при исследовании резонанса токов в ЭЦ переключатель Output устанавливают в положение Amps.

А.2.4 Отметить контрольные точки. Для этого курсор – пробник навести на требуемую точку схемы и щелкнуть «мышью». В окне Run - Time Test Point установить флажки в требуемых для анализа полях Analyses. В режиме генерации синусоидальных сигналов отмечают поля AC (Alternative Current – переменный ток) и TRAN, а в режиме генерации периодических импульсов – поле TRAN. В полях Min.Scale и Max.Scale задать минимальное и максимальное значения шкалы (если амплитуда тестового сигнала составляет 1В, то в полях Min.Scale и Max.Scale должны быть установлены значения - 1.000 и 1.000).

Для того чтобы отметить несколько контрольных точек, необходимо вторую и последующие точки отмечать при нажатой клавише Ctrl (при этом для каждой точки повторяют процедуру заполнения полей диалогового окна Run - Time Test Point). Примеры изображения схемы с отмеченными контрольными точками даны на рисунке А.1

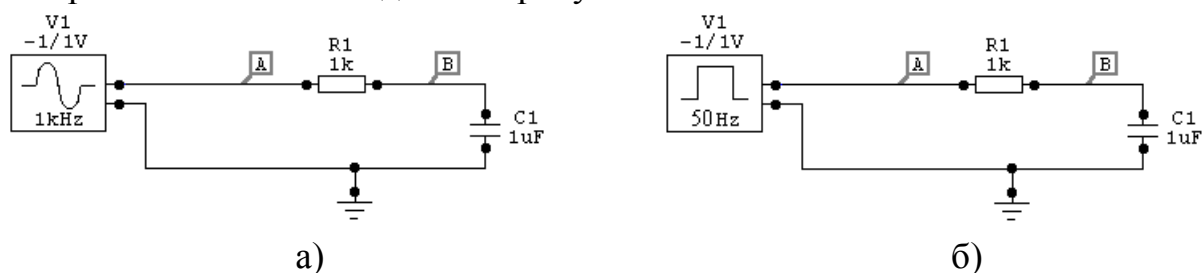


Рисунок А.1 – Примеры изображения схемы RC-цепи
а) – режим 1; б) – режим 2

А.3 Установка параметров симуляции схемы (режим 1)

А.3.1 Выбрать команду Simulation > Analyses Setup и в диалоговом окне Analyses Setup снять флажок в поле Always set defaults for transient and operating point analyses и установить флажки в полях Enabled: AC, Transient/Fourier и Multimeter (рисунок А.2).

А.3.2 Установить параметры графопостроителя (Bode Plot). Для этого в окне Analyses Setup нажать клавишу AC и в раскрывающемся окне AC Analyses Setup заполнить поля: Start Frequency; Stop Frequency и Test Points (например, для схемы, изображенной на рисунке А.1а), можно рекомендовать следующие установки: Start Frequency – 1.000 Hz; Stop Frequency – 5.000 kHz; Test Points – 1000). Установить переключатель Sweep в положение Linear.

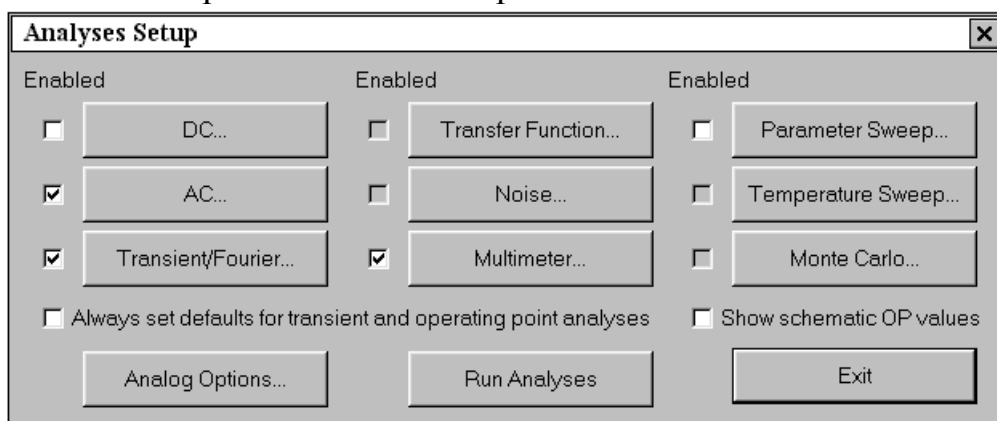


Рисунок А.2 – Вид диалогового окна Analyses Setup

А.3.3 Установить параметры осциллографа. Для этого в окне Analyses Setup нажать клавишу Transient/Fourier и в раскрывающемся окне Transient and Fourier Analyses Setup заполнить поля: Start Time, Stop Time, Step Time и Max. Step. По умолчанию устанавливаются следующие значения полей: Start Time – 0.000 S; Stop Time – 5.000 mS; Step Time – 20.00uS и Max. Step – 20.00uS (символ μ заменяет греческую букву μ и обозначает приставку «микро»). Значения шага времени (Step Time) и максимального шага (Max. Step) должны быть равны.

А.3.4 Установить параметры мультиметра. Для этого в окне Analyses Setup нажать клавишу Multimeter и в раскрывающемся окне Multimeter Setup установить переключатель в положение AC RMS (режим измерения действующего значения напряжения или тока).

А.3.5 Установить режим анализа аналоговых схем (Simulation > Analog Mode). Если установлен режим анализа цифровых схем (Digital Mode), то необходимо выбрать команду Simulation > Digital Mode. В результате пиктограмма  (Digital Mode) будет заменена пиктограммой  (Analog Mode).

А.4 Установка параметров симуляции схемы (режим 2)

А.4.1 Выбрать команду Simulation > Analyses Setup и в диалоговом окне Analyses Setup снять флажок в поле Always set defaults for transient and operating

point analyses и установить флажок в поле Enabled: Transient/Fourier (рисунок А.3).

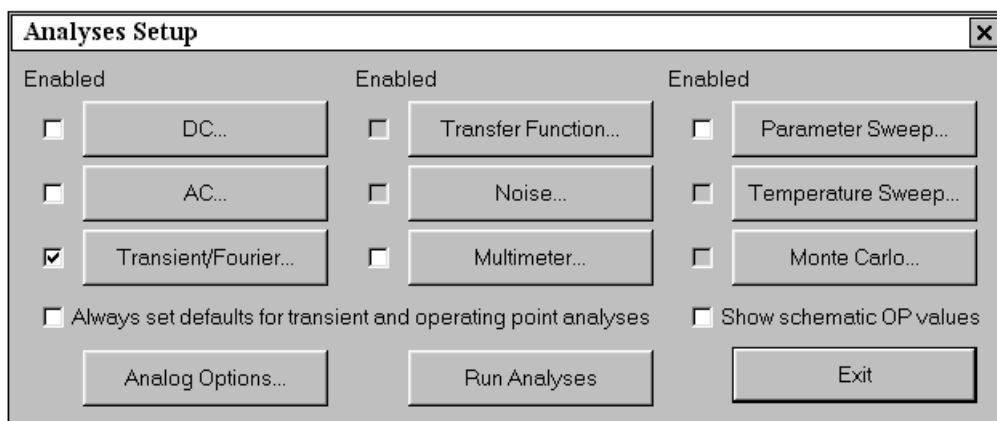


Рисунок А.3 – Вид диалогового окна Analyses Setup

А.4.2 Установить параметры осциллографа. Для этого в окне Analyses Setup нажать клавишу Transient/Fourier и в раскрывающемся окне Transient and Fourier Analyses Setup заполнить поля: Start Time, Stop Time, Step Time и Max. Step. По умолчанию устанавливаются следующие значения полей: Start Time – 0.000 S; Stop Time – 5.000 mS; Step Time – 20.00uS и Max. Step – 20.00uS (символ u заменяет греческую букву μ и обозначает приставку «микро»). Значения шага времени (Step Time) и максимального шага (Max. Step) должны быть равны.

А.4.3 Установить режим анализа аналоговых схем (Simulation > Analog Mode). Если установлен режим анализа цифровых схем (Digital Mode), то необходимо выбрать команду Simulation > Digital Mode. В результате пиктограмма  (Digital Mode) будет заменена пиктограммой  (Analog Mode).

А.5 Запуск программы симуляции (режим 1)

А.5.1 Запустить симуляцию схемы по команде Simulation> Run. После выполнения программы симуляции должны появиться три дополнительных окна: AC Analyses (Bode Plot), Transient Analyses (Oscilloscope) и Multimeter: AC RMS, а пиктограмма  будет заменена пиктограммой .

В окнах AC Analyses и Transient Analyses должны быть изображены АЧХ исследуемой цепи и соответствующие осциллограммы напряжений в контрольных точках, отмеченных в п.А.2.4. Для измерения действующих значений напряжений (токов) исследуемой цепи следует активизировать окно Multimeter и навести курсор - пробник в требуемую точку схемы (при перемещении пробника вдоль цепи в контуре его изображения должны поочередно появляться символы V, I и P). Добейтесь, чтобы в контуре пробника находился соответствующий символ (V – измерение напряжения, I – измерение тока, P – измерение мощности) и щелкните «мышью». В окне Multimeter появится значение измеренной величины с указанием ее размерности.

А.5.2 Выйти из режима симуляции по щелчку на пиктограмме .

А.6 Запуск программы симуляции (режим 2)

А.6.1 Запустить симуляцию схемы по команде Simulation> Run. После выполнения программы симуляции должно появиться дополнительное окно Transient Analyses (Oscilloscope), а пиктограмма  будет заменена пиктограммой .

В окне Transient Analyses должны быть изображены осциллограммы напряжений в контрольных точках, отмеченных в п.А.2.4.

А.6.2. Выйти из режима симуляции по щелчку на пиктограмме .

А.7 Параметрический анализ электрических цепей

А.7.1 С помощью программы CircuitMaker можно проводить параметрический анализ электрических цепей. Для этого необходимо установить дополнительный флажок в поле Enabled Parameter Sweep окна Analyses Setup (рисунок А.2) и нажать клавишу Parameter Sweep. В окне Parameter Sweep Setup заполнить соответствующие поля. На рисунках А.4 и А.5 дан пример заполнения полей окна Parameter Sweep Setup и приведены осциллограммы, полученные при параметрическом анализе схем, изображенных на рисунке А.1.

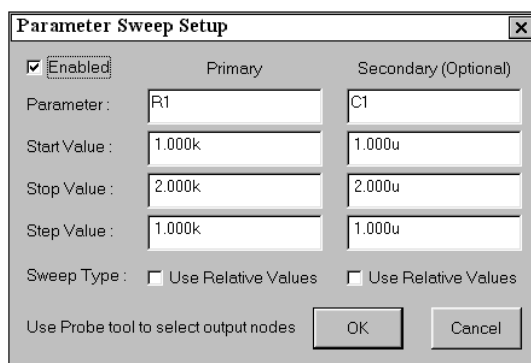
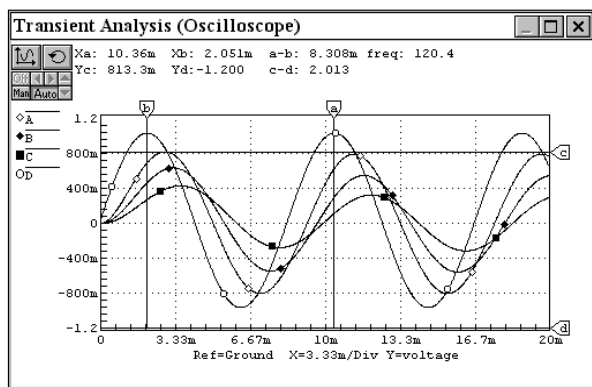
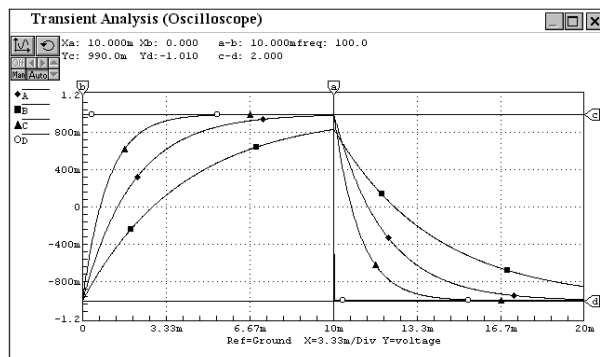


Рисунок А.4 – Пример заполнения окна параметрического анализа

Назначать начальное и конечное значения параметра и его шага следует осматрительно, учитывая, что увеличение общего числа характеристик приводит к пропорциональному увеличению времени симуляции схемы и затрудняет последующий анализ.



а)



б)

Рисунок А.5 – Осциллограммы в контрольных точках цепи (рисунок А.1), полученные при исследовании по параметрам R1, C1

А.6 Измерения с помощью осциллографа

А.6.1 Активизировать окно Transient Analysis (Oscilloscope).

А.6.2 Для измерения временных параметров осциллограмм используются курсоры а и b. Амплитудные значения измеряют с помощью курсоров с и d. Числовые значения измеряемых параметров, соответствующие положениям курсоров, размещаются в верхней части экрана осциллографа (рисунок А.5).

А.6.3 Для определения соответствия осциллограмм и параметров исследуемой цепи (в режиме параметрического анализа) необходимо выполнить следующие действия:

- щелкнуть «мышью» по условному обозначению осциллограммы в левой части экрана (яркость свечения осциллограммы возрастет, а ее условное обозначение будет выделено рамкой);
- щелкнуть правой кнопкой «мыши» по выделенному условному обозначению осциллограммы;
- в раскрывающемся меню выбрать Sweep Data (для снятия выделения осциллограммы выбрать Deselect Waveform);
- в окне Sweep Data считать значения параметров исследуемой цепи для выделенной строки.

А.6.4 Для увеличения масштаба изображения осциллограмм (выделение осциллограмм должно быть снято) необходимо навести курсор в некоторую точку экрана, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перемещать курсор в диагональном направлении, охватывая светящимся прямоугольным контуром ту часть осциллограммы, которую требуется увеличить. Отпустить кнопку «мыши» в намеченной точке.

А.6.5 Для восстановления первоначального изображения осциллограмм необходимо навести курсор на пиктограмму  панели управления, расположенной в верхнем левом углу экрана осциллографа и щелкнуть «мышью».

А.6.6 Измерение фазовых сдвигов осуществлять по методике, изложенной в п.4.3.

А.7 Измерения с помощью графопостроителя

А.7.1 Осуществляются в окне AC Analysis (Bode Plot). Отличие от осциллографа (п.А.6.) состоит в том, что курсоры а и b предназначены для определения значений частот, курсоры с и d - для определения значений переменных, устанавливаемых в окне Settings (см. п.А.7.2.). По умолчанию графопостроитель работает в режиме построения АЧХ (рисунок А.6).

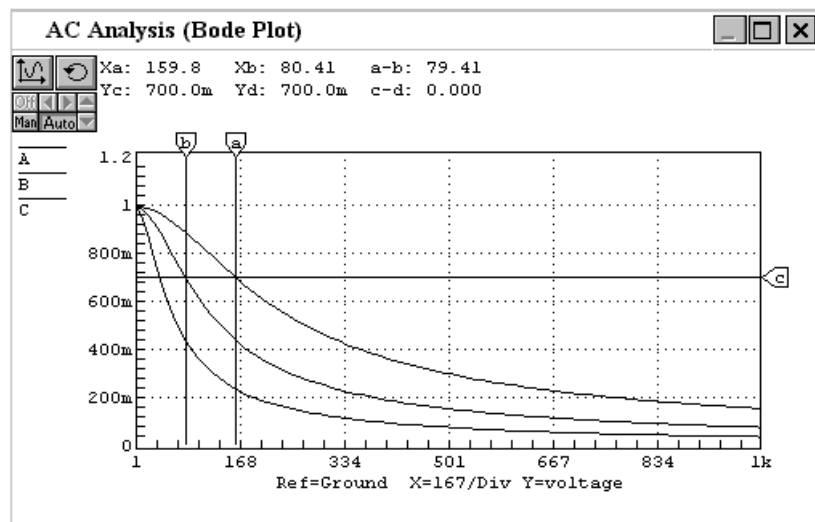


Рисунок А.6 – АЧХ цепи (рисунок А.1), полученные при исследовании по параметрам R1, C1

А.7.2 Для перевода графопостроителя в режим построения ФЧХ необходимо щелкнуть «мышью» по пиктограмме  панели управления, расположенной в верхнем левом углу экрана. В раскрывающемся окне Settings установить переключатель переменных вертикальной оси (Y axis) из положения Magnitude (амплитуда) в положение Phase in Degrees (фаза в градусах) или Phase in Radians (фаза в радианах).

Приложение Б
(информационное)
Уравнения АЧХ, ФЧХ и частот среза ЭЦ

$$K_{\text{расч}} = \frac{2\pi f R_2 \cdot C_1}{\sqrt{1 + (2\pi f R_2 \cdot C_1)^2}}; \quad (\text{Б.1})$$

Схема 20а

$$\varphi_{\text{расч}} = \arctg [1/(2\pi f R_2 \cdot C_1)]; \quad (\text{Б.2})$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}. \quad (\text{Б.3})$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f R_1 \cdot C_2)^2}}; \quad (\text{Б.4})$$

Схема 20б

$$\varphi_{\text{расч}} = -\arctg (2\pi f R_1 \cdot C_2); \quad (\text{Б.5})$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_2}. \quad (\text{Б.6})$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{2\pi f R_2 \cdot C_1}{\sqrt{1 + [2\pi f (R_1 + R_2) \cdot C_1]^2}}; \quad (\text{Б.7})$$

Схема 20в

$$\varphi_{\text{расч}} = \arctg \left[\frac{1}{2\pi f (R_1 + R_2) C_1} \right]; \quad (\text{Б.8})$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi (R_1 + R_2) C_1}. \quad (\text{Б.9})$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 + C_2/C_1 \right) \right]^2 + \left(2 \pi f R_1 \cdot C_2 \right)^2}}; \quad (\text{Б.10})$$

Схема
20Г

$$\varphi_{\text{расч}} = -\arctg \left[\frac{2 \pi f R_1 \cdot C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right]; \quad (\text{Б.11})$$

$$f_c = \frac{C_1 + C_2}{2 \pi R_1 \cdot C_1 \cdot C_2}. \quad (\text{Б.12})$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + C_2/C_1 \right)^2 + \left(2 \pi f R_2 \cdot C_1 \right)^2}}; \quad (\text{Б.13})$$

Схема
20Д

$$\varphi_{\text{расч}} = \arctg \frac{1}{2 \pi f R_2 (C_1 + C_2)}; \quad (\text{Б.14})$$

$$f_c = \frac{1}{2 \pi R_2 (C_1 + C_2)}. \quad (\text{Б.15})$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + R_1/R_2 \right)^2 + \left(2 \pi f R_1 \cdot C_2 \right)^2}}; \quad (\text{Б.16})$$

Схема
20е

$$\varphi_{\text{расч}} = -\arctg \frac{2 \pi f R_1 \cdot R_2 \cdot C_2}{R_1 + R_2}; \quad (\text{Б.17})$$

$$f_c = \frac{R_1 + R_2}{2 \pi R_1 \cdot R_2 \cdot C_2}. \quad (\text{Б.18})$$

Приложение В
(информационное)
Параметры элементов блока нагрузок

Таблица В.1 – Параметры R-, L-, C - элементов блока нагрузок макета УМ-16

Тип элемента	Параметры элемента										
Резистор	Номинальное сопротивление, кОм										
	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	22	33	47	100
Катушка индуктивности	Номинальная индуктивность, мкГн										
	1	5	10	25	50	100	200	280	355	450	500
Конденсатор	Номинальная емкость, пФ										
	33	47	100	220	470	1000	1500	2200	3300	6800	10000

Приложение Г
(информационное)
Преобразования Лапласа

Таблица Г.1 – Основные операции преобразований Лапласа и примеры соответствия оригиналов их изображениям

Оригинал	Изображение	Примечание
$f'(t)$	$pF(p) - f(0_+)$ (Г.1)	Дифференцирование
$\int_0^t f(t)dt$	$\frac{F(p)}{p}$ (Г.2)	Интегрирование
$f(at) \quad (a > 0)$	$\frac{1}{a} F\left(\frac{p}{a}\right)$ (Г.3)	Изменение масштаба
$f(t-b) \quad (b > 0)$	$e^{-bp} F(p)$ (Г.4)	Сдвиг аргумента у оригинала (при $t \leq 0 \quad f(t) = 0$)
$\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)$	$\alpha F_1(p) + \beta F_2(p)$ (Г.5)	Линейность (α, β - постоянные)
$A = const$	$\frac{A}{p}$ (Г.6)	
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p + \alpha}$ (Г.7)	
$Ae^{\alpha t}$	$\frac{A}{p - \alpha}$ (Г.8)	
$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{p(p + \alpha)}$ (Г.9)	
$sh \alpha t$	$\frac{\alpha}{p^2 - \alpha^2}$ (Г.10)	
$ch \alpha t$	$\frac{p}{p^2 - \alpha^2}$ (Г.11)	
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$ (Г.12)	
$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$ (Г.13)	

Приложение Д
(обязательное)

Уравнения переходных характеристик ЭЦ

Таблица Д.1 – Соответствие оригиналов и изображений переходных характеристик ЭЦ

Схема ЭЦ	Изображение $H(p)$	Оригинал $h(t)$	Примечание
20а	$\frac{1}{p + \alpha}$	$e^{-\alpha t}$ (Д.1)	$\tau = R2 \cdot C1$ ($A = 1$)
20б	$\frac{\alpha}{p(p + \alpha)}$	$1 - e^{-\alpha t}$ (Д.2)	$\tau = R1 \cdot C2$ ($A = 1$)
20в	$\frac{A}{p + \alpha}$	$A \cdot e^{-\alpha t}$ (Д.3)	$\tau = C1(R1 + R2);$ $A = \frac{R2}{R1 + R2}$
20г	$\frac{A \cdot \alpha}{p(p + \alpha)}$	$A \cdot (1 - e^{-\alpha t})$ (Д.4)	$\tau = \frac{R1 \cdot C1 \cdot C2}{C1 + C2};$ $A = \frac{C1}{C1 + C2}$
20д	$\frac{A}{p + \alpha}$	$A \cdot e^{-\alpha t}$ (Д.5)	$\tau = R2 \cdot (C1 + C2);$ $A = \frac{C1}{C1 + C2}$
20е	$\frac{A \cdot \alpha}{p(p + \alpha)}$	$A \cdot (1 - e^{-\alpha t})$ (Д.6)	$\tau = \frac{R1 \cdot R2 \cdot C2}{R1 + R2};$ $A = \frac{R2}{R1 + R2}$
20ж	$\frac{\omega_0^2}{p(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)}$	$1 + \frac{\omega_0^2}{p_2 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_2 t} -$ $-\frac{\omega_0^2}{p_3 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_3 t}$ (Д.7)	$\delta = \frac{R}{2L};$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$ $p_2 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$ $p_3 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$
20з	$\frac{\omega_0^2}{p(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)}$	$1 + \frac{\omega_0^2}{p_2 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_2 t} -$ $-\frac{\omega_0^2}{p_3 \cdot 2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{p_3 t}$ (Д.8)	$\delta = \frac{1}{2RC};$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$ $p_2 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$ $p_3 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$
Примечание $-\alpha = \frac{1}{\tau}$.			

