

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
к лабораторным работам по курсу
«Теория линейных схем»

Донецк, ДонНУ
2011

УДК 621.38

Методические материалы к лабораторным работам по курсу «Теория линейных схем» / Сост.: А.Ю. Липинский, А.Н. Рудякова. – Донецк: ДонНУ, 2011. – 36 с.

Приведены краткие теоретические сведения, а также указания по ходу выполнения и требуемой отчетности лабораторных работ по курсу «Теория линейных схем» для студентов специальности «Радиофизика и электроника».

Составители:

А.Ю. Липинский, доцент
А.Н. Рудякова, доцент

Рекомендовано к изданию
Ученым советом физического факультета ДонНУ
(протокол №10 от 24 июня 2011 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Исследование элементов электрических цепей.....	2
Лабораторная работа №2. Исследование переходных процессов	8
Лабораторная работа №3. Свободные колебания в последовательном LCR-контуре	12
Лабораторная работа №4. Переходные характеристики электрических цепей	18
Лабораторная работа №5. Частотные характеристики элементов последовательного колебательного контура.....	22
Лабораторная работа №6. Частотные характеристики параллельного колебательного контура.....	29
Вопросы к зачету.....	35

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

Цель

1. Анализ вольтамперных характеристик пассивных двухполюсников резистивного типа.
2. Анализ характеристик управляемых источников энергии.
3. Анализ процессов в конденсаторе и катушке индуктивности.

Исследуемые элементы

Источники постоянной ЭДС

Источники постоянного тока

Источники гармонической ЭДС

Источники гармонического тока

Источник ЭДС, управляемый напряжением

Источник тока, управляемый напряжением

Источник ЭДС, управляемый током

Источник тока, управляемый током

Резисторы

Конденсаторы

Катушки индуктивности

Блок конденсатора с неизвестной ёмкостью

Блок катушки с неизвестной индуктивностью

Приборы и вспомогательные элементы

Амперметры

Вольтметры

Осциллограф

Блок ваттметра

Ключи, управляемые с клавиатуры

Блок источника ЭДС с заданной формой выходного напряжения

Блоки источников тока с заданной формой выходного тока

Умножитель напряжений

Краткие сведения из теории

Элементы электрической цепи можно разделить на элементы, генерирующие энергию (источники питания, активные элементы), элементы, преобразующие электромагнитную энергию в другие формы энергии (резистивные элементы), и элементы, запасающие и отдающие энергию (реактивные элементы). Свойства первых двух групп элементов можно описывать зависимостями тока через них от напряжения (вольтамперными характеристиками). Исследовать их свойства можно, применяя сигналы, не изменяющиеся во времени. Токи и напряжения в реактивных элементах связаны интегро-дифференциальными зависимостями, и для исследования их свойств необходимо генерировать изменяющиеся во времени сигналы.

Независимые идеальные источники питания

Простейшими источниками питания в электротехнике являются идеальные источники тока и напряжения. Они имеют бесконечно большую мощность. Свойства и обозначения основных типов идеальных источников (активных двухполюсников), использующихся в электротехнике и имеющихся в Workbench, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Обозначения и свойства двухполюсных идеальных источников питания

Типы источников	Ток	Напряжение	Обозначения		
			Российский стандарт	Стандарт США (применяется в Workbench)	Немецкий стандарт (применяется в Workbench)
Идеальный источник постоянной ЭДС	зависит от нагрузки	неизменное		12V	12V
Идеальный источник постоянного тока	неизменный	зависит от нагрузки		1A	1A
Идеальный источник гармонической ЭДС	зависит от нагрузки	гармоническое с неизменной амплитудой и фазой		1A/1Hz/0Deg	220V/50Hz/0Deg
Идеальный источник гармонического тока	гармонический с неизменной амплитудой и фазой	зависит от нагрузки		1A/1Hz/0Deg	~ 1A/1Hz/0Deg

Таблица 1.2. Обозначения и свойства управляемых (четырехполюсных) идеальных источников питания

Типы зависимых идеальных источников	Ток	Напряжение	Коэффициент передачи K_P	Обозначения	
				Стандарт США (применяется в Workbench)	Немецкий стандарт (применяется в Workbench)
Источник ЭДС, управляемый напряжением	зависит от нагрузки	определяется входным напряжением и K_P	Безразмерный $K_P = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$	1V/V	1V/V
Источник тока, управляемый напряжением	определяется входным напряжением и K_P	зависит от нагрузки	Проводимость $K_P = I_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$	1mho	1mho
Источник ЭДС, управляемый током	зависит от нагрузки	определяется входным током и K_P	Сопротивление $K_P = U_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$	1Ω	1Ω
Источник тока, управляемый током	определенается входным током и K_P	зависит от нагрузки	Безразмерный $K_P = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$	1A/A	1A/A

Таблица 1.3. Обозначения и свойства резисторов

Типы источников	Величина тока	Величина напряжения	Обозначения		
			Российский стандарт	Стандарт США (применяется в Workbench)	Немецкий стандарт (применяется в Workbench)
Резистор	$I = U \cdot G$ $I = U/R$	$U = I \cdot R$ $U = I/G$		1Ω	1kΩ

Зависимые источники питания

Зависимые источники питания представляются четырехполюсниками и являются идеальными источниками питания, управляемыми входным сигналом тока или напряжения. При этом величина выходного напряжения или тока в каждый момент времени определяется мгновенным значением входного управляющего сигнала и

коэффициентом передачи четырехполюсника в соответствии с табл. 1.2.

Резистор

Вольтамперная характеристика линейного резистора выражается законом Ома, который и является для этого элемента компонентным уравнением (табл. 1.3.).

Неидеальный источник напряжения.

Этот источник напряжения представляет собой блок, который составляется из двух описанных элементов: идеального источника ЭДС и последовательно с ним включенного резистора (рис. 1.1-а).

Неидеальный источник тока.

Неидеальный источник тока представляет собой блок, который составляется из двух описанных элементов: идеального источника тока и параллельно с ним включенного резистора (рис. 1.1-б).

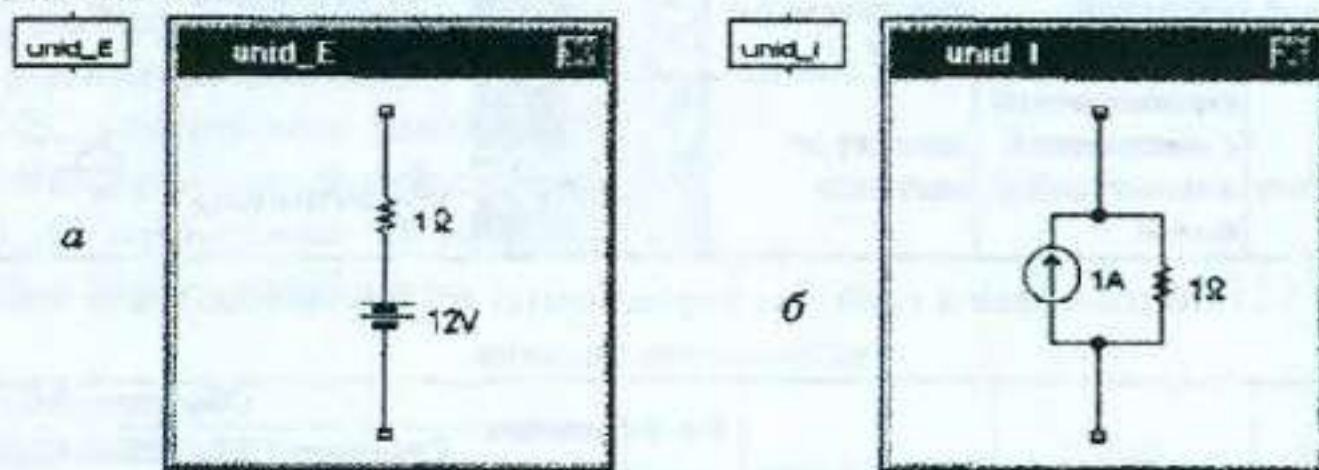


Рис. 1.1

Конденсатор и катушка индуктивности.

Интегро-дифференциальные соотношения, определяющие связь между токами и напряжениями и величину запасаемой энергии в реактивных элементах, приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Обозначения и свойства конденсаторов и катушек индуктивности

Элемент	Зависимость тока от напряжения	Зависимость напряжения от тока	Зависимость для накопленной энергии	Общее обозначение для всех стандартов
Конденсатор С	$i_c(t) = C \frac{du_c}{dt}$	$u_c(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) d\tau$	$W_c = \frac{u_c^2 \cdot C}{2}$	
Катушка индуктивности L	$i_L(t) = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\tau) d\tau$	$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}$	$W_L = \frac{i_L^2 \cdot L}{2}$	

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Вольтамперные характеристики резистора.

а). Снятие вольтамперных характеристик с помощью амперметра и вольтметра. Откройте файл lab_1_1a.ewb (рис. 1.2). Установите номиналы сопротивлений для любых двух резисторов в 100 и 200 Ом. Снимите вольтамперную характеристику поочередно для каждого из сопротивлений, используя амперметр и вольтметр и подключая к этим резисторам различные источники ЭДС. Постройте вольтамперные характеристики резисторов в разделе "Результаты экспериментов".

б). Снятие вольтамперных характеристик с помощью осциллографа. Откройте файл lab_1_1b.ewb (рис. 1.3). Получите те же характеристики, используя осциллограф в режиме

характериографа. Характеристика первого сопротивления снимается при запуске программы вычислений, второго - при переключении ключа Space. Вычислите значения сопротивлений по вольтамперным характеристикам.

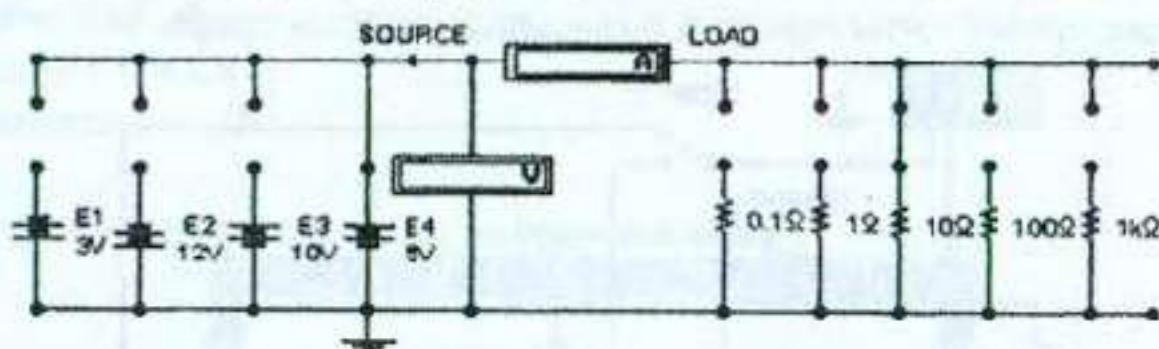


Рис. 1.2

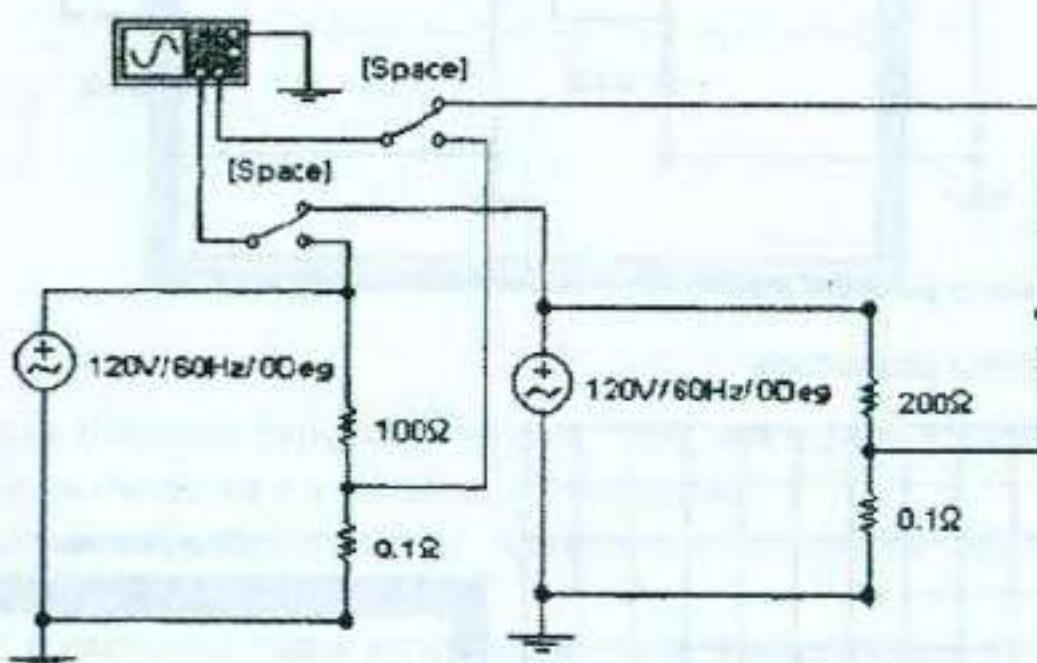


Рис. 1.3

Эксперимент 2. Исследование процессов в катушке индуктивности.

Соотношения между током и напряжением в катушке индуктивности исследуются при подаче последовательности разнополярных прямоугольных импульсов напряжения.

Откройте файл lab_1_2.ewb (рис. 1.4). Получите осциллограммы тока и напряжения на катушке индуктивности. Зарисуйте их в разделе "Результаты экспериментов". Из осциллограмм определите величину индуктивности, используя формулы из табл. 1.4.

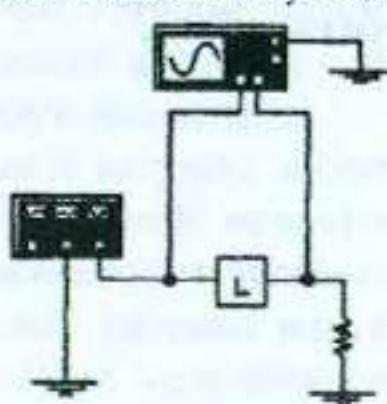


Рис. 1.4

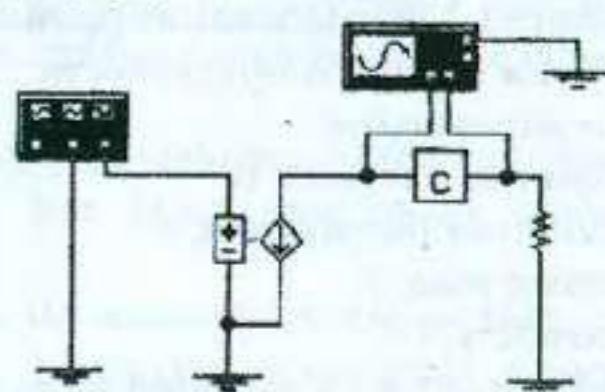


Рис. 1.5

Эксперимент 3. Исследование процессов в конденсаторе.

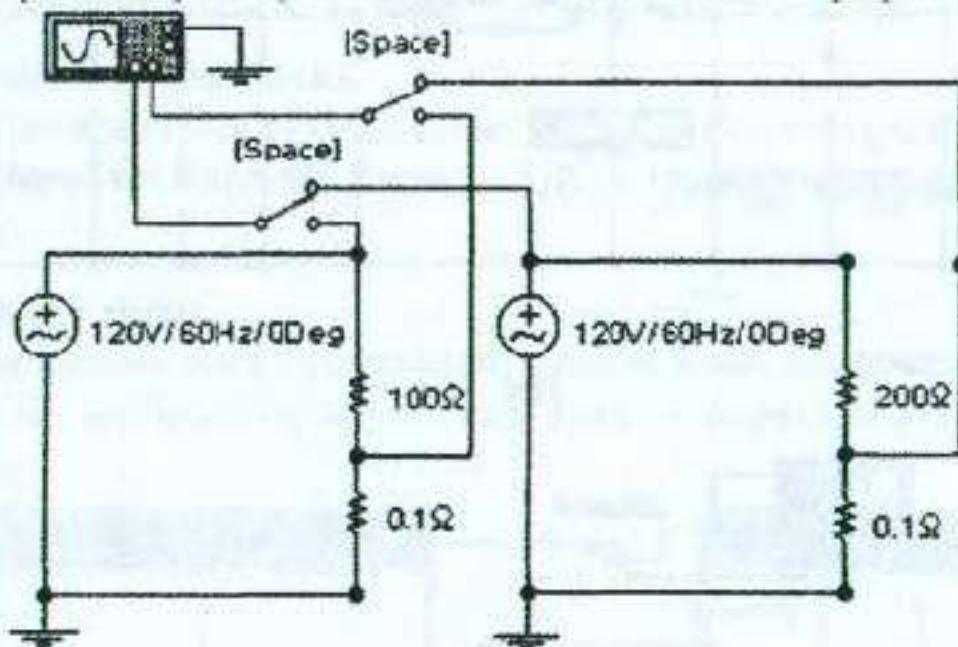
Соотношения между током и напряжением в конденсаторе исследуются при подаче последовательности разнополярных прямоугольных импульсов тока.

Откройте файл lab_1_3.ewb (рис. 1.5). Получите осциллограммы тока и напряжения на конденсаторе. Зарисуйте их в разделе "Результаты экспериментов". Из осциллограмм определите величину емкости конденсатора, используя формулы из табл. 1.4.

Результаты экспериментов

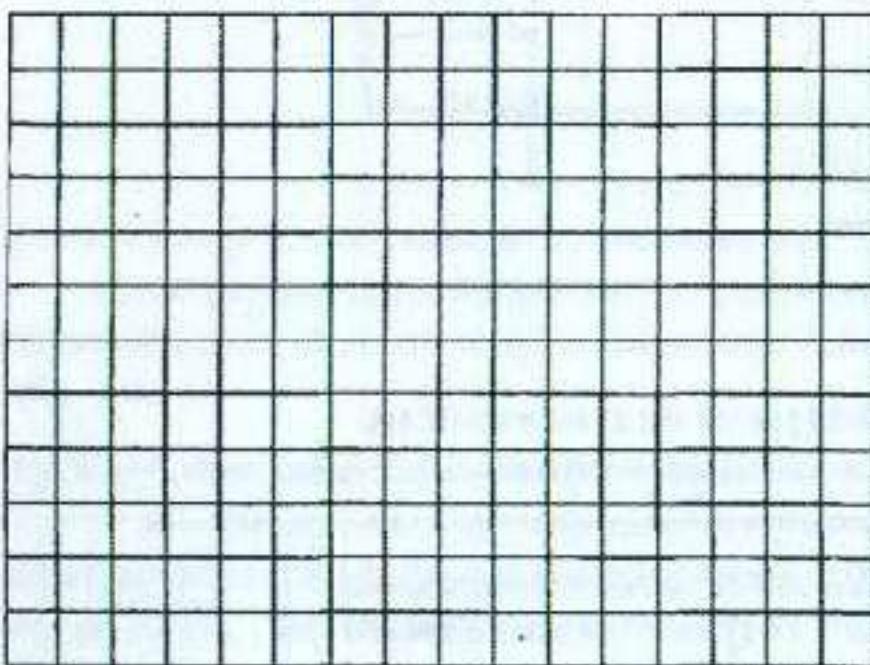
Эксперимент 1. Вольтамперные характеристики резисторов.

а). Снятие вольтамперных характеристик с помощью осциллографа

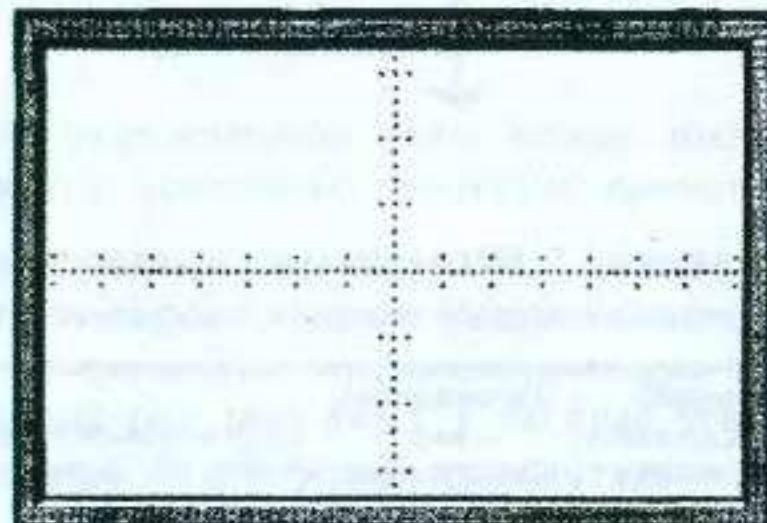


Сопротивление первого резистора

Сопротивление второго резистора



Семейство характеристик



Эксперимент 2. Исследование процессов в катушке индуктивности.

Формула для расчета индуктивности:

Значения параметров:

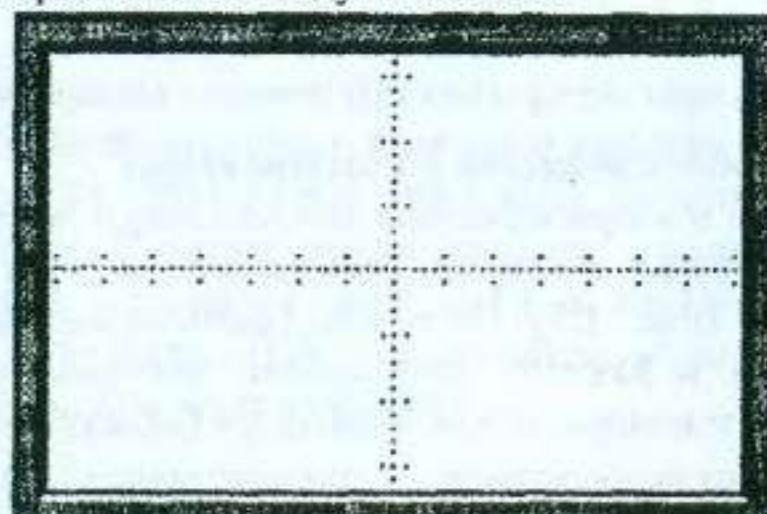
Напряжение на катушке, В

Время действия напряжения, с

Приращение тока, А

Индуктивность, Гн

Осциллограмма тока и напряжения на индуктивности:



Эксперимент 3. Исследование процессов в конденсаторе.

Формула для расчета индуктивности

Значения параметров

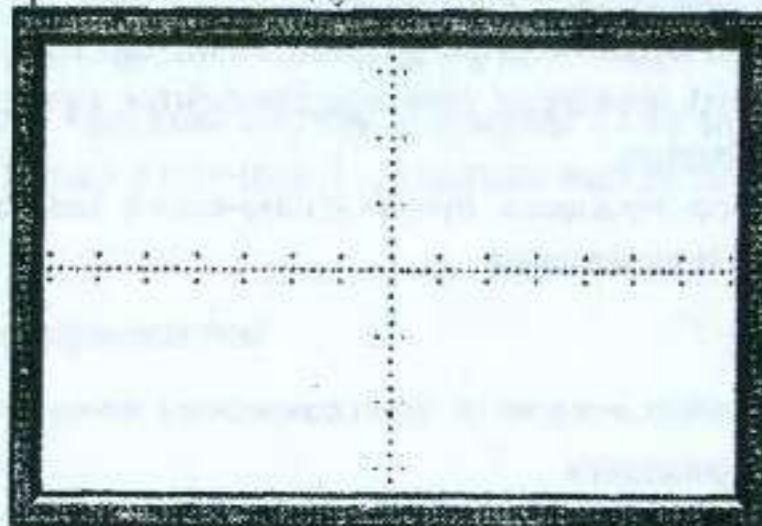
Ток через конденсатор, А

Время прохождения тока, с

Приращения напряжения, В

Емкость, Ф

Осциллограмма тока и напряжения на индуктивности:



Вопросы

1. Перечислите все возможные типы источников ЭДС, имеющиеся в программе Electronics Workbench. Каковы их свойства и условные обозначения?
2. Чему равно внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС и как его определить?
3. Перечислите все возможные типы источников тока, имеющиеся в программе Electronics Workbench. Каковы их свойства и условные обозначения?
4. Чему равно внутреннее сопротивление идеального источника тока и как его определить?
5. Чем отличаются неидеальные источники энергии от идеальных?
6. Как осуществить эквивалентное преобразование неидеального источника напряжения в неидеальный источник тока и обратное преобразование?
7. Представьте все возможные виды вольтамперных характеристик исследованных активных и пассивных двухполюсников. В чем их различия?
8. К идеальной катушке индуктивности с нулевым начальным значением тока подключается идеальный источник постоянной ЭДС. Как из графика тока в катушке определить величину индуктивности?
9. К идеальной катушке индуктивности с ненулевым начальным значением тока подключается идеальный источник постоянной ЭДС. Как будет изменяться график при изменении величины начального тока?
10. К идеальной катушке индуктивности с нулевым начальным значением тока подключается идеальный источник синусоидальной ЭДС. Нарисуйте временные зависимости тока в индуктивности при различных начальных фазах подключения источника ЭДС.
11. К идеальному конденсатору с нулевым начальным напряжением подключается источник постоянного тока. Как из графика напряжения на конденсаторе определить величину емкости?
12. К идеальному конденсатору с ненулевым начальным напряжением подключается источник постоянного тока. Нарисуйте временные зависимости напряжения на конденсаторе при различных значениях начального напряжения.
13. К идеальному конденсатору с нулевым начальным значением напряжения подключается идеальный источник синусоидального тока. Нарисуйте временные зависимости напряжения на конденсаторе при различных начальных фазах подключения источника тока.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

«ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В LR- И RC-ЦЕПЯХ»

Цель

1. Исследование переходного процесса при подключении конденсатора к неидеальному источнику постоянного напряжения.
2. Исследование переходного процесса при разряде конденсатора на сопротивление.
3. Исследование переходного процесса при подключении катушки индуктивности с начальным током на сопротивление.
4. Исследование переходного процесса при подключении конденсатора к неидеальному источнику синусоидального напряжения.

Приборы и элементы

Осциллограф

Источники постоянного напряжения

Источники постоянного тока

Резисторы

Конденсаторы

Катушки индуктивности

Краткие сведения из теории

Разряд конденсатора через резистор.

Если конденсатор емкостью C , заряженный до напряжения U_{C0} , разряжается через резистор R , то процесс в соответствии со вторым законом Кирхгофа описывается уравнением:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0, \quad (2.1)$$

где u_C - напряжение на конденсаторе. Решение этого уравнения записывается в виде:

$$u_C(t) = U_{C0} e^{-\frac{t}{RC}} = U_{C0} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.2)$$

где $\tau = RC$.

Подключение конденсатора к неидеальному источнику постоянной ЭДС.

При подключении конденсатора емкостью C , заряженного до напряжения U_{C0} , к источнику неидеальной ЭДС процесс описывается уравнением:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (2.3)$$

Решение уравнения:

$$u_C(t) = E - (E - U_{C0}) e^{-\frac{t}{RC}} = E - (E - U_{C0}) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.4)$$

Отметим, что формула (2.2) является частным случаем формулы (2.4) при условии $E=0$.

Подключение катушки индуктивности с начальным током к резистору.

Если катушка с индуктивностью L , в которой протекает ток I_{L0} , подключается к резистору R , то процесс описывается уравнением:

$$L \frac{di_L}{dt} + i_L R = 0, \quad (5)$$

где i_L - ток через индуктивность.

Решение этого уравнения записывается в виде:

$$i_L(t) = I_{L0} e^{-\frac{Rt}{L}} = I_{L0} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6)$$

где $\tau = L/R$.

Подключение катушки индуктивности к неидеальному источнику постоянной ЭДС

При подключении катушки индуктивности к источнику неидеальной ЭДС процесс в соответствии со вторым законом Кирхгофа описывается уравнением:

$$L \frac{di_L}{dt} + i_L R = E. \quad (2.7)$$

Решение этого уравнения записывается в виде:

$$i_L(t) = \frac{E}{R} - \left(\frac{E}{R} - I_{L0} \right) e^{-\frac{Rt}{L}} = \frac{E}{R} - \left(\frac{E}{R} - I_{L0} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.8)$$

Формула (2.8) - это также частный случай формулы (2.6) при $E=0$, следовательно, для расчета переходных процессов в случаях 1...4 можно всегда использовать формулы (2.4) и (2.8).

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Подключение конденсатора к неидеальному источнику постоянной ЭДС

Откройте файл lab_2_1.cwb (рис. 2.1). Рассчитайте временные зависимости напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и тока через него $i_C(t)$ при подключении RC-цепи к источнику постоянной ЭДС (рис. 2.1). Подключение производится переключением ключа [Space]. Получите осцилограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$. По осцилограммам определите $I_C(0+)$, $U_C(0)$ и постоянную времени τ . Сравните их с расчетными значениями.

Примечание: поскольку параметры двух ветвей на рис. 2.1 одинаковы, процессы в них идентичны, то можно получить на одном из входов осциллографа напряжение на конденсаторе, а на другом - напряжение на резисторе, пропорциональное току через конденсатор.

Эксперимент 2. Разряд конденсатора через резистор

Рассчитайте временные зависимости напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и тока через него $i_C(t)$ при закорачивании RC-цепи переключением ключа [Space].

Получите осцилограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$. По осцилограммам определите $I_C(0+)$, $U_C(0)$ и постоянную времени τ . Сравните их с расчетными значениями. $I_C(0+)$ - ток через конденсатор непосредственно после коммутации.

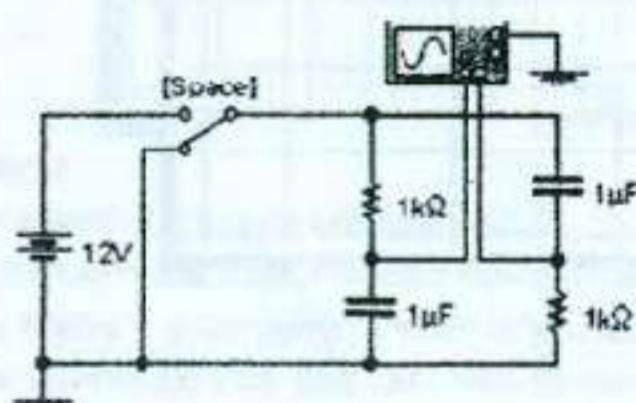


Рис. 2.1

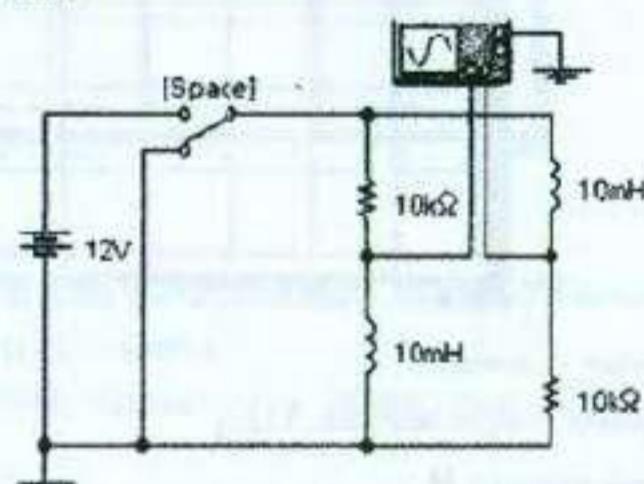


Рис. 2.2

Эксперимент 3. Подключение катушки индуктивности к неидеальному источнику постоянной ЭДС

Откройте файл lab_2_2.ewb (рис. 2.2). Рассчитайте временные зависимости напряжения на катушке $u_L(t)$ и тока через нее $i_L(t)$ при подключении RL-цепи к источнику постоянной ЭДС (рис. 2.2). Подключение производится переключением ключа [Space].

Получите осцилограммы $u_L(t)$ и $i_L(t)$. По осцилограммам определите $I_L(0)$,

$U_L(0+)$ и постоянную времени τ . Сравните их с расчетными значениями.

Эксперимент 4. Подключение катушки индуктивности с начальным током к резистору

Рассчитайте временные зависимости тока через катушку $i_L(t)$ и напряжения на ней $u_L(t)$ при закорачивании RL -цепи переключением ключа [Space].

Получите осциллограммы $i_L(t)$ и $u_L(t)$. По осциллограммам определите $I_L(0)$, $U_L(0+)$ и постоянную времени τ . Сравните их с расчетными значениями. $U_L(0+)$ - напряжение на катушке непосредственно после коммутации. (Смотри примечание к эксперименту 1).

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Подключение конденсатора к неидеальному источнику постоянной ЭДС

Исходные данные:

ЭДС

Начальное напряжение U_{C0}

Сопротивление R

Емкость C

Значение начального напряжения U_{C0}

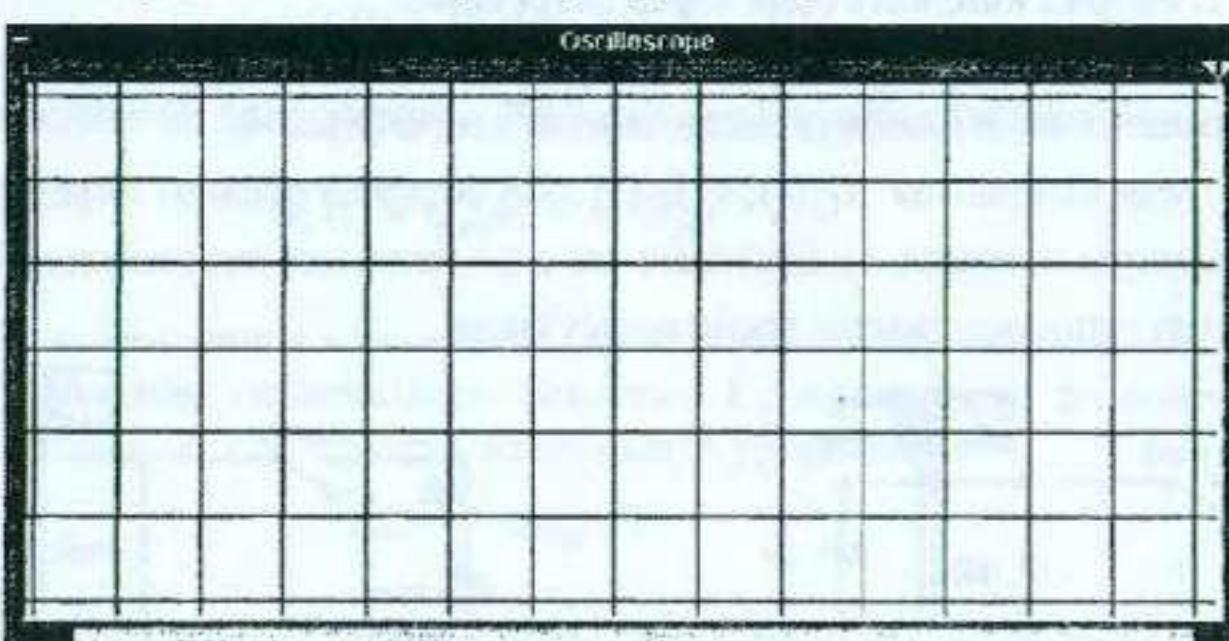
Значение начального тока $I_C(0+)$

VA1 =

VA2 =

Постоянная времени τ

Эксперимент 2. Разряд конденсатора через резистор



Исходные данные:

Начальное напряжение U_{C0}

Сопротивление R

Емкость C

Значение начального напряжения U_{C0}

Значение начального тока $I_C(0+)$

VA1 =

VA2 =

Постоянная времени τ

Эксперимент 3. Подключение катушки индуктивности к неидеальному источнику постоянной ЭДС

Исходные данные:

Начальный ток I_{L0}

Сопротивление R

Индуктивность L

Значение начального тока I_{L0}

Значение начального напряжения $U_{L0}(0+)$

VA1 =

VA2 =

Постоянная времени τ

Эксперимент 4. Подключение катушки индуктивности с начальным током к резистору

Исходные данные:

Начальный ток I_{L0}

Сопротивление R

Индуктивность L

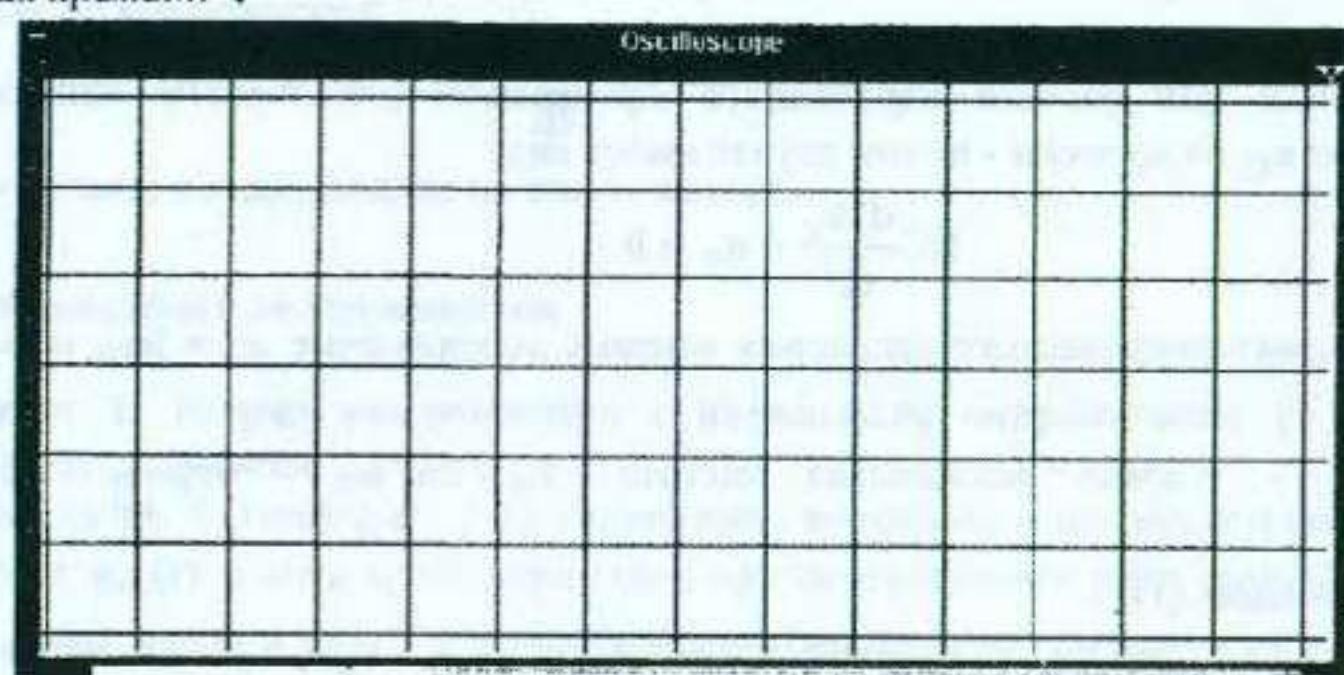
Значение начального тока I_{L0}

Значение начального напряжения $U_{L0}(0+)$

VA1 =

VA2 =

Постоянная времени τ



Вопросы

1. Что такое переходный процесс?
2. Возникают ли переходные процессы при коммутации в резистивных схемах? Почему?
3. Что такое характеристическое уравнение и как его составить?
4. Как вычисляется постоянная времени переходного процесса в резистивных схемах с одним конденсатором?
5. Как вычисляется постоянная времени переходного процесса в резистивных схемах с одной катушкой индуктивности?
6. Как по графику переходного процесса для схем с одним реактивным элементом измерить постоянную времени?
7. Свободные колебания в цепи из индуктивности и активного сопротивления.
8. Свободные колебания в цепи из емкости и активного сопротивления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ LCR-КОНТУРЕ»

Цель

- Исследование процесса разряда конденсатора на катушку индуктивности при отсутствии потерь в контуре.
- Исследование процесса разряда конденсатора на катушку индуктивности при высокой добротности контура (колебательный разряд).
- Исследование процесса разряда конденсатора на катушку индуктивности при низкой добротности контура (апериодический разряд).

Приборы и элементы

Осциллограф

Реле времени

Умножитель напряжений

Источники постоянной ЭДС

Резисторы

Конденсаторы

Катушки индуктивности

Краткие сведения из теории

Разряд конденсатора с начальным напряжением U_{C0} на идеальную катушку индуктивности ($R = 0$).

Уравнение для расчета переходного процесса - зависимости напряжения на конденсаторе u_C от времени - в этом случае имеет вид:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = 0 \quad (3.1)$$

Корни его характеристического уравнения мнимые сопряженные $p_1 = j\omega_0$ и $p_2 = -j\omega_0$, где

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - угловая резонансная частота, $T_0 = 2\pi/\omega_0$ - период собственных колебаний.

Решение уравнения (1):

$$u_C(t) = U_{C0} \cos \omega_0 t. \quad (3.2)$$

Ток в контуре определяется из выражения:

$$i(t) = -\frac{U_{C0}}{\rho} \sin \omega_0 t, \quad (3.3)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ - волновое сопротивление контура, U_{C0} - начальное напряжение на конденсаторе.

Разряд конденсатора на катушку индуктивности при высокой добротности контура (колебательный разряд, $2R < \rho$).

Переходный процесс при подключении заряженного конденсатора к последовательной RL-цепочке отображается уравнением:

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i = 0, \quad (3.4)$$

где i - ток в RLC контуре.

Корни его характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j\omega_{CB}. \quad (3.5)$$

где $\omega_{CB} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - частота свободных колебаний, $T_{CB} = 2\pi/\omega_{CB}$ - период свободных колебаний, $\delta = R/2L$, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Решение уравнения (3.4):

$$i(t) = \frac{-U_{C0}}{\omega_{CB} L} e^{-\delta t} \sin \omega_{CB} t. \quad (3.6)$$

Напряжение на конденсаторе:

$$u_C(t) = \frac{\omega_0}{\omega_{CB}} U_{C0} e^{-\delta t} \sin (\omega_{CB} t + \phi), \quad (3.7)$$

где $\operatorname{tg}\phi = \omega_{CB}/\delta$, U_{C0} - начальное напряжение на конденсаторе.

Разряд конденсатора на катушку индуктивности при низкой добротности контура (апериодический разряд, $2R > \rho$).

Процесс также отображается уравнением (3.4), но не носит колебательного характера. Поэтому величину β нельзя связать с частотой колебаний.

$$\beta = \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Корни характеристического уравнения являются действительными отрицательными и вычисляются из выражения: $p_{1,2} = -\delta \pm \beta$. Решение уравнения (3.4) в этом случае:

$$i(t) = \frac{-U_{C0}}{2\beta L} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (3.8)$$

Напряжение на конденсаторе:

$$u_C(t) = \frac{-U_{C0}}{2\beta} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}), \quad (3.9)$$

где U_{C0} - начальное напряжение на конденсаторе.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Разряд конденсатора с начальным напряжением на идеальную катушку индуктивности.

Откройте файл lab_3_1.ewb (рис. 3.1). Рассчитайте временные зависимости напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и тока $i_C(t)$ через него при переключении реле времени. Получите осциллограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$ и зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите величины T_0 и ρ . Сравните их с расчетными значениями.

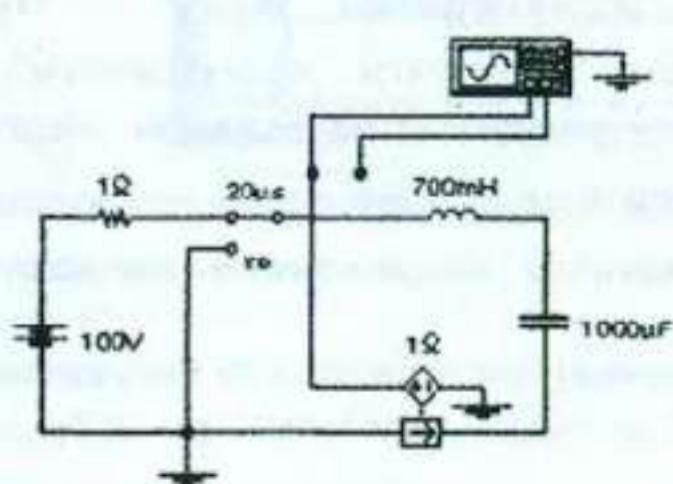


Рис. 3.1

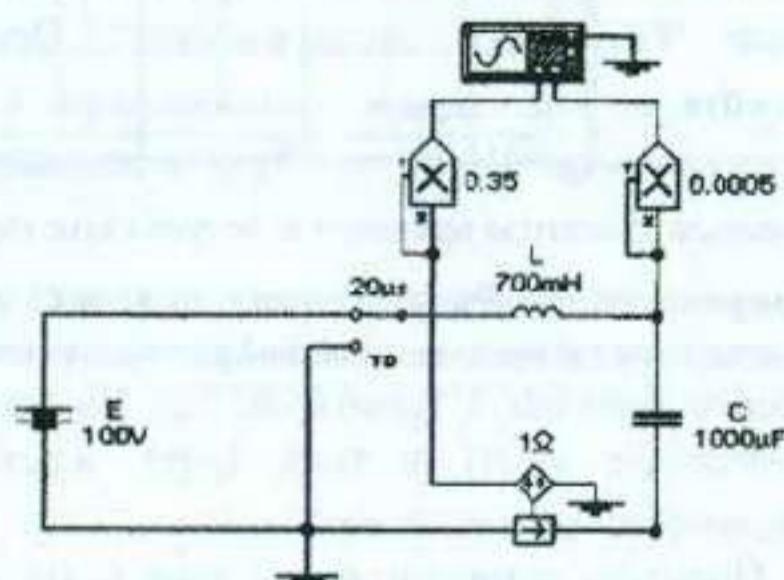


Рис. 3.2

Эксперимент 2. Энергетические соотношения при разряде конденсатора с начальным напряжением на идеальную катушку индуктивности.

Откройте файл lab_3_2.ewb (рис. 3.2). Рассчитайте энергию в конденсаторе W_C и энергию в катушке индуктивности W_L для моментов времени $t = 0, T_0/8, T_0/4, 3T_0/8, T_0/2, 5T_0/8, 3T_0/4, 7T_0/8, T_0$. Время отсчитывается от момента переключения реле. Результаты расчета занесите в соответствующую таблицу в разделе "Результаты экспериментов". Получите осциллограммы $W_C(t)$ и $W_L(t)$, зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам $W_C(t)$ и $W_L(t)$ определите экспериментальные значения энергий в указанные моменты времени. Результат также занесите в таблицу.

Эксперимент 3. Разряд конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности при высокой добротности контура.

Откройте файл lab_3_3.ewb (рис. 3.3). Рассчитайте временные зависимости напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и тока $i_C(t)$ через него при срабатывании реле времени, а также рассчитайте величины ω_{CB} и δ . Получите осциллограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$, зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите величины T_{CB} и δ , сравните их с расчетными значениями.

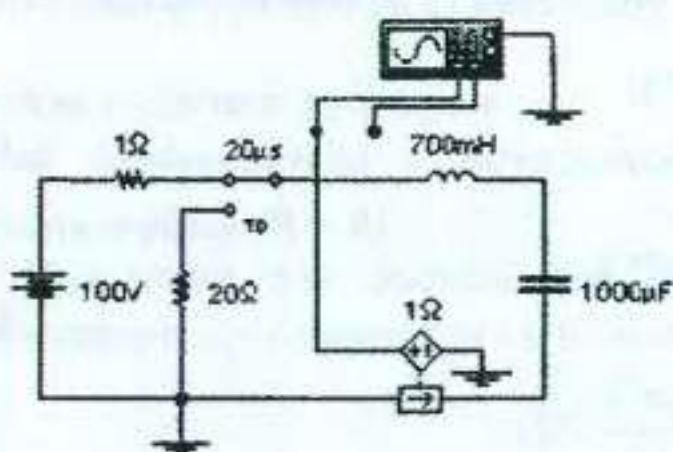


Рис. 3.3

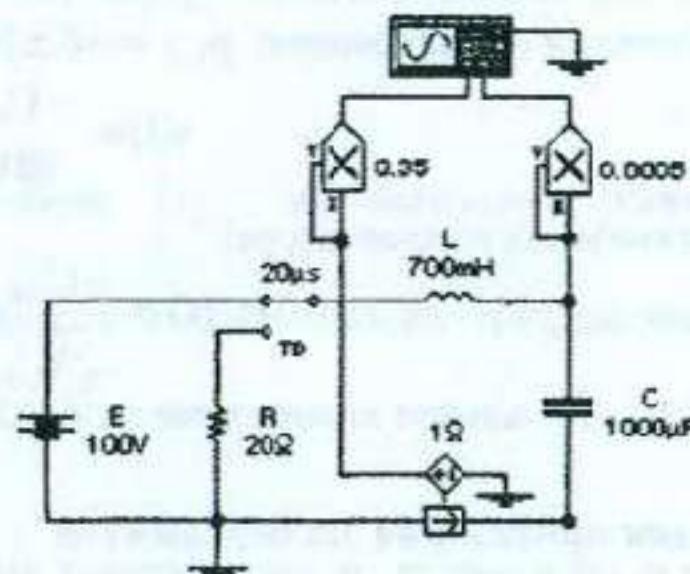


Рис. 3.4

Эксперимент 4. Энергетические соотношения при колебательном разряде конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности.

Откройте файл lab_3_4.ewb (рис. 3.4). Рассчитайте энергию в конденсаторе W_C и энергию в катушке индуктивности W_L для моментов времени $t = 0, T_{CB}/2, T_{CB}, 3T_{CB}/2, 2T_{CB}, 5T_{CB}/2, 3T_{CB}, 7T_{CB}/2, 4T_{CB}$. Время отсчитывается от момента срабатывания реле времени. Результаты расчета занесите в соответствующую таблицу в разделе "Результаты экспериментов". Получите осциллограммы $W_C(t)$ и $W_L(t)$, зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам $W_C(t)$ и $W_L(t)$, определите экспериментальные значения энергий в указанные моменты времени и результаты также занесите в таблицу.

Эксперимент 5. Разряд конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности при низкой добротности контура.

Откройте файл lab_3_5.ewb (рис. 3.5). Рассчитайте временные зависимости напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и тока $i_C(t)$ через него, а также величины p_1 и p_2 при переключении реле времени.

Получите осциллограммы тока $i_C(t)$ конденсатора при его разряде на RL-цепь и тока через катушку индуктивности L при подсоединении ее через резистор R к источнику

с ЭДС, равной начальному напряжению на конденсаторе (нижняя схема). Зарисуйте полученные осциллограммы на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". Сравните осциллограммы тока для обоих случаев. Вычислите постоянную времени $1/p_1$ и сравните ее с постоянной времени L/R для нижней схемы, отметьте положение соответствующего корня характеристического уравнения на комплексной плоскости.

Получите осциллограммы тока $i_C(t)$ конденсатора при его разряде на RL -цепь и на резистор с сопротивлением R (правая схема). Зарисуйте их на том же экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". Сравните осциллограммы тока для всех трех схем. Вычислите постоянную времени $1/p_2$ и сравните ее с постоянной времени RC правой схемы, отметьте положение соответствующего корня характеристического уравнения на комплексной плоскости.

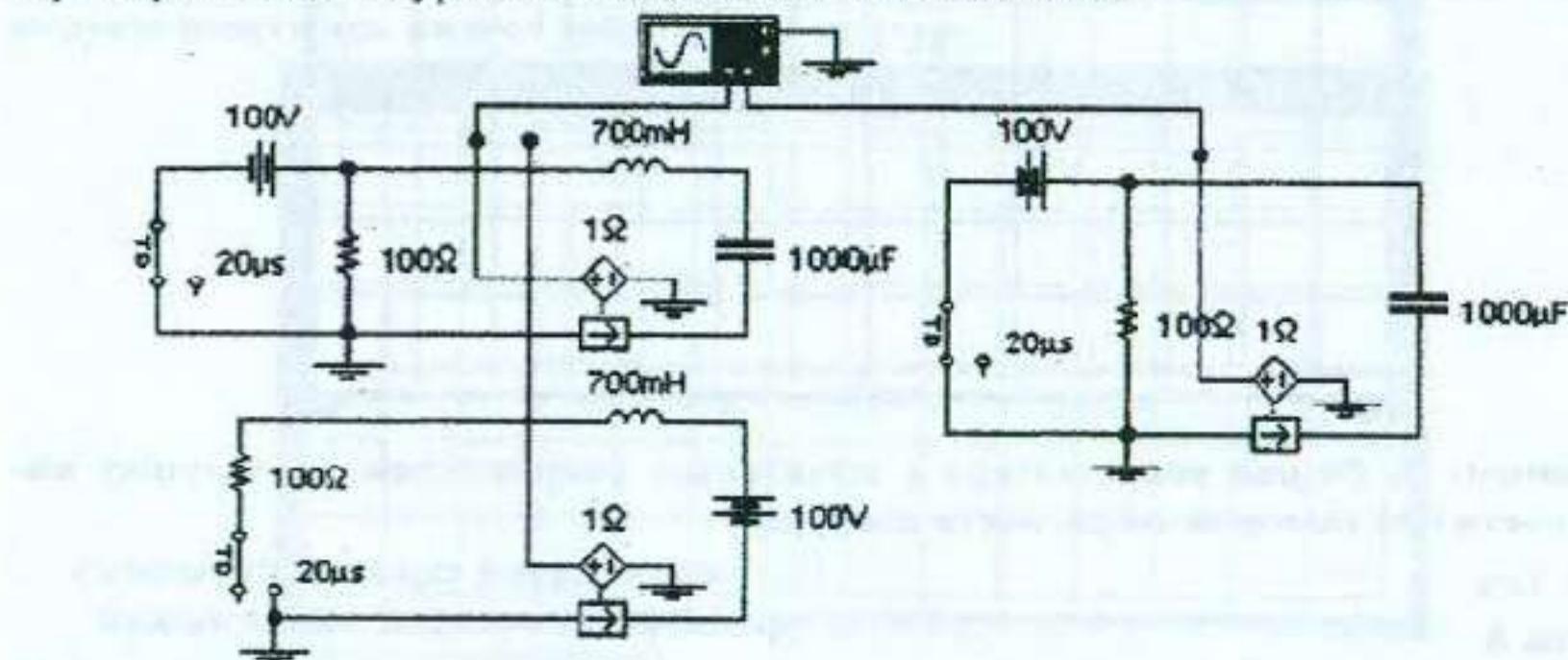
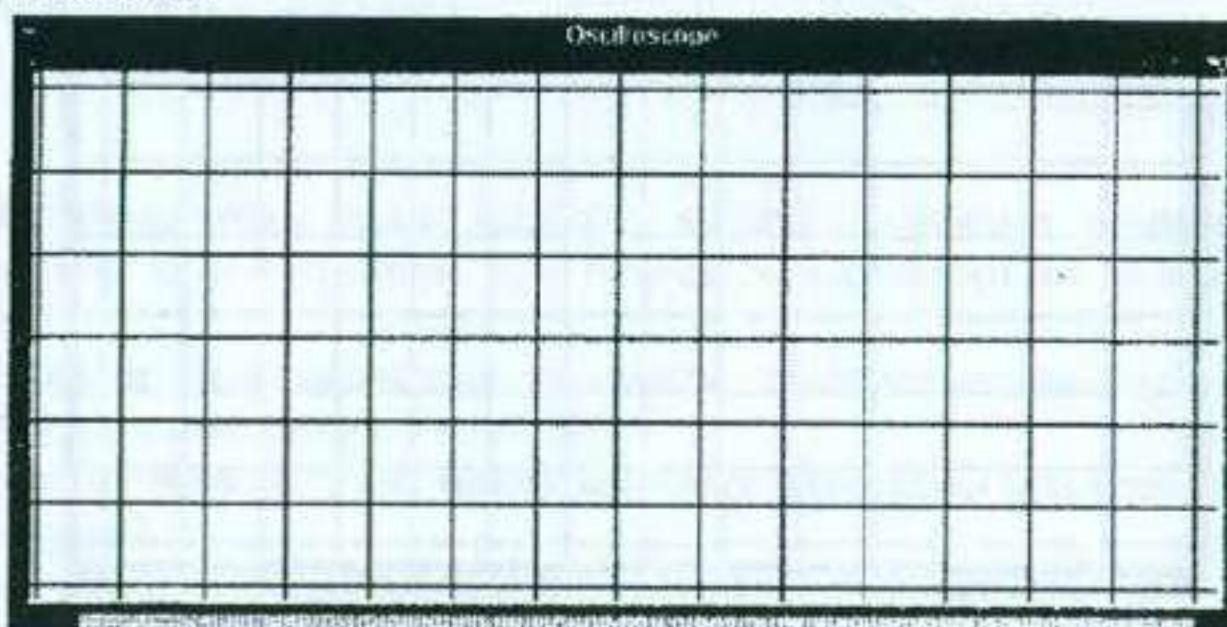


Рис. 3.5

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Разряд конденсатора с начальным напряжением на идеальную катушку индуктивности.



Начальное напряжение на конденсаторе U_{C0}

Индуктивность L

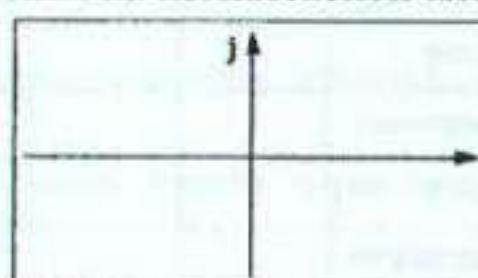
Емкость C

Период T_0

Волновое сопротивление ρ

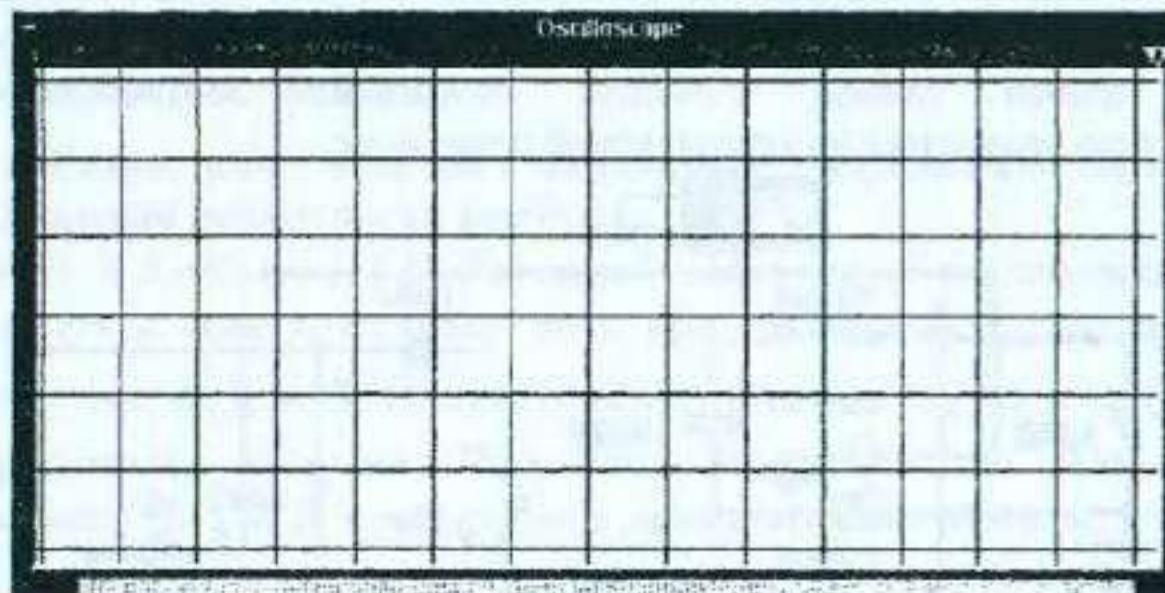
Максимальное значение тока

Положение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости



Эксперимент 2. Энергетические соотношения при разряде конденсатора с начальным напряжением на идеальную катушку индуктивности.

Время, с Энергия, Дж	0	$T_0/8$	$T_0/4$	$3T_0/8$	$T_0/2$	$5T_0/8$	$3T_0/4$	$7T_0/8$	T_0
W_C , Дж расчет									
W_C , Дж измерение									
W_L , Дж расчет									
W_L , Дж измерение									



Эксперимент 3. Разряд конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности при высокой добротности контура.

Период T_{CB}

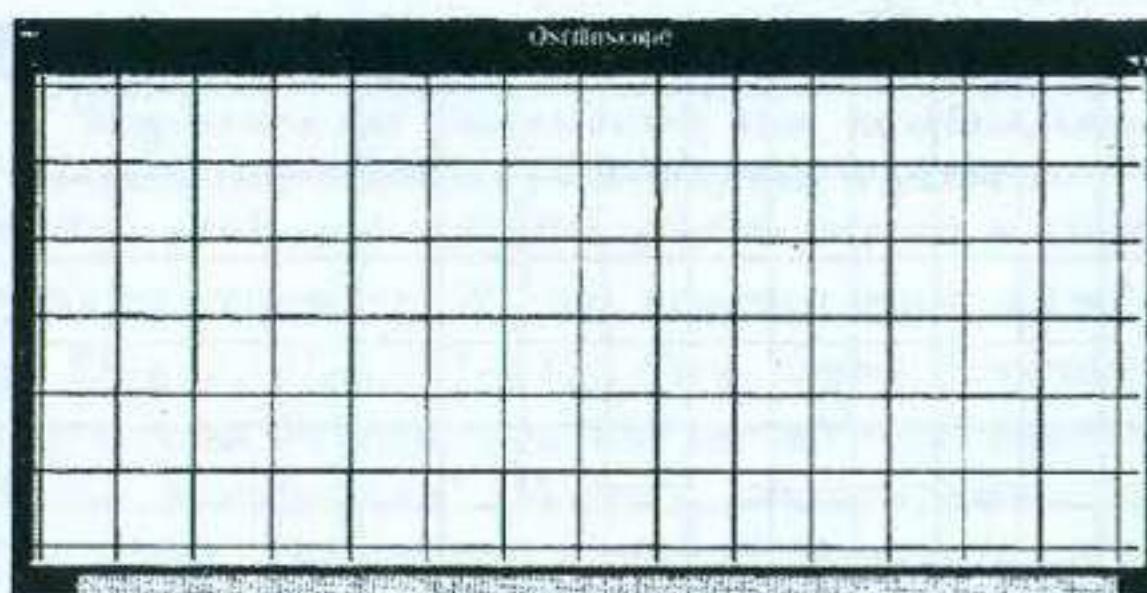
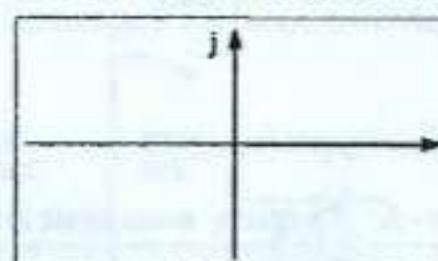
Положение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

Величина δ

VA1

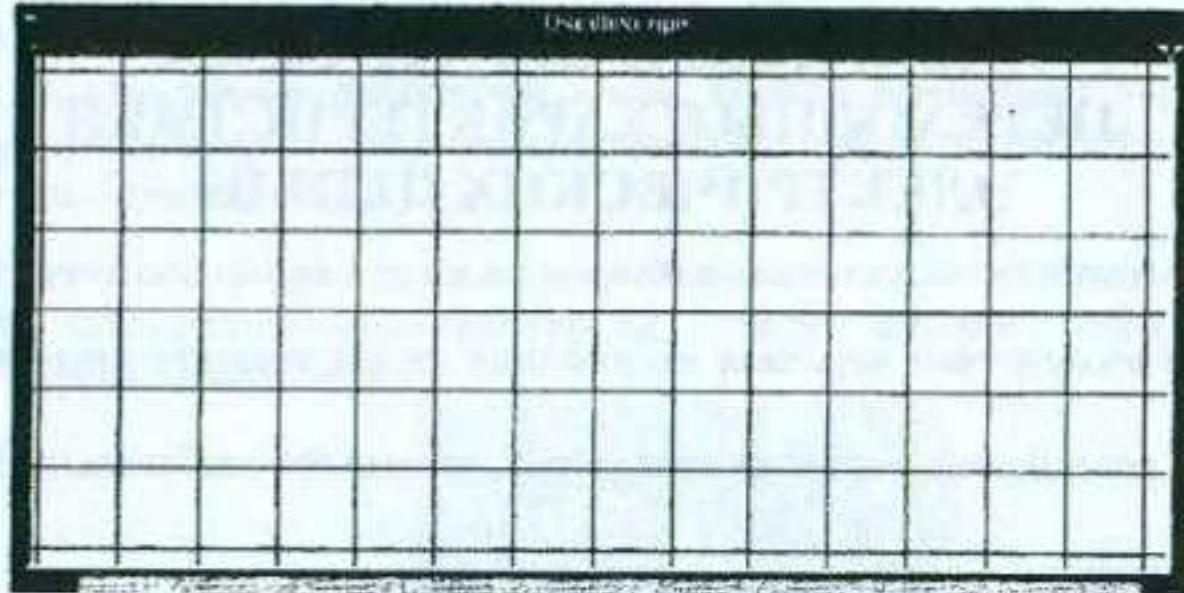
VA2

Величина δ (расчет по результатам измерений)

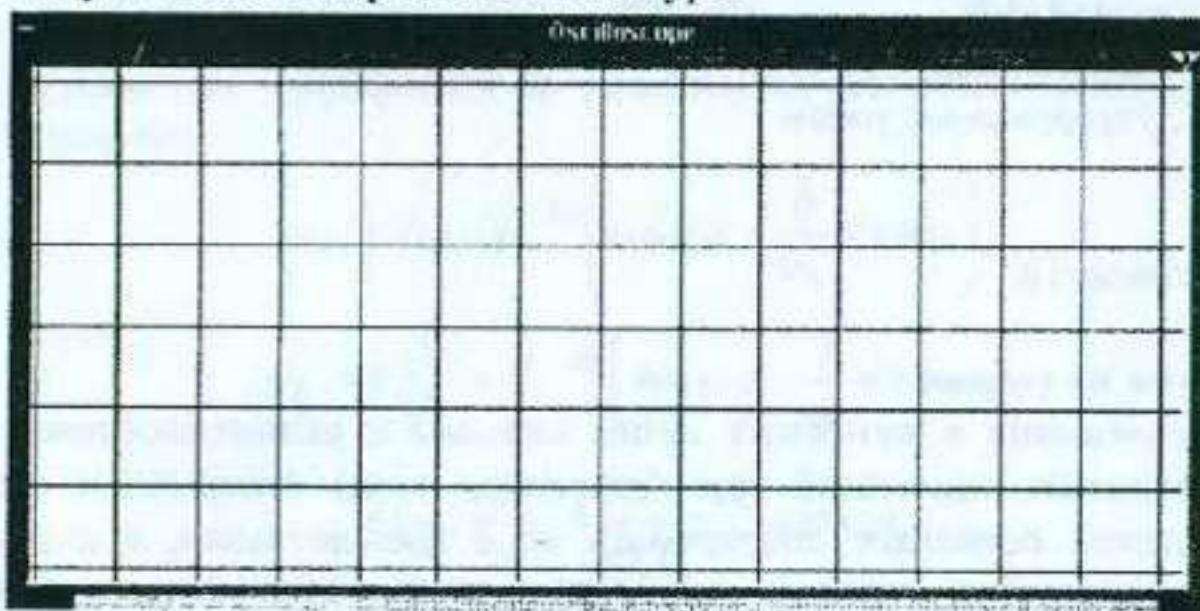


Эксперимент 4. Энергетические соотношения при колебательном разряде конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности.

Время, с Энергия, Дж	0	$T_{CB}/2$	T_{CB}	$3T_{CB}/2$	$2T_{CB}$	$5T_{CB}/2$	$3T_{CB}$	$7T_{CB}/2$	$4T_{CB}$
W_C , Дж расчет									
W_C , Дж измерение									
W_L , Дж расчет									
W_L , Дж измерение									

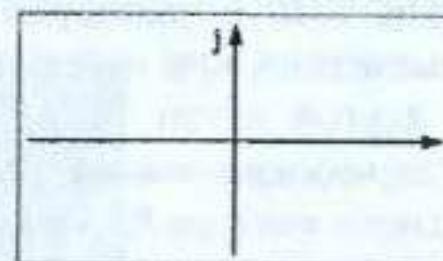


Эксперимент 5. Разряд конденсатора с начальным напряжением на катушку индуктивности при низкой добротности контура.



Расчет постоянных времени
постоянная времени $1/p_1$
постоянная времени L/R
постоянная времени $1/p_2$
постоянная времени RC

Положение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости



Вопросы

1. Какие характерные точки можно выделить на осциллограммах мгновенных значений энергии в катушке и конденсаторе при разряде конденсатора на идеальную катушку индуктивности?
2. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического уравнения при отсутствии потерь в контуре?
3. Как происходит обмен энергией между компонентами схемы при переходном процессе в отсутствие потерь?
4. Как изменяется форма осциллограмм тока в контуре и напряжений на компонентах при введении в контур небольшого сопротивления (колебательный процесс)?
5. Какими величинами характеризуется затухание тока при колебательном переходном процессе?
6. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического уравнения при колебательном переходном процессе?
7. Сравните форму кривых тока и напряжений при апериодическом переходном процессе с соответствующими кривыми для **RL**- и **RC**-цепей.
8. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического уравнения при апериодическом переходном процессе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

Цель

1. Исследование воздействия перепада напряжения на последовательный колебательный контур.
2. Исследование воздействия перепада тока на параллельный колебательный контур.

Приборы и элементы

Осциллограф

Реле времени

Источники постоянной ЭДС

Источники постоянного тока

Источники ЭДС, управляемые током

Резисторы

Конденсаторы

Катушки индуктивности

Краткие сведения из теории

Токи и напряжения в линейных цепях связаны с вынуждающими силами (ЭДС источника напряжения, задающий ток генератора тока) линейными соотношениями. Линейность решений позволяет оперировать не с абсолютными, а с относительными величинами напряжений и токов в линейных электрических цепях. Общепринято, в частности, в относительных величинах выражать токи и напряжения в цепях при воздействии на цепь перепада напряжения (тока).

Отношение тока в некоторой ветви цепи или напряжения на зажимах некоторой ветви цепи, вызванных при нулевых начальных условиях перепадом напряжения (тока) в той же или другой ветви цепи, к величине перепада напряжения (тока) называют *переходной характеристикой цепи* и обозначают, чаще всего, через $h(t)$. Для последовательного контура RL можно составить следующие переходные характеристики:

$$h_i(t) = \frac{i}{E} = \frac{1 - e^{-\frac{Rt}{L}}}{R},$$

$$h_R(t) = \frac{u_R}{E} = 1 - e^{-\frac{Rt}{L}},$$

$$h_L(t) = \frac{u_L}{E} = e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

Переходные характеристики цепи *численно* совпадают с временными зависимостями токов или напряжений в цепи, если значение перепада напряжения (тока) положить равным единице напряжения (тока). Действительно, если принять, что

$$e(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

или

$$i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (4.2)$$

то решение задачи непосредственно приводит к переходной характеристике цепи.

Функции вида (4.1) и (4.2) называют, соответственно, *единичным перепадом напряжения* и *единичным перепадом тока*. Иногда применяют термин «*единичное ступенчатое воздействие напряжения (тока)*». Для обозначения этих функций используют также символ $I(t)$.

Воздействие перепада напряжения на последовательный колебательный контур

Пусть на последовательный контур RLC , схема которого показана на рис. 4.1, действует перепад напряжения.

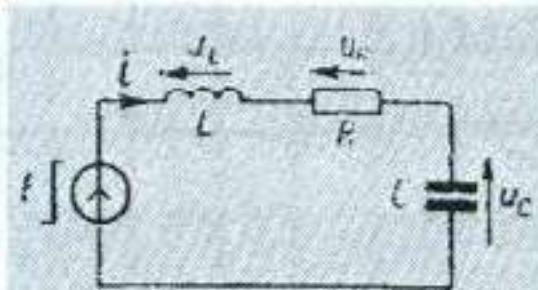


Рис. 4.1.

Законы изменения напряжений на реактивных элементах контура и тока в цепи имеют следующий вид:

$$u_C = E - Ee^{-\delta t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right),$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = Ee^{-\delta t} \left(\cos \omega_1 t - \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right),$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\omega_1 L} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t.$$

Воздействие перепада тока на параллельный колебательный контур

Пусть при нулевых начальных условиях на цепь, составленную из включенных параллельно индуктивности, активного сопротивления и емкости, действует перепад тока. Схема цепи показана на рис. 4.2.

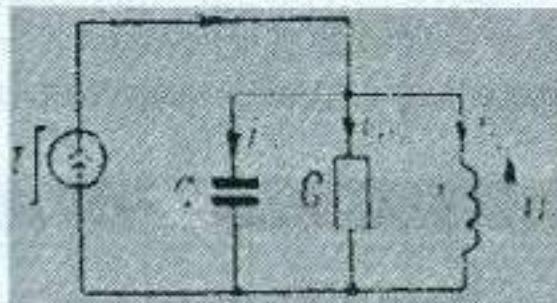


Рис. 4.2.

Напряжение на зажимах параллельного контура при воздействии на контур перепада тока будет изменяться по закону

$$u = \frac{I}{\omega_1 C} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t.$$

Токи через индуктивность и емкость контура изменяются следующим образом:

$$i_L = Ie^{-\delta t} \left(\cos \omega_1 t - \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right),$$

$$i_C = I - Ie^{-\delta t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right).$$

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Воздействие перепада напряжения на последовательный колебательный контур.

Откройте файл lab_4_1.ewb (рис. 4.3). Рассчитайте временные зависимости напряжения на

конденсаторе $u_C(t)$ и тока $i_C(t)$ через него при срабатывании реле времени, а также рассчитайте величины ϕ_{CB} и δ . Получите осциллограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$, зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите величины T_{CB} и δ , сравните их с расчетными значениями.

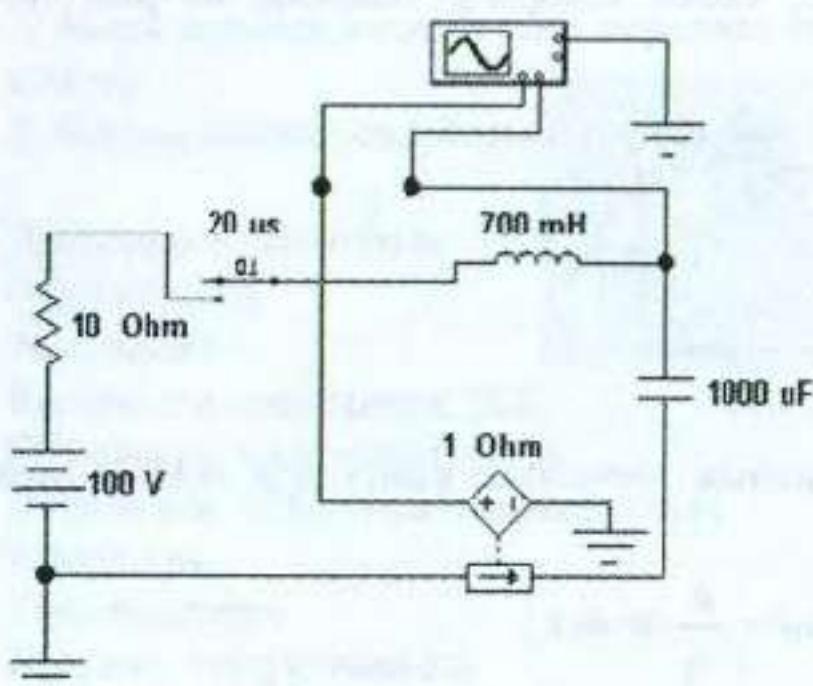


Рис. 4.3.

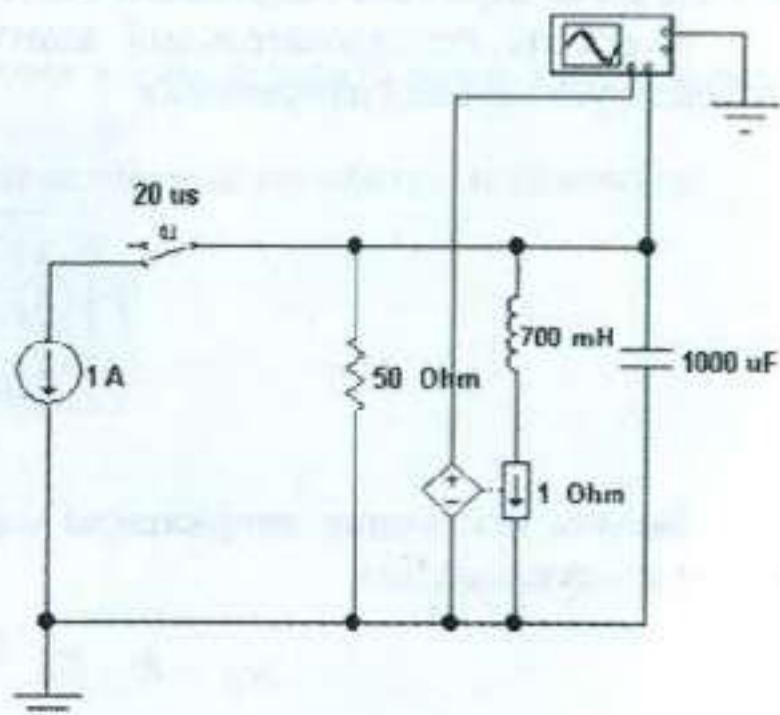
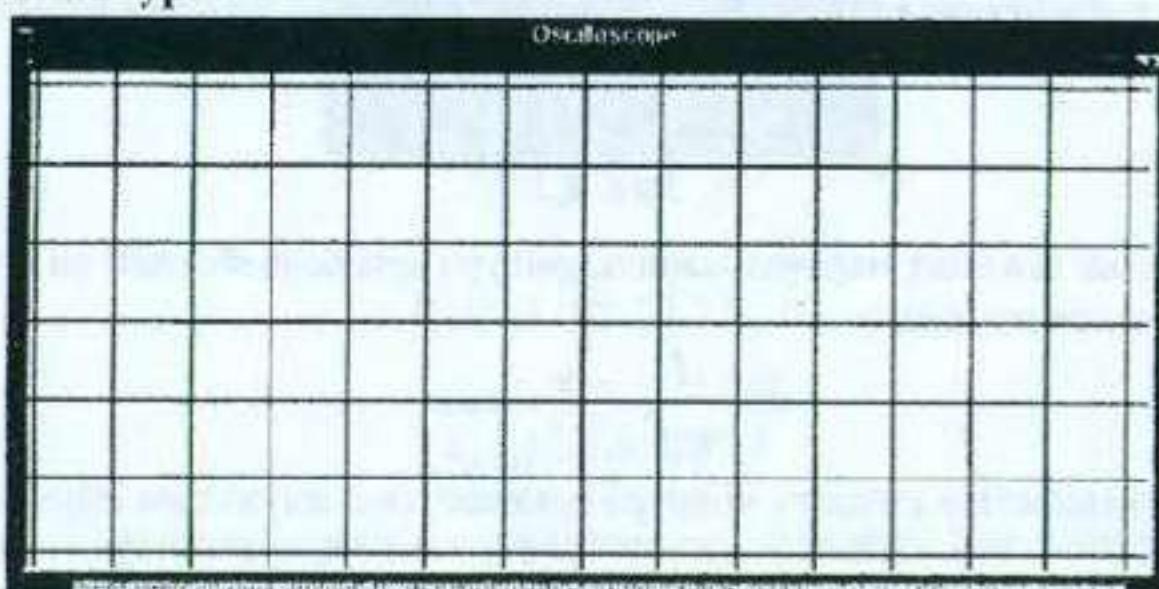


Рис. 4.4.

Эксперимент 2. Воздействие перепада тока на параллельный колебательный контур. Откройте файл lab_4_2.ewb (рис. 4.4). Рассчитайте временные зависимости напряжения на зажимах параллельного контура $u(t)$ и тока $i_L(t)$ через него при срабатывании реле времени, а также рассчитайте величины ϕ_{CB} и δ . Получите осциллограммы $u(t)$ и $i_L(t)$, зарисуйте их на экране осциллографа в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите величины T_{CB} и δ , сравните их с расчетными значениями.

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Воздействие перепада напряжения на последовательный колебательный контур.



Индуктивность L

Емкость C

Затухание δ

Частота ϕ_{CB}

Период T_0

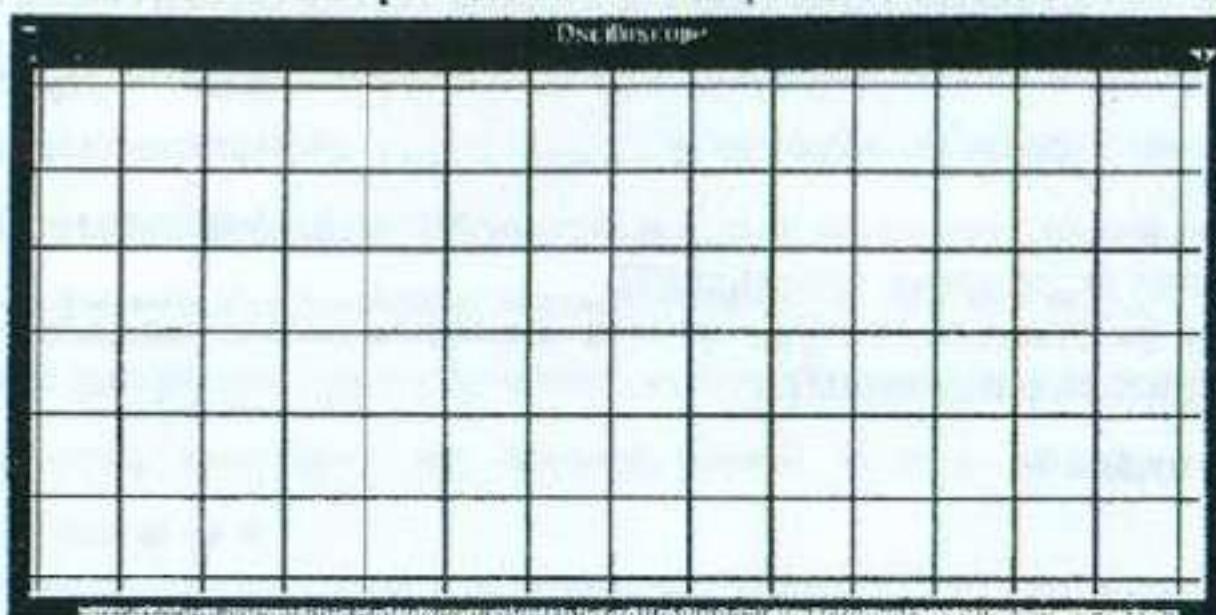
Волновое

сопротивление ρ

Максимальное значение напряжения u_C

Максимальное значение тока i_C

Эксперимент 2. Воздействие перепада тока на параллельный колебательный контур.



Индуктивность L

Емкость C

Затухание δ

Частота $\omega_{\text{СВ}}$

Период T_0

Волновое сопротивление ρ

Максимальное значение напряжения u

Максимальное значение тока i_L

Вопросы

1. Дайте определения переходной характеристики цепи $h(t)$, единичного ступенчатого воздействия напряжения (тока).
2. Приведите переходные характеристики для последовательного RL контура.
3. Приведите переходные характеристики для последовательного RC контура.
4. Какие характерные точки можно выделить на осциллограммах напряжения на конденсаторе и тока в последовательном RCL контуре при воздействии перепадом напряжения?
5. Какие характерные точки можно выделить на осциллограммах тока через индуктивность и напряжения на зажимах параллельного RCL контура при воздействии перепадом тока?
6. Сравните осциллограммы токов и напряжений для случая свободных колебаний в RCL контуре с осциллограммами для случая единичного ступенчатого воздействия напряжения (тока).
7. Сравните выражения для тока в последовательном RCL контуре и напряжений на его реактивных элементах с выражениями для напряжения на зажимах параллельного RCL контура и токов через его реактивные элементы, соответственно, при воздействии на эти контуры перепадом напряжения (тока).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

«ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА»

Цель

- Исследование амплитудно-частотных характеристик элементов последовательного колебательного контура (резонанс напряжений).
- Исследование фазочастотных характеристик элементов последовательного колебательного контура (резонанс напряжений).

Приборы и элементы

Амперметры
 Вольтметры
 Осциллограф
 Боде-плоттер
 Источники гармонической ЭДС
 Резисторы
 Конденсаторы
 Катушки индуктивности

Краткие сведения из теории

Резонанс в последовательном колебательном контуре (резонанс напряжений).

Схема последовательного колебательного контура и векторная диаграмма для режима резонанса представлены на рис. 5.1.

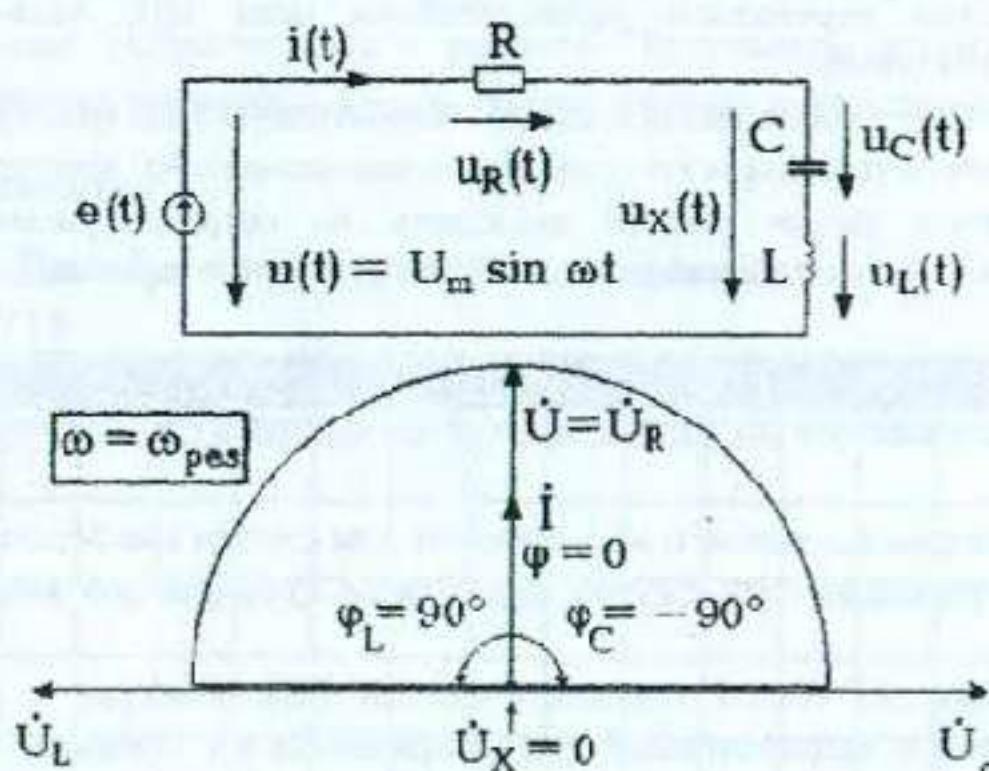


Рис. 5.1

Контур характеризуется следующими параметрами:
 волновым сопротивлением

$$\rho = x_{C\text{рез}} = x_{L\text{рез}} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

резонансной частотой

$$F_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

добротностью контура

$$Q = \frac{U_{C\text{рез}}}{U_{R\text{рез}}} = \frac{U_{L\text{рез}}}{U_{R\text{рез}}} = \frac{\rho}{R},$$

где $U_{C\text{рез}}$, $U_{L\text{рез}}$, $U_{R\text{рез}}$ - напряжения при резонансе на емкости, индуктивности и сопротивлении соответственно, $\chi_{C\text{рез}}$, $\chi_{L\text{рез}}$ - реактивное сопротивление конденсатора и индуктивности на резонансной частоте.

Векторные диаграммы для последовательного контура при $\omega > \omega_{\text{рез}}$.

Векторные диаграммы при увеличении частоты ($\omega > \omega_{\text{рез}}$) представлены на рис. 5.2 (слева представлена диаграмма для промежуточной частоты $\omega > \omega_{\text{рез}}$, справа - для предельного случая $\omega \rightarrow \infty$).

С ростом частоты емкостное сопротивление убывает, а индуктивное нарастает, при этом суммарное реактивное сопротивление растет (рис. 5.2).

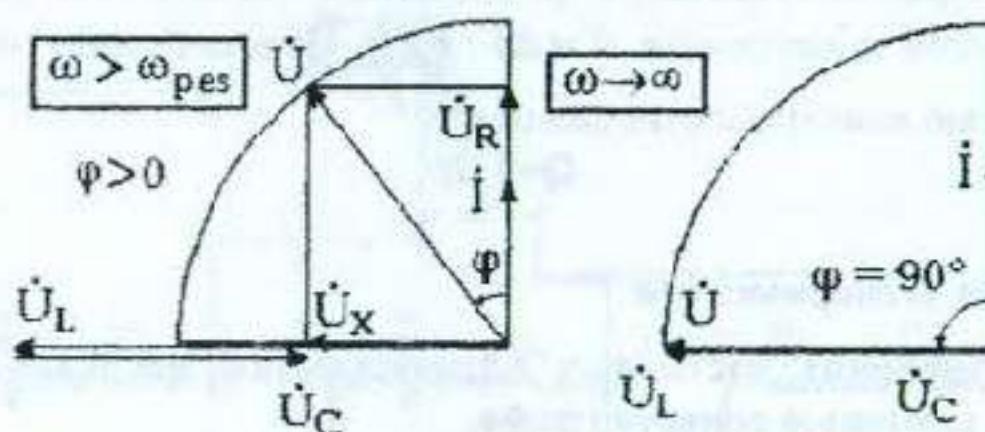


Рис. 5.2

Угол сдвига φ между входным током и напряжением увеличивается по абсолютному значению, оставаясь положительным. Напряжение на катушке индуктивности при росте частоты сначала увеличивается за счет роста сопротивления, а затем снижается из-за снижения тока в цепи. Максимум действующего значения напряжения достигается при характерной частоте F_L .

$$F_L = F_{\text{рез}} \sqrt{\frac{1}{1 - R^2 / 2\rho^2}},$$

Ток контура (i , соответственно, напряжение на резисторе) снижается с ростом частоты. При снижении напряжения на резисторе в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным режимом (при этом мощность, выделяемая в нем, уменьшается в два раза) достигается характерная частота, называемая верхней граничной частотой F_B .

Векторные диаграммы для последовательного контура при $\omega < \omega_{\text{рез}}$.

Схема последовательного колебательного контура и векторная диаграмма для режима резонанса представлены на рис. 5.3 (слева представлена диаграмма для промежуточной частоты $\omega < \omega_{\text{рез}}$, справа - для предельного случая $\omega \rightarrow 0$).

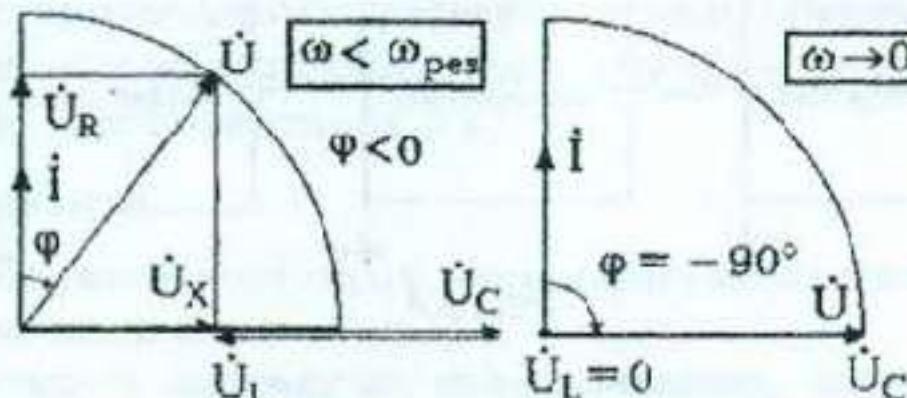


Рис. 5.3

С уменьшением частоты емкостное сопротивление нарастает, а индуктивное убывает, при этом суммарное реактивное сопротивление растет (рис. 5.3). Угол сдвига ϕ между током и питающим напряжением увеличивается по абсолютному значению, оставаясь отрицательным.

Напряжение на конденсаторе при снижении частоты сначала увеличивается за счет роста емкостного сопротивления, а затем снижается из-за снижения тока в цепи. Максимум действующего значения напряжения на конденсаторе достигается при характерной частоте F_C

$$F_C = F_{\text{рез}}^2 / F_L$$

Ток контура (и, соответственно, напряжение на резисторе) снижается с уменьшением частоты. При снижении напряжения на резисторе в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным режимом (при этом мощность, выделяемая в резисторе, уменьшается в два раза) достигается характерная частота, называемая нижней граничной частотой F_H .

Разность граничных частот $\Delta F = F_R - F_H$ называется *полосой пропускания* колебательного контура. Отнесенная к резонансной частоте, эта разность называется *относительной полосой пропускания* $d = \Delta F / F_{\text{рез}}$. Относительная полоса пропускания связана с добротностью контура соотношением:

$$Q = 1/d$$

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Измерение частотных характеристик последовательного колебательного контура с помощью осциллографа.

а) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при резонансной частоте.

Рассчитайте резонансную частоту ω_0 , частоту максимума напряжения на катушке индуктивности ω_L и частоту максимума напряжения на конденсаторе ω_C . Результаты расчета занесите в таблицу 5.1 в разделе «Результаты экспериментов». Откройте файл lab_5_1.ewb (рис. 5.4). Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осцилограммы напряжений на резисторе u_R , конденсаторе u_C и катушке индуктивности u_L . Рассчитайте и измерьте действующее значение и фазу E , u_R , u_C и u_L для $F=F_{\text{рез}}$ с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этих частот, направив в каждой диаграмме ток по действительной оси.

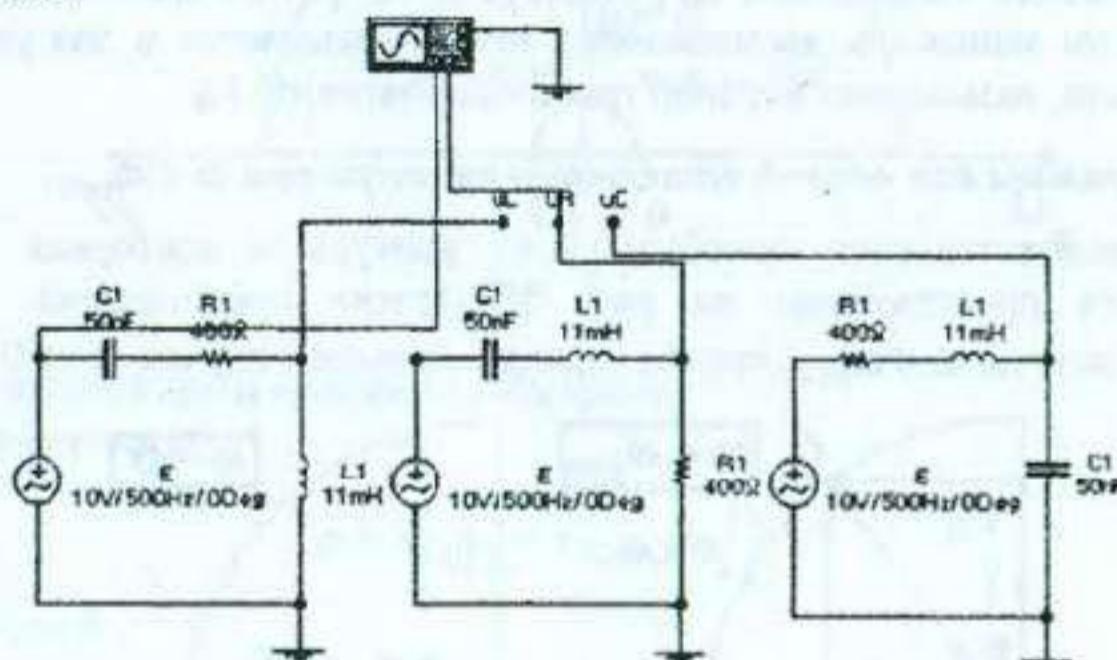


Рис. 5.4

б) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при частоте $F=0.5F_C$.

Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осцилограммы напряжений на резисторе u_R , конденсаторе u_C и катушке индуктивности u_L при $F=0.5F_C$. Рассчитайте и измерьте действующее значение и фазу E , u_R , u_C и u_L с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этой частоты, направив в каждой диаграмме ток по действительной оси.

в) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при частоте $F=2F_L$. Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осцилограммы напряжений на резисторе u_R , конденсаторе u_C и катушке индуктивности u_L для $F=2F_L$. Рассчитайте и измерьте действующее значение и фазу E , u_R , u_C и u_L с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этой частоты, направив в каждой диаграмме ток по действительной оси.

Эксперимент 2. Частотные характеристики последовательного колебательного контура (исследования с помощью Боде-плоттера).

Откройте файл lab_5_2.ewb (рис. 5.5).

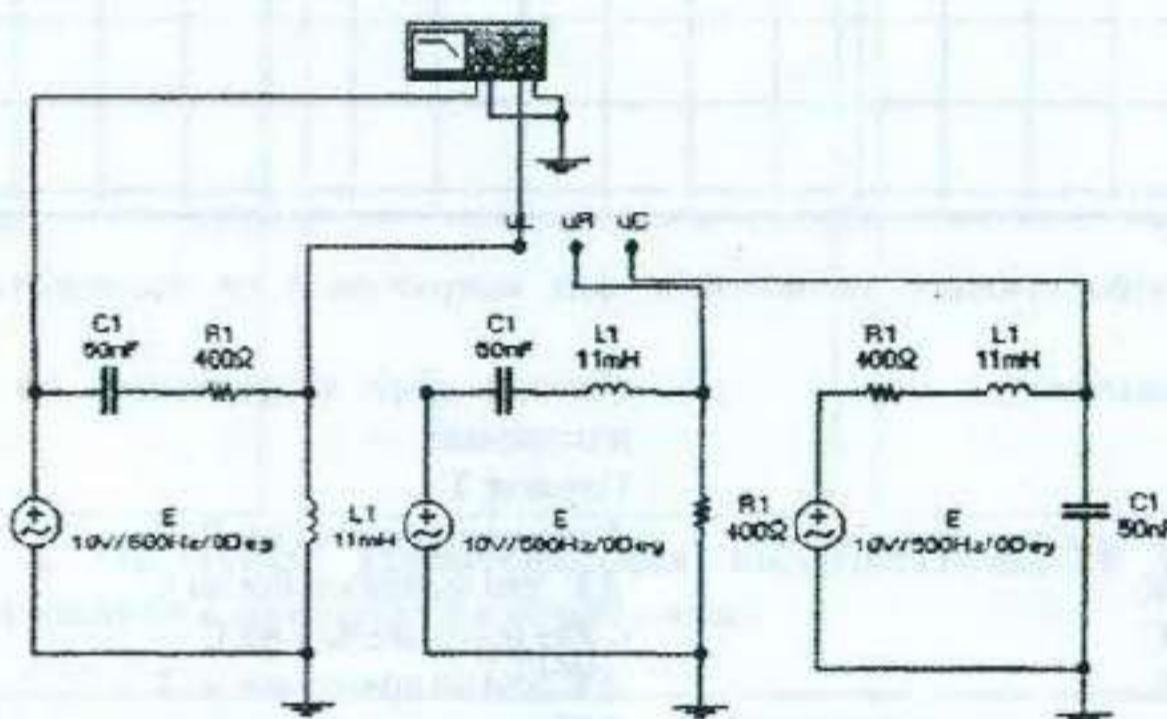


Рис. 5.5

Подключая вывод Боде-плоттера на различные элементы контура (точки u_L , u_R , u_C на рис. 5), определите значения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик для частот 0, $\omega_C/4$, $\omega_C/2$, ω_C , $(\omega_0 - \omega_C)/2$, ω_0 , $(\omega_L - \omega_0)/2$, ω_L , $2\omega_L$, $4\omega_L$. Зарисуйте частотные характеристики на экранах Боде-плоттера, приведенных в разделе «Результаты экспериментов». Сравните результаты, полученные с помощью Боде-плоттера и осциллографа.

Рассчитайте амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики для напряжений на резисторе $u_R(\omega)$, конденсаторе $u_C(\omega)$ и катушке индуктивности $u_L(\omega)$ для частот 0, $\omega_C/4$, ω_C , $(\omega_0 - \omega_C)/2$, ω_0 , $(\omega_L - \omega_0)/2$, ω_L , $4\omega_L$. По результатам расчета нанесите точки АЧХ и ФЧХ для напряжений на сопротивлении, катушке индуктивности и конденсаторе на экспериментальные графики в разделе «Результаты экспериментов». Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этих частот, направив в каждой диаграмме ток по действительной оси.

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Измерение частотных характеристик последовательного колебательного контура с помощью осциллографа.

а) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при резонансной частоте.

Расчет сопротивлений

$X_C =$

$X_L =$

Действующие значения напряжений

Напряжение на R

Напряжение на C

Напряжение на L

Расчет фаз напряжений по результатам измерений

Период T

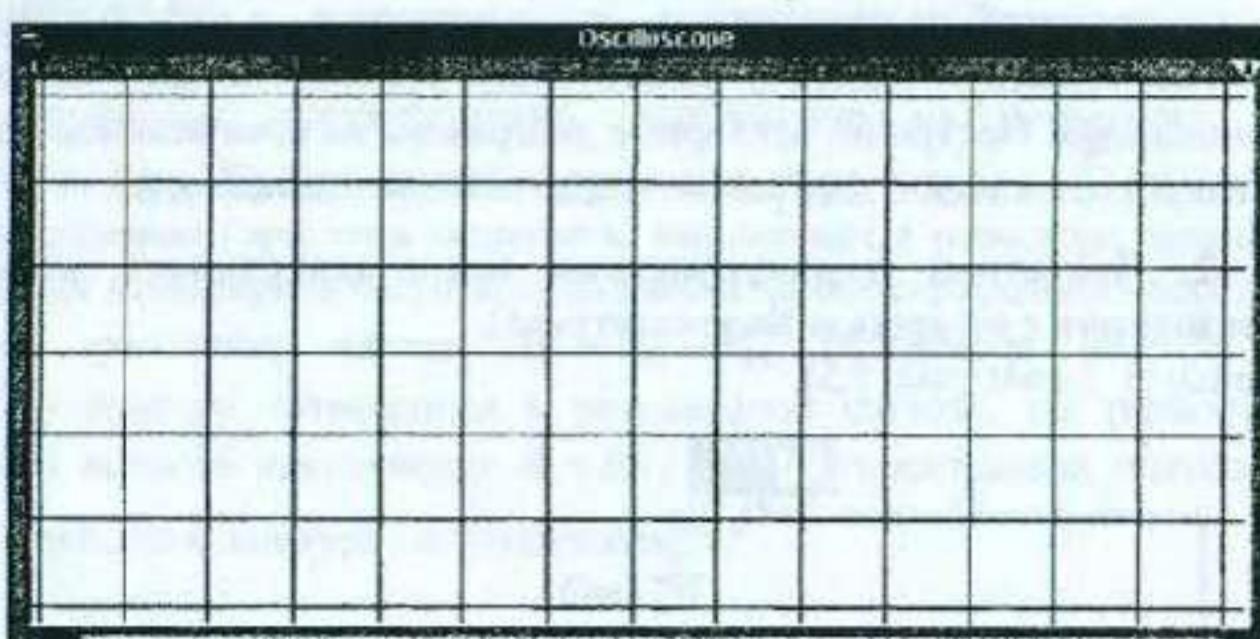
Фаза напряжения на R

ΔT для напряжения на C

Фаза напряжения на C

ΔT для напряжения на L

Фаза напряжения на L



б) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при частоте $F=0.5F_C$.

Расчет сопротивлений

$X_C =$

$X_L =$

Действующие значения напряжений

Напряжение на R

Напряжение на C

Напряжение на L

Расчет фаз напряжений по результатам измерений

Период T

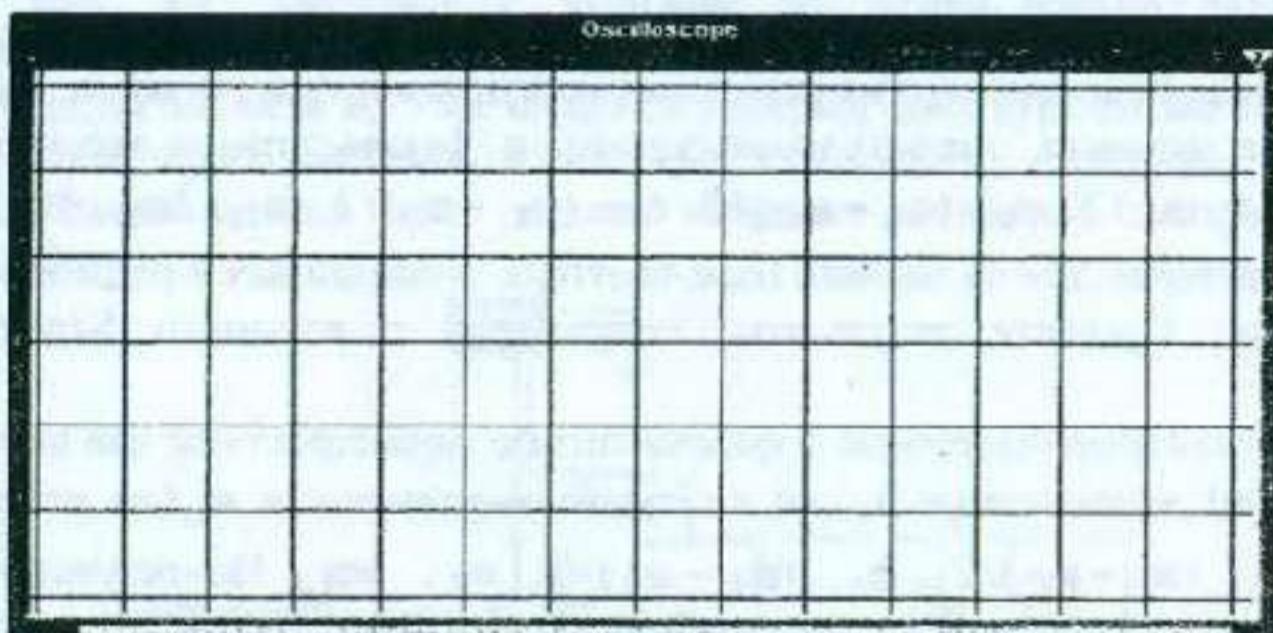
Фаза напряжения на R

ΔT для напряжения на C

Фаза напряжения на C

ΔT для напряжения на L

Фаза напряжения на L



в) Измерение действующих значений и фаз напряжений на элементах при частоте $F=2F_L$.

Расчет сопротивлений

$X_C =$

$X_L =$

Действующие значения напряжений

Напряжение на R

Напряжение на C

Напряжение на L

Расчет фаз напряжений по результатам измерений

Период T

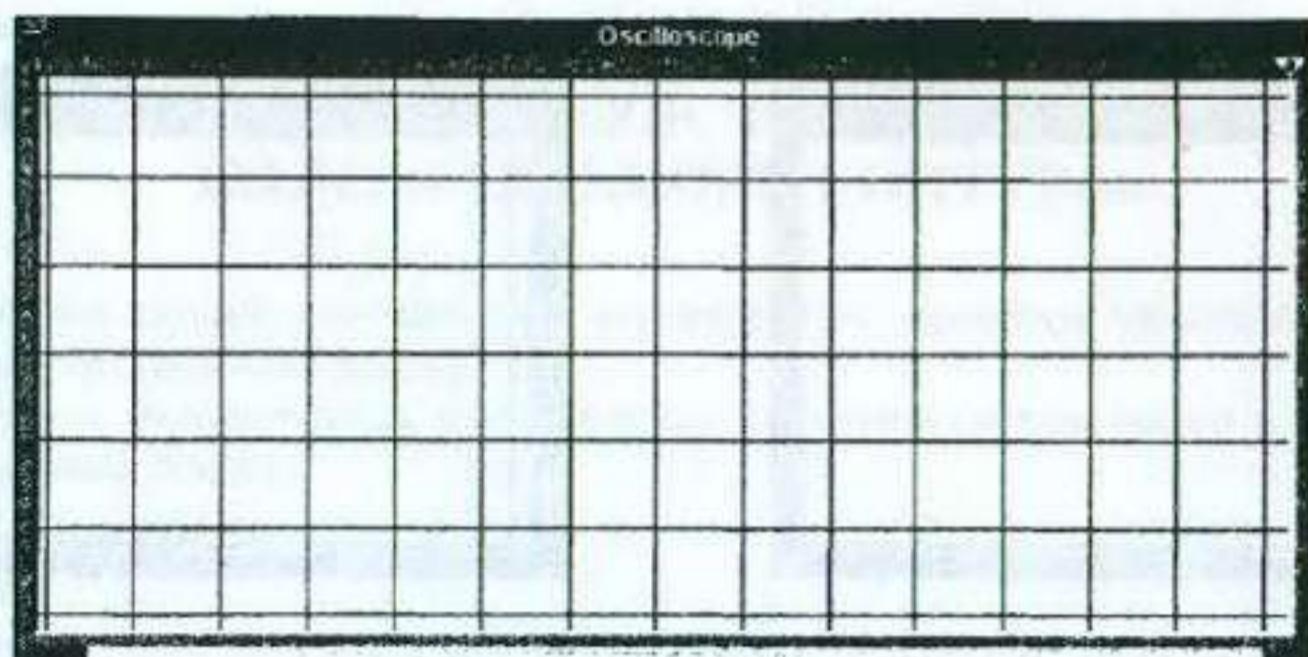
Фаза напряжения на R

ΔT для напряжения на C

Фаза напряжения на C

ΔT для напряжения на L

Фаза напряжения на L

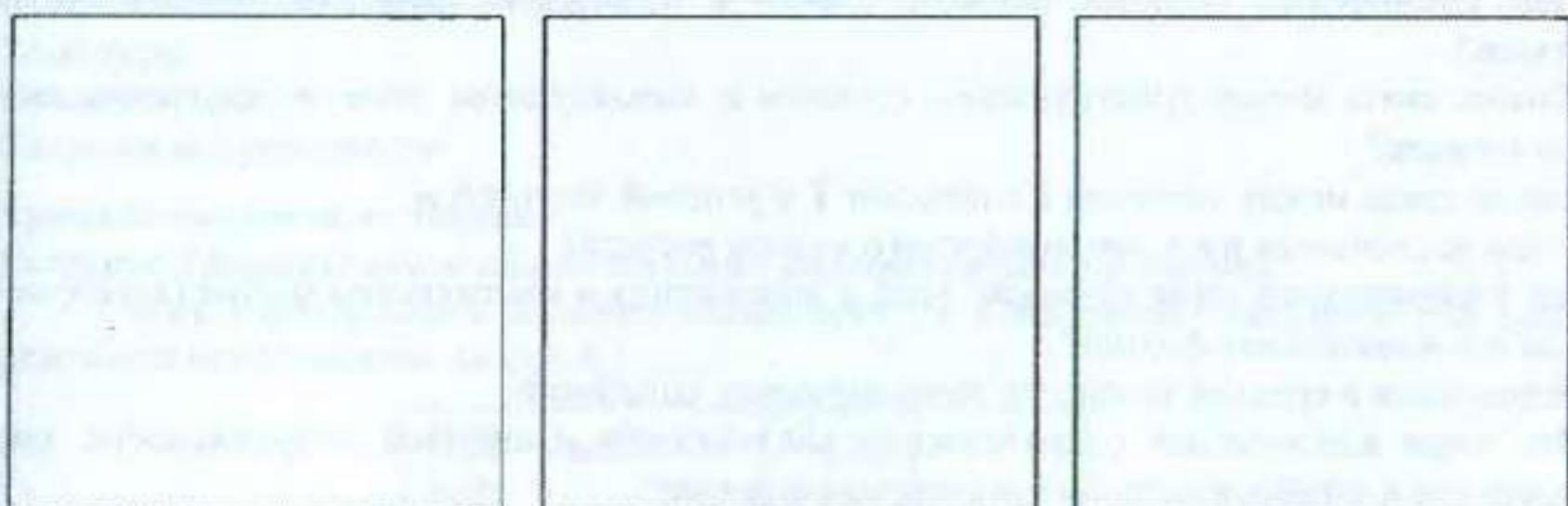


Векторные диаграммы

$F=F_p$

$F=0.5F_c$

$F=2F_L$

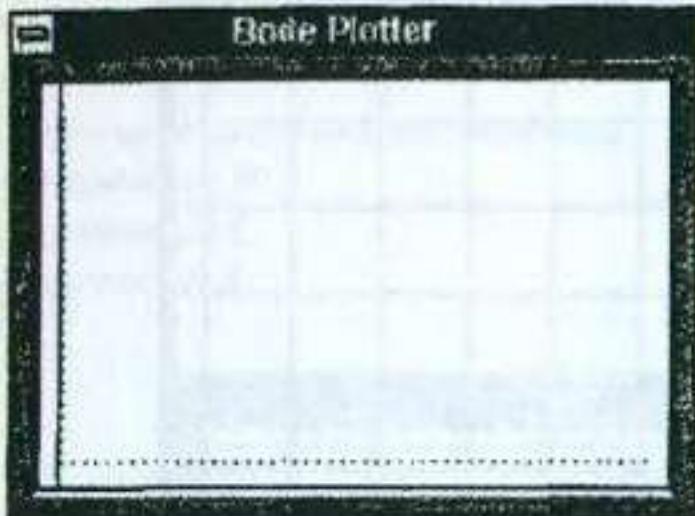


Эксперимент 2. Частотные характеристики последовательного колебательного контура (исследования с помощью Боде-плоттера).

Таблица 5.1.

Параметры		Значения параметров									
		Частота, Гц									
		0, Гц	$F_c/4$, Гц	$F_c/20$, Гц	F_c , Гц	$(F_o - F_c)/2$, Гц	F_o , Гц	$(F_L - F_o)/2$, Гц	F_L , Гц	$2F_L$, Гц	$4F_L$, Гц
F , Гц	расч.										
I , А	расч.										
	эксп.										
U_R , В	расч.										
	эксп.										
U_L , В	расч.										
	эксп.										
U_C , В	расч.										
	эксп.										
Φ_R , град	расч.										
	эксп.										
Φ_L , град	расч.										
	эксп.										
Φ_C , град	расч.										
	эксп.										

Амплитудно-частотные характеристики



Фазочастотные характеристики



Вопросы

1. Каковы основные характеристики гармонического сигнала?
2. Чем различаются понятия фазового сдвига и начальной фазы для гармонических сигналов?
3. Какова связь между действующим, средним и амплитудным значениями гармонического сигнала?
4. Какова связь между частотой f , периодом T и угловой частотой ω ?
5. В чем заключается идея символьского метода расчета?
6. Как изображаются гармонические токи и напряжения в комплексной форме (алгебраическая и показательная форма)?
7. Мгновенная и средняя мощности гармонических колебаний.
8. Что такое комплексное сопротивление конденсатора и катушки индуктивности, как записать его в алгебраической и показательной форме?
9. Гармонические колебания в последовательном колебательном контуре.
10. Резонанс в последовательном колебательном контуре.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

«ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА»

Цель

- Исследование амплитудно-частотных характеристик элементов параллельного колебательного контура (резонанс токов).
- Исследование фазочастотных характеристик элементов параллельного колебательного контура (резонанс токов).

Приборы и элементы

Амперметры
 Вольтметры
 Осциллограф
 Боде-плоттер
 Источники гармонического тока
 Резисторы
 Конденсаторы
 Катушки индуктивности

Краткие сведения из теории

Резонанс в параллельном колебательном контуре (резонанс токов).

Схема параллельного колебательного контура и векторная диаграмма для режима резонанса представлены на рис. 6.1.

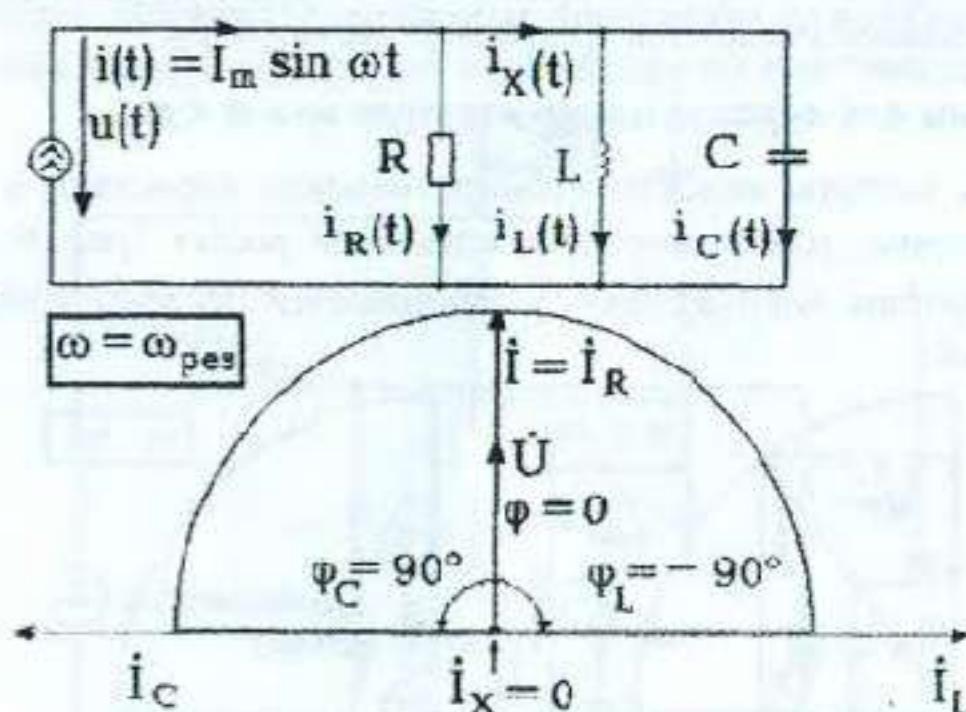


Рис. 6.1

Контур характеризуется следующими параметрами:
 волновым сопротивлением

$$\rho = x_{C\text{рез}} = x_{L\text{рез}} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

резонансной частотой

$$F_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

добротностью контура

$$Q = \frac{I_{C\text{рез}}}{I_{R\text{рез}}} = \frac{I_{L\text{рез}}}{I_{R\text{рез}}} = \frac{R}{\rho},$$

где $I_{C\text{рез}}$, $I_{L\text{рез}}$, $I_{R\text{рез}}$ - токи при резонансе через емкость, индуктивность и сопротивление, соответственно.

Векторные диаграммы для параллельного контура при $\omega > \omega_{рез}$.

С ростом частоты емкостное сопротивление убывает, а индуктивное нарастает, при этом суммарное реактивное сопротивление растет (рис. 6.2). Угол сдвига ϕ между током и питающим напряжением увеличивается по абсолютному значению, оставаясь отрицательным. Ток конденсатора при росте частоты сначала увеличивается за счет убывающего сопротивления, а затем снижается из-за снижения тока в цепи. Максимум действующего значения тока достигается при характерной частоте F_C

$$F_C = F_{рез} \sqrt{\frac{1}{1 - R^2 / 2\rho^2}}.$$

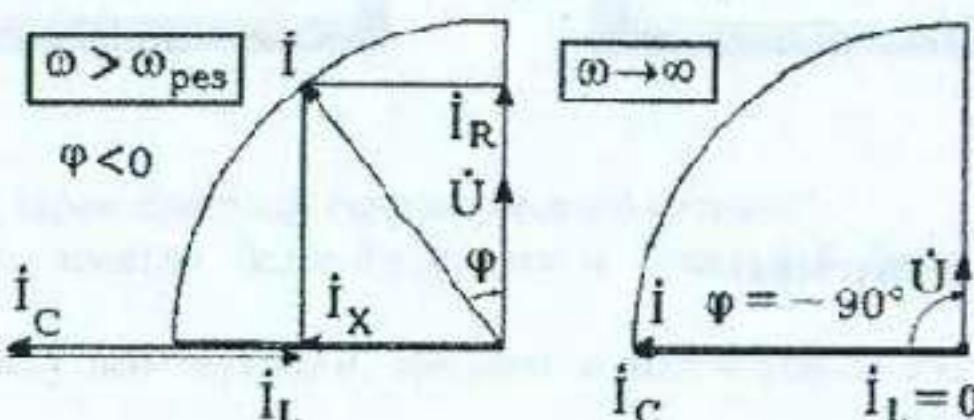


Рис. 6.2

Напряжение на контуре (и, соответственно, ток на резисторе) снижается с ростом частоты. При снижении напряжения на резисторе в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным режимом (при этом мощность, выделяемая в нем, уменьшается в два раза) достигается характерная частота, называемая верхней граничной частотой F_B .

Векторные диаграммы для параллельного контура при $\omega < \omega_{рез}$.

С уменьшением частоты емкостное сопротивление нарастает, а индуктивное убывает, при этом суммарное реактивное сопротивление растет (рис. 6.3). Угол сдвига ϕ между током и питающим напряжением увеличивается по абсолютному значению, оставаясь отрицательным.

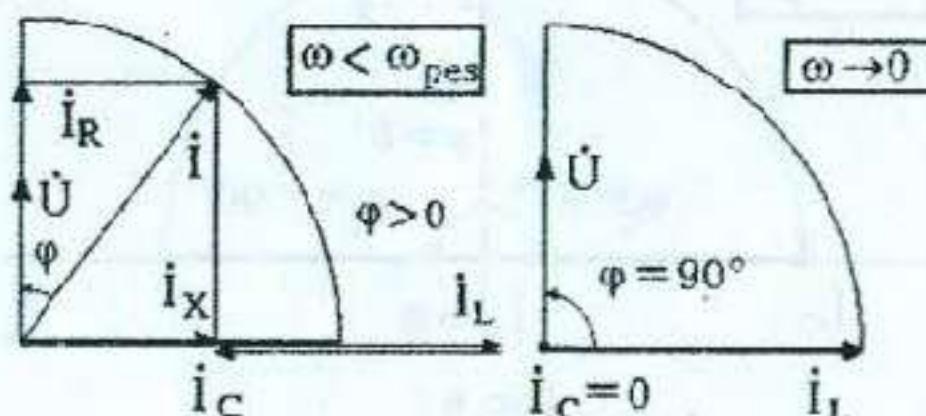


Рис. 6.3

Ток через индуктивность при снижении частоты сначала увеличивается за счет уменьшения индуктивного сопротивления, а затем снижается из-за уменьшения напряжения на контуре. Максимум действующего значения тока через индуктивность достигается при характерной частоте F_L

$$F_L = F_{рез}^2 / F_C$$

Напряжение на контуре (и, соответственно, ток резистора) снижается с уменьшением частоты. При снижении напряжения на резисторе в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным режимом (при этом мощность, выделяемая в резисторе, уменьшается в два раза) достигается характерная частота, называемая нижней граничной частотой F_H .

Разность граничных частот $\Delta F = F_B - F_H$ называется *полосой пропускания* колебательного контура. Отнесенная к резонансной частоте, эта разность называется *относительной полосой пропускания* $d = \Delta F / F_{рез}$. Относительная полоса пропускания

связана с добротностью контура простым соотношением

$$Q=1/d$$

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Измерение частотных характеристик параллельного колебательного контура с помощью осциллографа.

а) Измерение действующих значений и фаз токов через элементы при резонансной частоте.

Рассчитайте резонансную частоту ω_0 , частоту максимума тока через катушку индуктивности ω_L и через конденсатор ω_C . Результаты расчета занесите в таблицу 6.1 в разделе «Результаты экспериментов». Откройте файл lab_6_1.ewb (рис. 6.4). Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осциллограммы токов через резистор i_R , конденсатор i_C и катушку индуктивности i_L . Рассчитайте и измерьте действующее значение и фазу J , i_R , i_C и i_L для $F=F_{рез}$ с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этих частот, направив в каждой диаграмме напряжение по действительной оси.

б) Измерение действующих значений и фаз тока через элементы при частоте $F=0.5F_L$.

Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осциллограммы токов через резистор i_R , конденсатор i_C и катушку индуктивности i_L при $F=0.5F_L$. Рассчитайте и измерьте действующее значение и J , i_R , i_C и i_L для $F=F_{рез}$ с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этих частот, направив в каждой диаграмме напряжение по действительной оси.

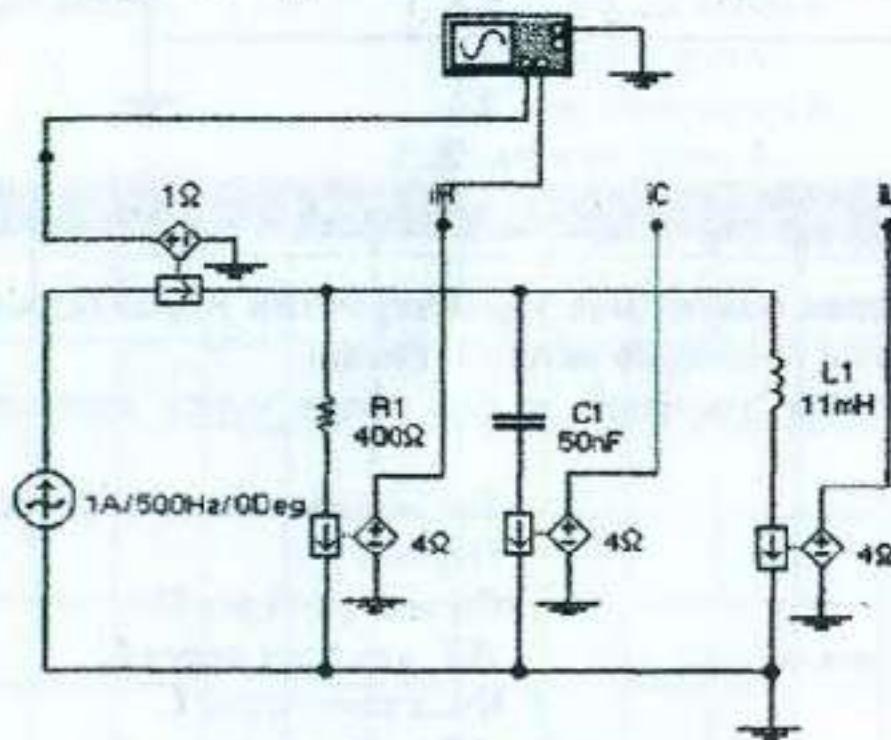


Рис. 6.4

в) Измерение действующих значений и фаз токов через элементы при частоте $F=2F_C$.

Рассчитайте резонансную частоту ω_0 , частоту максимума напряжения на катушке индуктивности ω_L и частоту максимума напряжения на конденсаторе ω_C . Получите и зарисуйте на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов» осциллограммы токов через резистор i_R , конденсатор i_C и катушку индуктивности i_L при $F=2F_C$. Рассчитайте и измерьте действующее значение и фазу J , i_R , i_C и i_L для $F=F_{рез}$ с помощью осциллографа. Постройте векторные диаграммы на комплексной плоскости для этих частот, направив в каждой диаграмме напряжение по действительной оси.

Эксперимент 2. Частотные характеристики параллельного колебательного контура (исследования с помощью Боде-плоттера).

Откройте файл lab_6_2.ewb (рис. 6.5). Подключая вывод Боде-плоттера на различные эле-

менты контура (точки i_R , i_C и i_L), определите значения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик для частот 0, $\omega_L/4$, $\omega_L/2$, ω_L , $(\omega_0 - \omega_L)/2$, ω_0 , $(\omega_C - \omega_0)/2$, ω_C , $2\omega_C$, $4\omega_C$. Зарисуйте частотные характеристики на экранах Боде-плоттера, приведенных в разделе «Результаты экспериментов». Сравните результаты, полученные с помощью Боде-плоттера и осциллографа. Рассчитайте амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики для напряжений на резисторе $u_R(\omega)$, конденсаторе $u_C(\omega)$ и катушке индуктивности $u_L(\omega)$ для частот 0, $\omega_L/4$, ω_L , $(\omega_0 - \omega_L)/2$, ω_0 , $(\omega_C - \omega_0)/2$, ω_C , $4\omega_C$. По результатам расчета нанесите точки АЧХ и ФЧХ для токов через сопротивление и катушку индуктивности и конденсатор на экспериментальные графики в разделе «Результаты экспериментов».

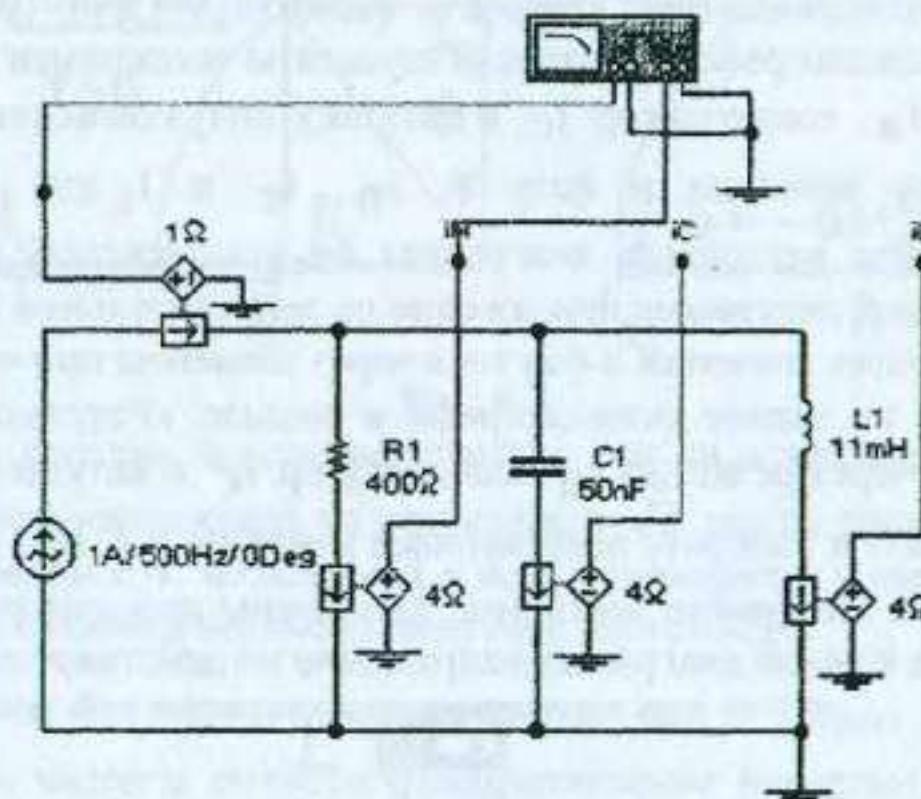


Рис. 6.5

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Измерение частотных характеристик параллельного колебательного контура для трех частот с помощью осциллографа.

а) Измерение действующих значений и фаз токов через элементы при резонансной частоте.

Расчет проводимостей

$$Y_C =$$

$$Y_L =$$

Действующие значения токов

Ток через R

Ток через C

Ток через L

Расчет фаз тока по результатам измерений

Период T

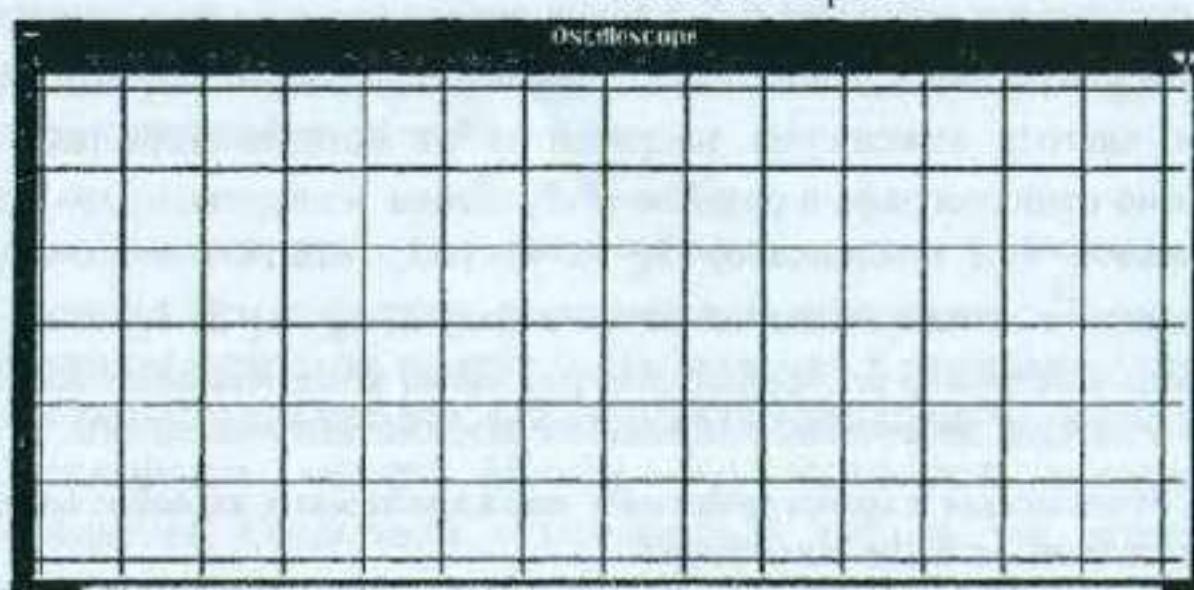
Фаза тока через R

$\Delta\Gamma$ для тока через C

Фаза тока через C

$\Delta\Gamma$ для тока через L

Фаза тока через L



б) Измерение действующих значений и фаз тока через элементы при частоте $F=0.5F_L$

Расчет проводимостей

$$Y_C =$$

$$Y_L =$$

Действующие значения токов

Ток через R

Ток через C

Ток через L

Расчет фаз тока по результатам измерений

Период T

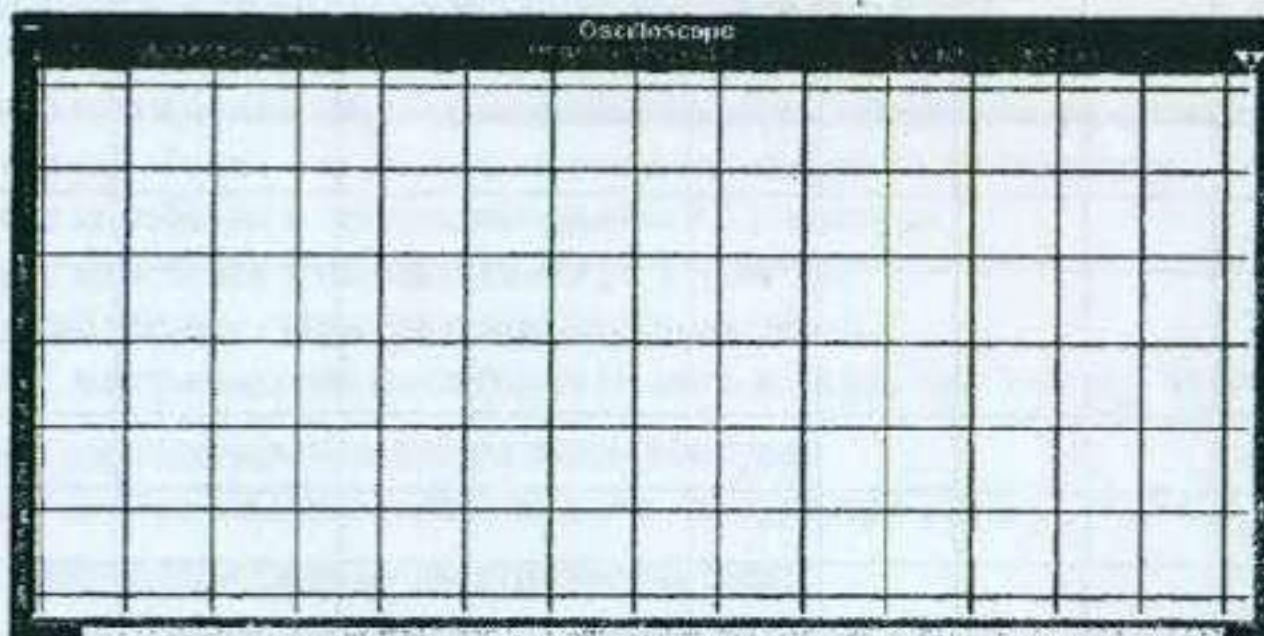
Фаза тока через R

ΔT для тока через C

Фаза тока через C

ΔT для тока через L

Фаза тока через L



в) Измерение действующих значений и фаз токов через элементы при частоте $F=2F_C$.

Расчет проводимостей

$$Y_C =$$

$$Y_L =$$

Действующие значения токов

Ток через R

Ток через C

Ток через L

Расчет фаз тока по результатам измерений

Период T

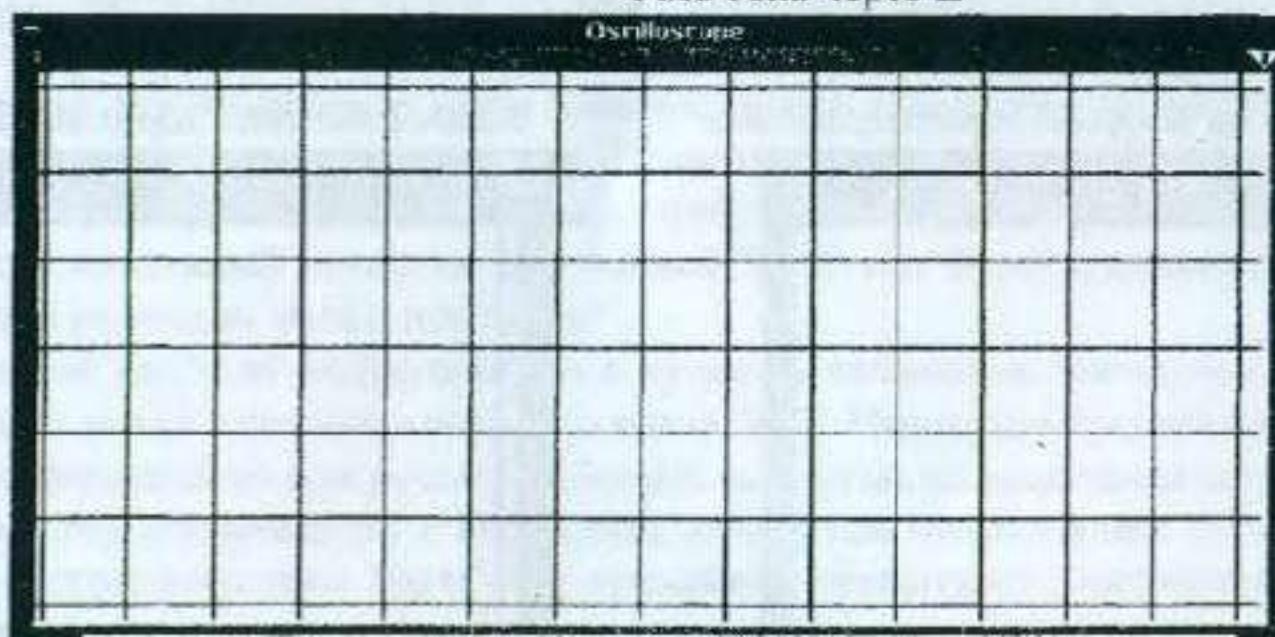
Фаза тока через R

ΔT для тока через C

Фаза тока через C

ΔT для тока через L

Фаза тока через L

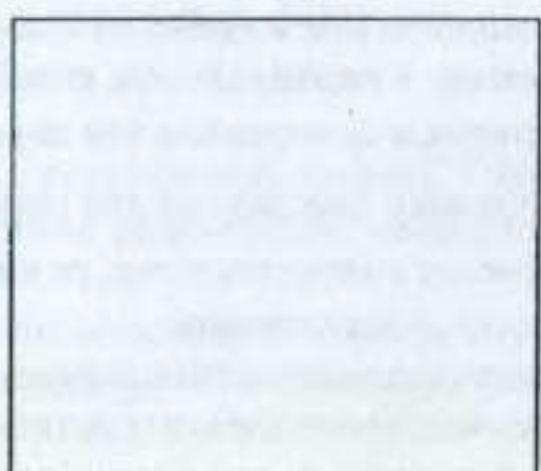
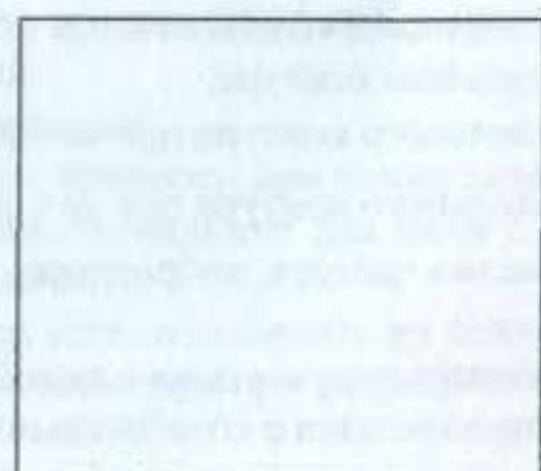
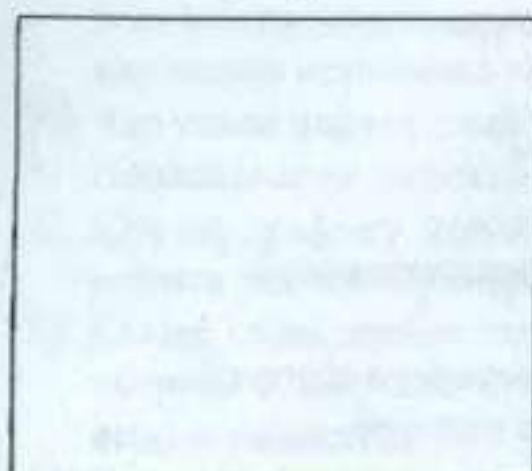


Векторные диаграммы

$$F=F_p$$

$$F=0.5F_L$$

$$F=2F_C$$

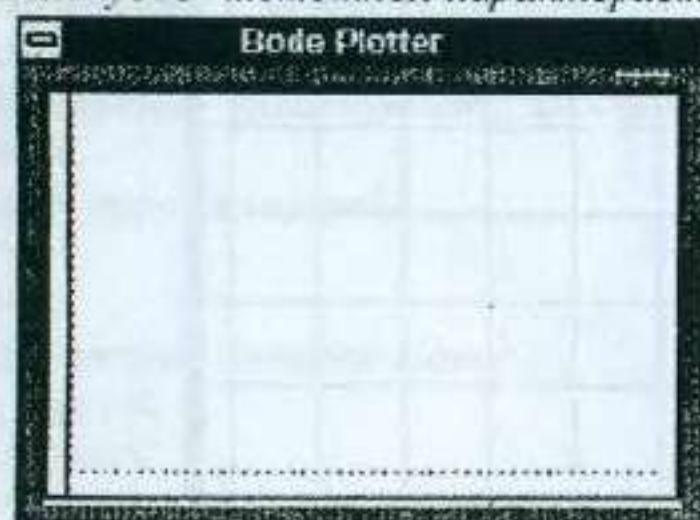


Эксперимент 2. Частотные характеристики параллельного колебательного контура.

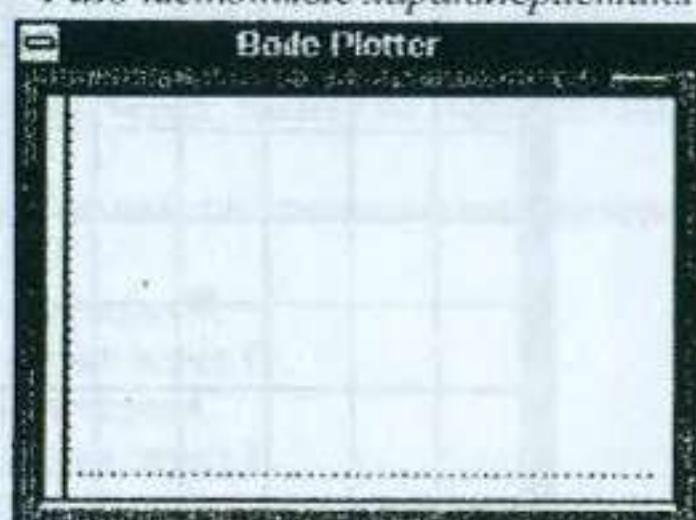
Таблица 6.1

Параметры		Значения параметров									
		Частота, Гц									
		0, Гц	$F_C/4$, Гц	$F_C/20$, Гц	F_C , Гц	$(F_o - F_C)/2$, Гц	F_o , Гц	$(F_L - F_o)/2$, Гц	F_L , Гц	$2F_L$, Гц	$4F_L$, Гц
F , Гц	расч.										
I , А	расч.										
	эксп.										
U_R , В	расч.										
	эксп.										
U_L , В	расч.										
	эксп.										
U_C , В	расч.										
	эксп.										
Φ_R , град	расч.										
	эксп.										
Φ_L , град	расч.										
	эксп.										
Φ_C , град	расч.										
	эксп.										

Амплитудно-частотные характеристики



Фазочастотные характеристики



Вопросы

- Гармонические колебания в параллельном колебательном контуре.
- Резонанс в параллельном колебательном контуре.
- Векторные диаграммы для параллельного контура при $\omega > \omega_{res}$.
- Векторные диаграммы для параллельного контура при $\omega < \omega_{res}$.
- Волновое сопротивление, резонансная частота, добротность параллельного колебательного контура.
- Амплитудно-частотная характеристика параллельного колебательного контура.
- Фазо-частотная характеристика параллельного колебательного контура.

Вопросы к зачету

1. Линейная цепь. Определение.
2. Идеальные источники ЭДС и тока.
3. Неидеальные источники ЭДС и тока.
4. Элементы R, С и L в линейных цепях.
5. Линейные электрические цепи и принцип наложения (теорема суперпозиции).
6. Принцип дуальности. Дуальные цепи и дуальные элементы.
7. Свободные колебания в электрических цепях.
8. Свободные колебания в цепи из индуктивности и активного сопротивления.
9. Свободные колебания в цепи из емкости и активного сопротивления.
10. Свободные колебания в последовательном RCL контуре.
11. Свободные колебания в параллельном RCL контуре.
12. Полное комплексное сопротивление двухполюсника.
13. Векторные диаграммы для последовательного контура при $\omega > \omega_{per}$ и $\omega < \omega_{per}$.
14. Резонанс в параллельном колебательном контуре.
15. Векторные диаграммы для параллельного контура при $\omega > \omega_{per}$ и $\omega < \omega_{per}$.
16. Ступенчатые воздействия на электрические цепи.
17. Воздействие перепада напряжения на последовательный RL-контур.
18. Воздействие перепада напряжения на последовательный RC-контур.
19. Воздействие перепада напряжения на последовательный колебательный контур RLC.
20. Воздействие перепада тока на параллельный колебательный контур RLC.
21. Переходные характеристики электрических цепей. Интеграл Дюамеля.
22. Импульсное воздействие на электрические цепи.
23. Воздействие видеоимпульса прямоугольной формы на последовательный RLC контур.
24. Как осуществить эквивалентное преобразование неидеального источника напряжения в неидеальный источник тока и обратное преобразование?
25. Представьте все возможные виды вольтамперных характеристик исследованных активных и пассивных двухполюсников. В чем их различия?
26. К идеальной катушке индуктивности с ненулевым начальным значением тока подключается идеальный источник постоянной ЭДС. Как будет изменяться график при изменении величины начального тока?
27. К идеальной катушке индуктивности с нулевым начальным значением тока подключается идеальный источник синусоидальной ЭДС. Нарисуйте временные зависимости тока в индуктивности при различных начальных фазах подключения источника ЭДС.
28. К идеальному конденсатору с ненулевым начальным напряжением подключается источник постоянного тока. Нарисуйте временные зависимости напряжения на конденсаторе при различных значениях начального напряжения.
29. К идеальному конденсатору с нулевым начальным значением напряжения подключается идеальный источник синусоидального тока. Нарисуйте временные зависимости напряжения на конденсаторе при различных начальных фазах подключения источника тока.
30. Что такое переходный процесс?
31. Возникают ли переходные процессы при коммутации в резистивных схемах? Почему?
32. Как по графику переходного процесса для схем с одним реактивным элементом измерить постоянную времени?
33. Какие характерные точки можно выделить на осцилограммах мгновенных значений энергии в катушке и конденсаторе при разряде конденсатора на идеальную катушку индуктивности?
34. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического

- уравнения при отсутствии потерь в контуре?
35. Как происходит обмен энергией между компонентами схемы при переходном процессе в отсутствие потерь?
 36. Как изменяется форма осцилограмм тока в контуре и напряжений на компонентах при введении в контур небольшого сопротивления (колебательный процесс)?
 37. Какими величинами характеризуется затухание тока при колебательном переходном процессе?
 38. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического уравнения при колебательном переходном процессе?
 39. Сравните форму кривых тока и напряжений при апериодическом переходном процессе с соответствующими кривыми для **RL**- и **RC**-цепей.
 40. Какое положение на комплексной плоскости занимают корни характеристического уравнения при апериодическом переходном процессе?
 41. Дайте определения переходной характеристики цепи $h(t)$, единичного ступенчатого воздействия напряжения (тока).
 42. Приведите переходные характеристики для последовательного **RL** контура.
 43. Приведите переходные характеристики для последовательного **RC** контура.
 44. Какие характерные точки можно выделить на осцилограммах напряжения на конденсаторе и тока в последовательном **RCL** контуре при воздействии перепадом напряжения?
 45. Какие характерные точки можно выделить на осцилограммах тока через индуктивность и напряжения на зажимах параллельного **RCL** контура при воздействии перепадом тока?
 46. Каковы основные характеристики гармонического сигнала?
 47. Чем различаются понятия фазового сдвига и начальной фазы для гармонических сигналов?
 48. Как изображаются гармонические токи и напряжения в комплексной форме (алгебраическая и показательная форма)?
 49. Гармонические колебания в последовательном колебательном контуре.

Методические материалы
к лабораторным работам по курсу
«Теория линейных схем»

Составители: Александр Юрьевич Липинский
Анна Николаевна Рудякова

Донецкий национальный университет

Підписано до друку 28.08.2011 р. Формат 60x84 1/16.
Ум. друк. арк. 2,25. Друк лазерний. Зам. № 377. Накл. 100 прим.

Надруковано в ТОВ «Цифрова типографія»
Адреса: м. Донецьк, вул. Челюскінців, 291а, тел.: (062) 388-07-31, 388-07-30