

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»

---

**Избранные лабораторные работы  
по теоретической электротехнике**  
Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2014

УДК 621.3.011 (07)

ББК 3 211 я 7

И 32

Авторы: А. П. Барков, В. В. Панкин, В. Н. Соколов,  
В. В. Федоров.

И 32 Избранные лабораторные работы по теоретической  
электротехнике. Лабораторный практикум / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ  
«ЛЭТИ», 2014. – 74 с.

ISBN

Приведено описание избранных лабораторных работ по ТОЭ, в которых использовано моделирование электрических цепей с цифровой обработкой информации с использованием программного пакета *Multisim* по темам: резистивные цепи, переходные процессы, установившийся синусоидальный режим, частотные характеристики и спектры, индуктивно связанные цепи.

Предназначено для использования студентами всех технических специальностей при работе в лаборатории электрических цепей.

УДК 621. 3.011 (07)

ББК 3 211 я 7

ISBN

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014

## **Предисловие**

Настоящее издание предназначено для студентов, обучающихся на технических факультетах Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», и включает 10 избранных лабораторных работ по основным разделам теоретической электротехники. Работы, реализованные на персональных компьютерах с помощью программных средств *Multisim*, позволяют привить студентам навыки по составлению схем электрических цепей, по практическим самостоятельным исследованиям процессов, протекающих в них, и по теоретической оценке полученных результатов.

## **Требования к оформлению отчетов**

Отчет по лабораторной работе должен быть оформлен в формате А4. Титульный лист должен содержать название факультета и кафедры, название и номер лабораторной работы, номер группы, ФИО студента и преподавателя.

В отчет должен быть включен протокол исследований, подписанный преподавателем, с указанием даты и фамилии студента.

При оформлении отчета необходимо указать цель работы; в каждом пункте исследований должна быть изображена выполненная по ГОСТу принципиальная схема цепи, приведены таблицы полученных результатов и наблюдений, а также расчетные формулы. Там, где это необходимо, должны быть построены графики и диаграммы, приведены осциллограммы и дана оценка полученных результатов.

В конце отчета требуется сделать заключение по самостоятельным исследованиям и письменно ответить на все приведенные вопросы.

## Работа № 1

*Цель работы:* экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) линейных и нелинейных резисторов, а также источников питания.

## 1.1. Подготовка к работе

### 1.1.1. Вольт-амперные характеристики источников питания

Идеальные источники напряжения и тока имеют ВАХ, изображенные сплошными линиями соответственно на рис. 1.1, *а*, *б*. ВАХ реальных источников изображены штриховыми линиями на рис. 1.1, *а*, *б*; схемы замещения источников показаны на рис. 1.2, *а*, *б*.

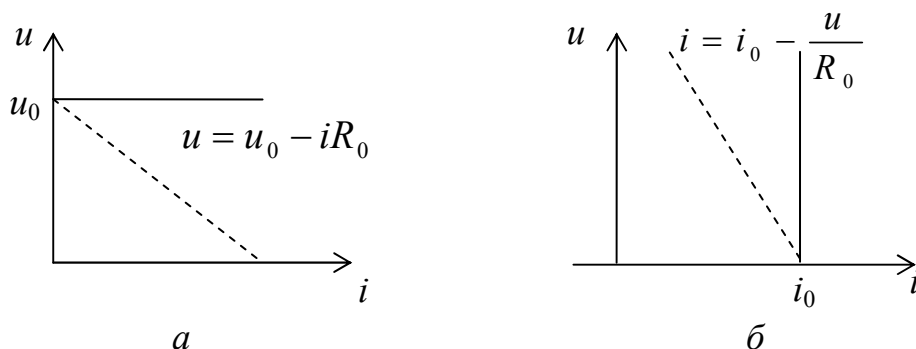


Рис. 1.1

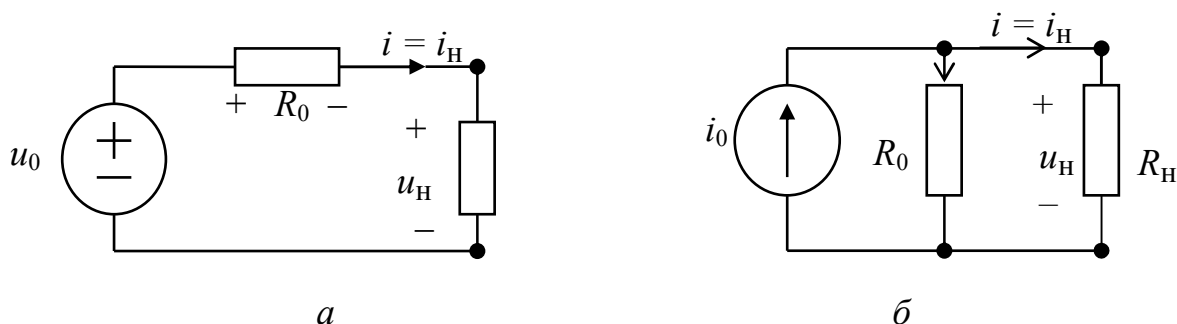


Рис. 1.2

Из ВАХ нагруженного реального источника напряжения следует, что при токе  $i = 0$  в режиме холостого хода (ХХ) напряжение  $u_{\text{ХХ}}$  равно напряжению идеального источника  $u_{\text{ХХ}} = u_0$ . Внутреннее сопротивление источника напряжения определяется выражением

$$R_0 = \frac{u_0 - u_H}{i_H}, \quad (1.1)$$

причем при внутреннем сопротивлении  $R_0 \rightarrow 0$  ВАХ стремится к характеристике идеального источника. Из ВАХ реального источника тока следует, что при внутреннем сопротивлении  $R_0 \rightarrow \infty$  его характеристика становится характеристикой идеального источника  $i = i_0$ .

### 1.1.2. Характеристики резистивных элементов

У линейного резистора ВАХ (рис. 1.3, а) описывается уравнением прямой, проходящей через начало координат:  $u = Ri$ . ВАХ нелинейного

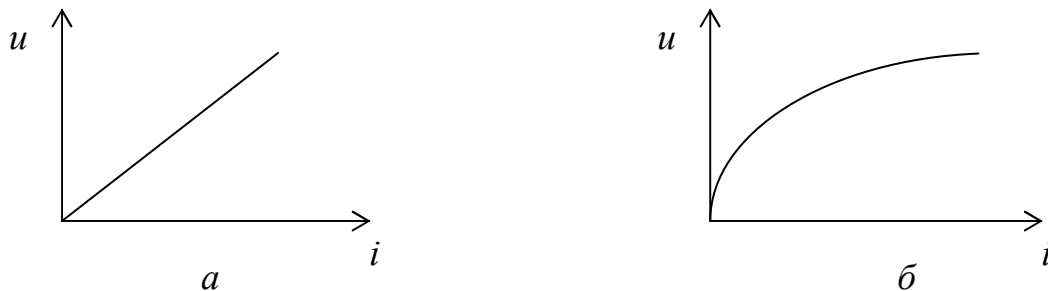


Рис. 1.3

резистора (рис. 1.3, б) соответствует нелинейному уравнению  $u = f(i)$ .


## 1.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*


Включите компьютер и на рабочем столе двойным щелчком откройте папку “Лаб. раб. ТОЭ” и затем “Лаб. раб. №1”. После загрузки в открывшемся окне на экране монитора появится схема исследуемой цепи, представленная на рис. 1.4. На схеме показаны приборы, используемые при экспериментальных исследованиях: XFG1 – генератор напряжения трех форм сигналов, V1 – источник постоянного напряжения, S1 – реверсивный тумблер переключения полярности напряжения, подаваемого на исследуемые цепи, S2 – ключ переключения источников постоянного и переменного напряжений, подключаемых к исследуемым цепям, S3 и S4 – многосекционные ключи для подключения различных элементов исследуемых цепей. В схеме (рис. 1.4) параллельно с источником постоянного напряжения V1 подключен потенциометр R8, который используется для изменения постоянного напряжения, подаваемого на исследуемые цепи.

6

Измерения напряжений и токов элементов исследуемых цепей производятся с помощью универсальных измерительных приборов ХММ2 и ХММ1. Для наблюдения гармонических сигналов в работе используется осциллограф ХСC1. У осциллографа входное напряжение подается на канал “А”, а на канал “В” подается напряжение пропорциональное току, снимаемое с резистора R5. Режим работы осциллографа – ждущий, синхронизация внутренняя по каналу “А”.

### **1.2.1. Определение параметров реальных источников постоянного напряжения.**

Исследуйте свойства источника постоянного напряжения. Для этого активируйте схему переключателем  (0\1). Ключами S1 и S2, нажимая клавиши 1 и 2 клавиатуры, подключите источник постоянного напряжения V1 к цепи для исследования ВАХ элементов. Переключатели S3 и S4 установите в положение 1 (ток  $I = 0$ ). Передвигая движок потенциометра R8 клавишей A или Shift A, установите напряжение холостого хода источника  $U_0 = 4$  В. Для этого откройте лицевые панели мультиметров ХММ2 и ХММ1, сделав 2 щелчка левой кнопкой мыши по их изображению. На панелях мультиметров установите вид работы на постоянном токе.

**Внимание!** При изменении схемы измерений каждый раз повторяйте  переключателем (0\1) активацию цепи.

Последовательно переключателем S4 подключите источник к цепи из четырёх резисторов и занесите в табл. 1.1 значения пяти токов и напряжений.

Таблица 1.1

$R_H$ , кОм	$\infty$	1000	800	600	400
$u_H$ , В					
$i_H$ , мА					

Постройте ВАХ источника напряжения и определите значение его внутреннего сопротивления  $R_0$  по формуле (1.1).

### **1.2.2. Определение параметров реальных источников синусоидального напряжения**

Подключите ключом S2 генератор синусоидального напряжения с частотой  $f = 1$  кГц и амплитудой  $U_m = 10$  В. Повторите измерения аналогичные измерениям в п. 1.2.1.

### **1.2.3. Определение ВАХ линейного резистора**

По указанию преподавателя подключите к одному из резисторов источник постоянного напряжения. Установите с помощью потенциометра

R8 напряжение  $u = +3$  В и зафиксируйте при этом значение тока  $i$ . Измените величину напряжения  $u$  через 1 В от + 3 до 0 В и затем от 0 до – 3 В. Изменение полярности источника произведите с помощью ключа S1. При каждом измерении зафиксируйте значение тока  $i$ . Результаты измерений напряжений и токов запишите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

$u$ , В							
$i$ , мА							
$R$ , Ом							

Постройте по значениям таблицы ВАХ линейного резистора и по ней определите сопротивление резистора  $R = \Delta u / \Delta i$ . Сопоставьте сопротивление  $R$  со значением резистора в схеме.

#### 1.2.4. Определение ВАХ нелинейного резистора

Подключите источник постоянного напряжения к нелинейному элементу (R6, R7) и произведите измерения аналогично п. 1.2.3, изменяя напряжение от + 3 до –3 В. Результаты измерений напряжений и токов запишите в табл. 1.2. По результатам измерений постройте ВАХ нелинейного резистора.

### 1.3. Требования к отчету

Отчет должен содержать цель работы, все пункты экспериментального исследования, схемы цепей, таблицы, графики, расчетные формулы и вычисления по ним, размещенные в соответствующих пунктах отчета, а также заключение по работе.

Кроме того, необходимо письменно ответить на следующие вопросы:

1. Что определяет угол наклона ВАХ линейного резистора?
2. Если точки ВАХ для линейного резистора полученные экспериментально не лежат строго на прямой, то чем это можно объяснить и каким образом можно провести прямую линию?
3. Какой зависимостью связаны между собой ток и напряжение линейного и нелинейного резисторов?
4. На какой вход осциллографа подается сигнал, пропорциональный току, а на какой – напряжению?
5. Может ли форма тока линейного резистора отличаться от формы напряжения?
6. Заметно ли отличие формы тока от формы синусоидального напряжения при исследовании нелинейного резистора?
7. Можно ли исследуемые источники считать близкими к идеальным?



## Работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

*Цель работы:* экспериментальное исследование линейных разветвленных резистивных цепей с использованием методов наложения, эквивалентного источника и принципа взаимности.

#### 2.1. Подготовка к работе

В работе анализируют резистивную цепь с источниками постоянного напряжения  $U$  и тока  $I$  (рис. 2.1).

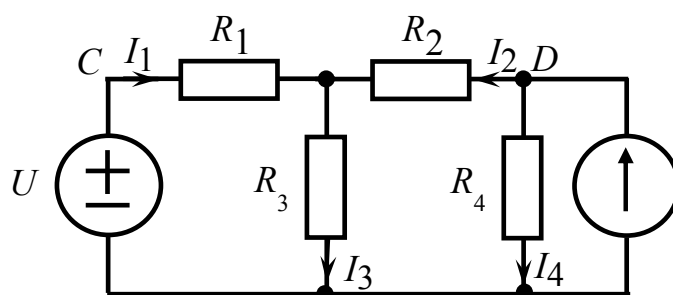


Рис. 2.1

В цепи  $U = 4$  В,  $I \approx 2$  мА,  $R_1 = R_2 = 1,5$  кОм;  $R_3 = R_4 = 3$  кОм. Для определения токов и напряжений ветвей используют некоторые методы анализа сложных цепей, сущность которых изложена ниже.

*Метод наложения.* Реакцию цепи на действие нескольких источников определяют как алгебраическую сумму реакций на действие каждого источника в отдельности. Метод наложения применительно к задаче определения токов в исследуемой цепи поясняет рис. 2.2, согласно которому  $I_1 = I'_1 - I''_1$ ;  $I_2 = -I'_2 + I''_2$ ;  $I_3 = I'_3 + I''_3$ ;  $I_4 = I'_4 + I''_4$ .

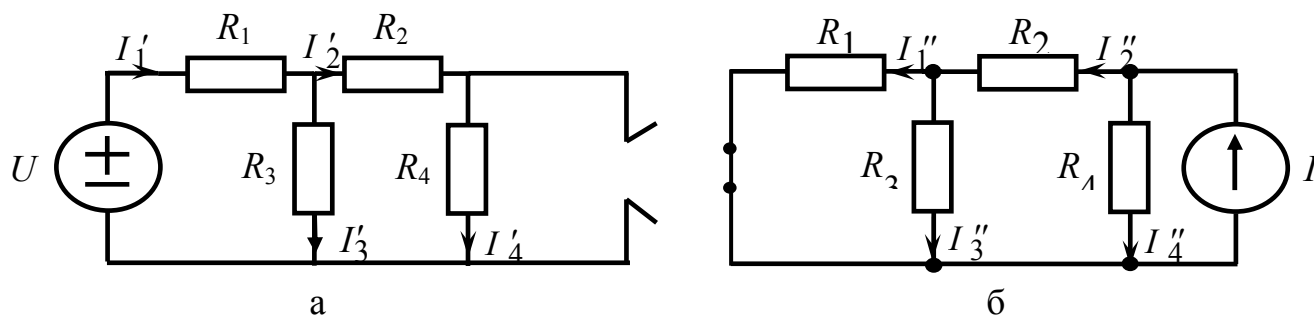


Рис. 2.2

*Метод эквивалентного источника напряжения.* По отношению к одной из ветвей линейную цепь с несколькими источниками можно заменить одним эквивалентным источником напряжения  $U_0$  с последовательно соединенным сопротивлением  $R_0$ .

По отношению к ветви с сопротивлением  $R_3$  рассматриваемую цепь (рис. 2.1) можно представить схемой, приведенной на рис. 2.3, а.

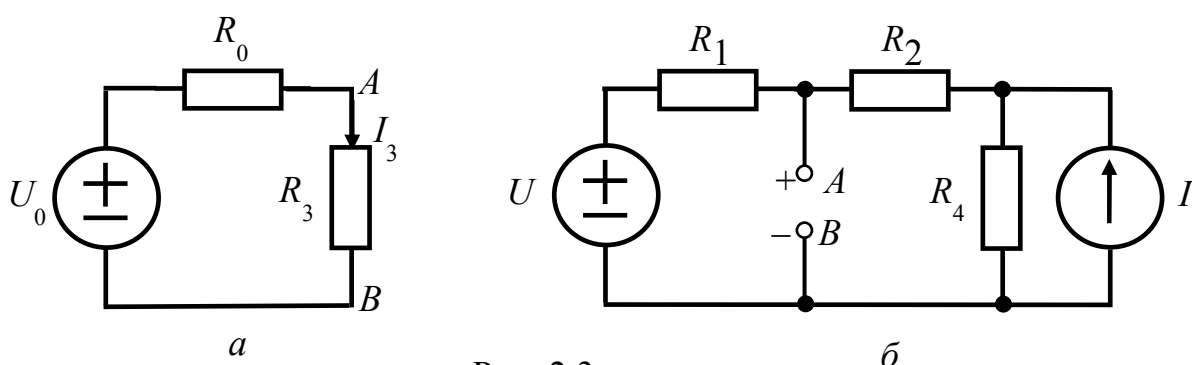


Рис. 2.3

Из схемы видно, что  $I_3 = U_0 / (R_0 + R_3)$ , где  $U_0$  – напряжение холостого хода между узлами  $A$  и  $B$  ветви 3 при ее обрыве (рис. 2.3, б);  $R_0$  – эквивалентное (выходное) сопротивление всех остальных ветвей, найденное по отношению к узлам  $A, B$  при исключении источников в схеме рис. 2.3, б.

*Принцип взаимности.* Если источник напряжения (единственный в цепи), действуя в одной ветви линейной электрической цепи (рис. .4, а),

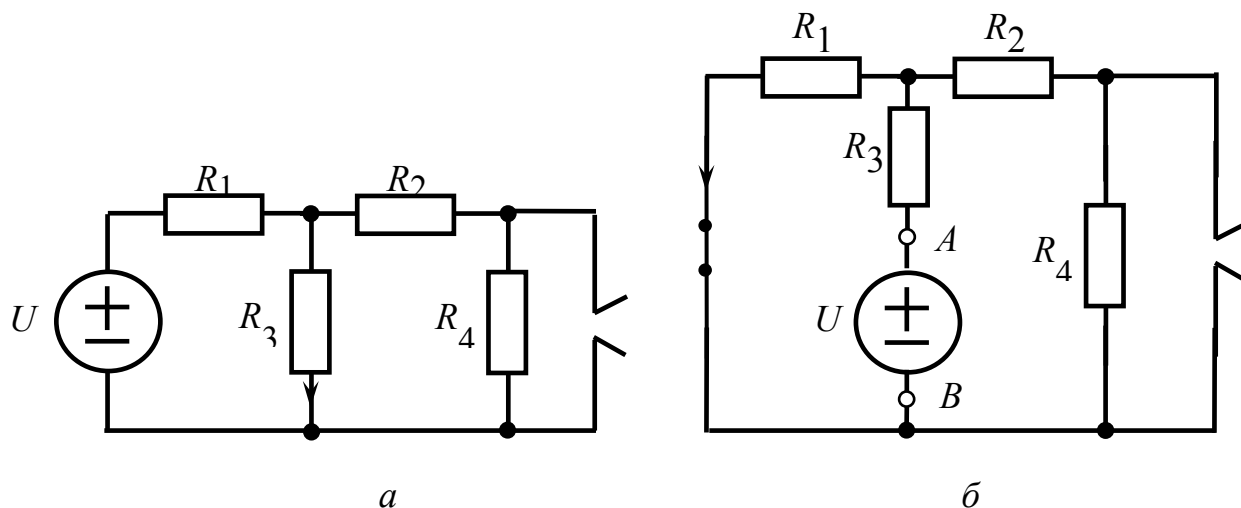


Рис. 2.4

вызывает ток в другой ветви, то тот же источник после его переноса во вторую ветвь (рис. 2.4, б) вызовет в первой ветви такой же ток.

## 2.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и затем “Лаб. раб. №2”. В открывшемся окне появится схема линейной резистивной цепи (рис. 2.5) с подключенными к ней измерительными приборами: источниками постоянного напряжения  $V$ ,  $V2$ , источником постоянного тока  $I$ , измерительными амперметрами  $A1 \div A4$  и вольтметрами  $U0 \div U4$ . Резистивные цепи, показанные на рис. 2.1  $\div$  2.4, собираются из элементов схемы (рис. 2.5) подключением и отключением источников и резисторов с помощью ключей  $S1 \div S3$ , управляемых с клавиатуры клавишами 1, 2, 3 соответственно.

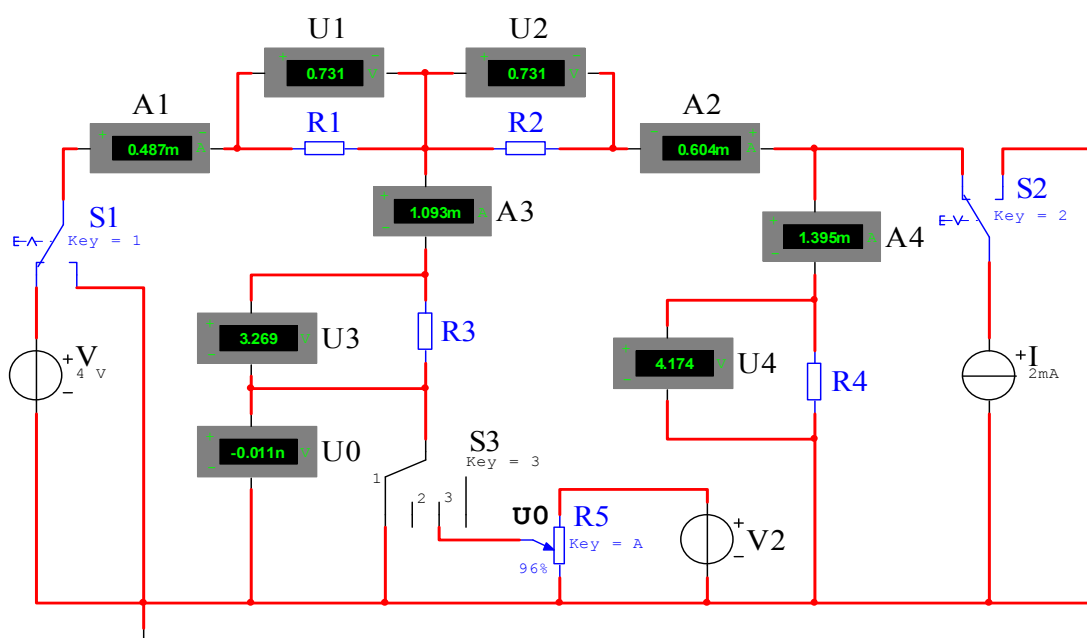



Рис. 2.5

### 2.2.1. Исследование цепи при питании ее от двух источников

Для выполнения экспериментальных исследований цепи активизируйте схему, показанную на рис. 2.5. Для этого подведите курсор мыши к кнопке  (*Simulate*) в верхней строке окна и щелкните по ней левой кнопкой мыши. Соберите схему цепи при питании ее от двух источников, показанную на рис. 2.1. Установите напряжение источника напряжения  $U = 4 \text{ В}$  и источника тока  $I = 2 \text{ мА}$ . Для этого подведите вначале курсор к изображению источника напряжения  $V$  и щелкните по нему два раза левой кнопкой мыши. В открывшемся окне *Power\_Sources* нажмите на клавишу *Value*, а затем в графе *Voltage* (V) установите с клавиатуры напряжение источника 4 В. Остальные параметры в строках закладки должны быть нулевыми. Аналогично установите ток источника тока 2 мА.

Запишите напряжения и токи всех ветвей цепи по показаниям амперметров и вольтметров. Результаты измерений внесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ ветви	1	2	3	4
$U_k, \text{В}$				
$I_k, \text{мА}$				

Полученные данные проверьте, используя уравнения Кирхгофа.

### 2.2.2. Определение токов цепи методом наложения

Проделайте два опыта:

1. подключите к цепи только источник напряжения  $U = 4 \text{ В}$  и проведите измерение токов в ветвях (см. рис. 2.2, а);
2. подключите к цепи только источник тока  $I = 2 \text{ мА}$  и проведите измерение токов в ветвях (см. рис. 2.2, б).

Результаты измерений внесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Источники	Токи ветвей	1	2	3	4
$U = 4 \text{ V}; I = 0 \text{ mA}$	$I'_k$				
$U = 0 \text{ V}; I = 2 \text{ mA}$	$I''_k$				
$U = 4 \text{ V}; I = 2 \text{ mA}$	$I_k$				

По данным обоих опытов определите методом наложения токи в ветвях и заполните нижнюю строку табл. 2.2. Полученные значения токов сопоставьте с измерениями при выполнении п. 2.2.1.

### 2.2.3 Определение тока в ветви с сопротивлением $R_3$ методом эквивалентного источника напряжения

Проделайте два опыта:

1. Подключите к цепи два источника  $U = 4 \text{ V}$  и  $I = 2 \text{ mA}$ ; произведите обрыв ветви 3 на участке  $A, B$  переключателем  $S3$  и измерьте напряжение  $U_0$  на разомкнутых зажимах  $A, B$  по показаниям измерительного вольтметра  $U0$  (см. рис. 2.3, б).

2. Исключите из схемы источники  $U$  и  $I$  и подключите переключателем  $S3$  потенциометр  $R5$  и источник напряжения  $V2$  к разомкнутым выводам  $A, B$  ветви 3. Установите по вольтметру  $U0$  напряжение на выводах  $A$  и  $B$  равное измеренному напряжению  $U_0$ . Для этого используйте движок потенциометра  $R5$ , двигая который можно изменять напряжение на нем. Увеличение напряжения происходит по нажатию клавиши  $A$ , а уменьшение – клавишами  $Shift A$ . Измерьте ток  $I_3$  в ветви 3 и сравните его со значением этого же тока, полученным в п. 2.2.1.

### 2.2.4 Экспериментальная проверка принципа взаимности

Отключите от цепи источник тока  $I$  и сделайте два опыта:

1. Вновь установите напряжение  $U = 4 \text{ V}$  и измерьте ток  $I_3$  в ветви 3 (см. рис. 2.4, а).

2. Отключите от цепи источник напряжения  $V$  и подключите переключателем  $S3$  потенциометр  $R5$  и источник напряжения  $V2$  в разрыв ветви 3 к выводам  $A, B$ . Установите по вольтметру  $U0$  напряжение на выводах  $A$  и  $B$   $U_0 = 4 \text{ V}$  аналогично тому, как это было сделано в опыте 2 п.

2.2.3. Измерьте с помощью амперметра  $A1$  ток  $I_1$  в ветви 1 и сравните его с током ветви 3, определенным в предыдущем опыте этого раздела.

### 2.3. Требования к отчету

В отчете должны быть отражены цель работы, все разделы экспериментального исследования и заключение с краткими выводами. По каждому разделу в отчет следует включить его название, схемы исследуемых цепей, таблицы и необходимые расчеты. Кроме того, данные эксперимента в п.2.2.3 должны быть подтверждены результатами расчета цепи (рис. 2.1) методом эквивалентного источника напряжения (параметры схемы приведены в описании работы). Необходимо также письменно ответить на следующие вопросы: 1. Каковы результаты контроля данных в п. 2.2.1? 2. Изменяются ли токи ветвей, если одновременно изменить полярность источника напряжения (ИН) и направление тока источника тока (ИТ) на противоположные? 3. Чему равно напряжение между узлами  $C$  и  $D$  цепи (рис. 2.1)? 4. Как изменить напряжение ИН, чтобы ток  $I_1$  в цепи рис. 2.1 стал равен нулю? 5. Почему цепь рис. 2.4,  $b$  при  $U = U_{xx}$  реализует схему метода эквивалентного источника напряжения рис. 2.3,  $a$ ? 6. Чему будет равен ток  $I_1$  если ИН  $U$  поместить в ветвь 4, а ИТ отключить? 7. Как проконтролировать результаты экспериментов в пп. 2.2.2, 2.2.3 и 2.2.4?

## Работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

#### В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

*Цель работы:* изучение связи между видом свободного процесса в электрической цепи и расположением собственных частот (корней характеристического уравнения) на комплексной плоскости; приближенная оценка собственных частот и добротности  $RLC$ -контура по осциллограммам.

#### 3.1. Подготовка к работе

В работе предлагается исследовать свободные процессы в цепях, схемы которых представлены на рис. 3.1 и рис. 3.2. Цепи возбуждаются очень короткими импульсами тока  $i(t)$ , заряжающими емкость  $C$ . В паузах между

импульсами емкость разряжается, цепь находится в свободном режиме, так как в это время источник возбуждения отключен ( $i(t) = 0$ ).

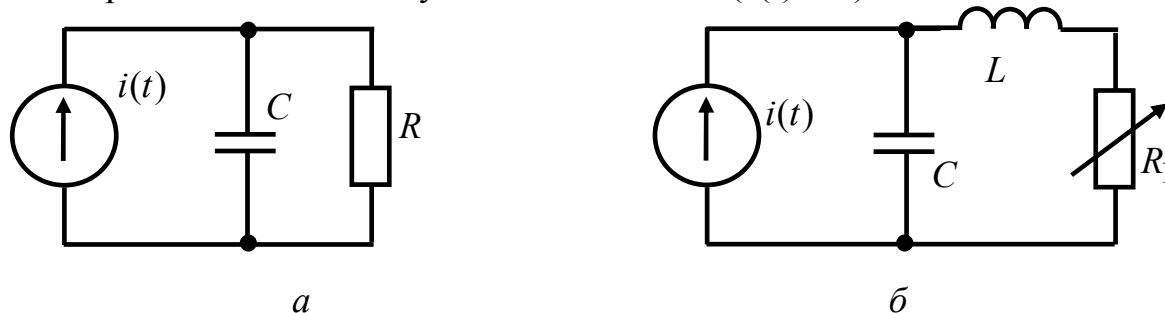


Рис. 3.1

В линейных цепях свободный процесс описывается однородными линейными дифференциальными уравнениями и его вид определяется корнями характеристического уравнения (собственными частотами цепи  $p_k$ ).

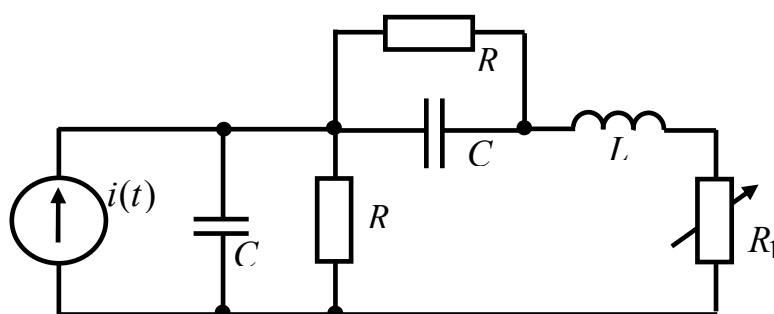


Рис. 3.2

При возбуждении цепи источником тока собственные частоты можно рассчитать как нули входной проводимости цепи  $Y(p)$ :

а) для цепи первого порядка, представленной на рис. 3.1, а,  $Y(p) = pC + 1/R = 0$ , откуда

$$p_1 = -\alpha = -1/(RC); \quad (3.1)$$

б) для цепи второго порядка, представленной на рис. 3.1, б,  $Y(p) = pC + 1/(pL + R_1) = 0$ , откуда

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad \alpha = R_1/2L, \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \quad (3.2)$$

в) для цепи третьего порядка, представленной на рис. 3.2,  $Y(p) = pC + \frac{1}{R} + \frac{(pC + 1/R)/(pL + R_1)}{pC + 1/R + 1/(pL + R_1)}$ , откуда

$$p_1 = -\alpha_1 = -1/(RC), \quad p_{2,3} = -\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - \frac{2 + R_1/R}{LC}}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{R_1}{L} + \frac{1}{RC} \right). \quad (3.3)$$

Общий вид решения для напряжения любого элемента цепи

$$u(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t},$$

где  $A_k$  – постоянные интегрирования,  $n$  – порядок цепи.

У цепи первого порядка одна собственная частота (3.1), вещественная и отрицательная, свободный процесс имеет вид

$$u(t) = A e^{-\alpha t} = A e^{-t/\tau}; \quad (3.4)$$

процесс экспоненциальный, причем  $\alpha$  – постоянная затухания, а  $\tau$  – постоянная времени экспоненты. Временная диаграмма свободного процесса показана на рис. 3.3, а, причем  $\tau$  – интервал времени, соответствующий любой подкасательной к экспоненте.

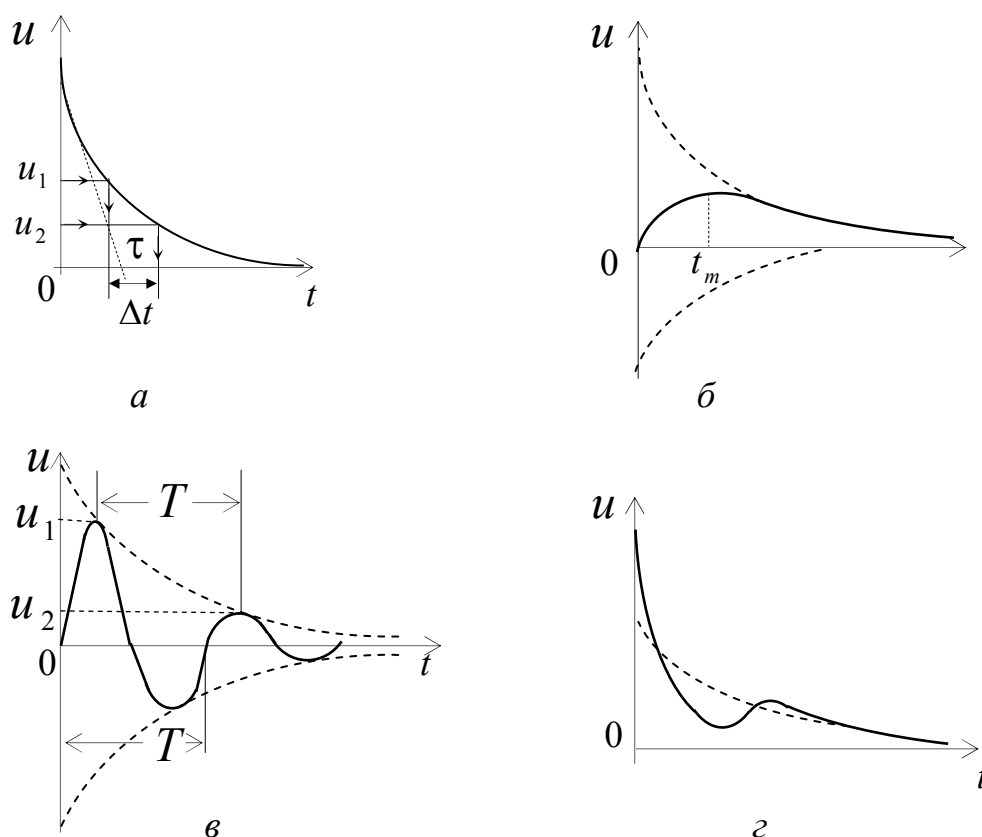


Рис. 3.3

В цепи второго порядка две собственные частоты (3.2) могут быть вещественными различными (апериодический режим; временная диаграмма суммы двух экспонент, изображенных пунктиром, показана на рис. 3.3, б), кратными вещественными  $p_1 = p_2 = -\alpha$  (критический режим) или комплексно-сопряженными (колебательный режим). Вид критического процесса  $u(t) = A_1 e^{-\alpha t} + A_2 t e^{-\alpha t}$  близок к диаграмме, показанной на



рис. 3.3, б, причем момент достижения максимума  $t_m = -1/\alpha$ , если  $i_L(0^+) = 0$ . Комплексно-сопряженным частотам соответствует качественно новый характер свободного процесса – колебательный:

$$u(t) = A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \beta), \quad (3.5)$$

где  $\alpha$  – постоянная затухания,  $\omega$  – частота затухающих колебаний ( $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ ). Временная диаграмма колебательного процесса представлена на рис. 3.3, в.

Дальнейшее увеличение порядка цепи к качественно новым явлениям не приводит. Так, согласно (3.3), в схеме, изображенной на рис. 3.2, собственные частоты могут быть либо три вещественные, либо одна вещественная и две комплексно-сопряженные, например,  $p_1 = -\alpha_1$  и  $p_{2,3} = -\alpha_2 \pm j\omega$ . Временная диаграмма свободного процесса представлена на рис. 3.3, г – это сумма экспоненты (см. пунктир) и затухающей синусоиды.

В некоторых случаях собственные частоты относительно просто рассчитываются по осциллограммам. Например, согласно (3.4) по рис. 3.3, а можно рассчитать постоянную затухания

$$\alpha = 1/\tau = \ln(u_1/u_2)/\Delta t. \quad (3.6)$$

Для случая рис. 3.3, в постоянная затухания также может быть определена на основании (3.6), но при этом обязательно выполнение условия  $\Delta t = T = 2\pi/\omega$ , что вытекает из (3.5).

В случаях рис. 3.3, б, г найти собственные частоты можно лишь приближенно, выделив, как показано пунктиром, отдельные составляющие процесса.

Особый интерес для  $RLC$ -контуров представляет определение добротности  $Q$  по виду свободного процесса в них. Так для последовательного  $RLC$ -контура

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \frac{\omega_0 L}{R} = 0,5\omega_0 / \alpha, \quad (3.7)$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – частота незатухающих колебаний в идеальном контуре ( $R=0$ ). Согласно (3.2) собственные частоты последовательного  $RLC$ -контура можно записать следующим образом:

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} (1 \pm \sqrt{1 - 4Q^2}), \quad (3.8)$$

причем  $Q < 0,5$  соответствует апериодический режим,  $Q = 0,5$  – критический режим,  $Q > 0,5$  – колебательный режим, а  $Q = \infty$  – незатухающий колебательный режим.

При  $Q > 10$  с высокой степенью точности можно считать

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} \pm j\omega_0. \quad (3.9)$$

С учетом (3.6) формула, позволяющая в этом случае определить добротность по осциллограмме рис. 3.3, в, имеет вид

$$Q = \frac{\omega_0}{2\alpha} = \frac{2\pi}{2\alpha T} = \frac{\pi}{\ln(u_1/u_2)}. \quad (3.10)$$

Для повышения точности можно брать отношения напряжений за  $n$  периодов колебаний:

$$Q = \frac{n\pi}{\ln \frac{u(t)}{u(t+nT)}}. \quad (3.11)$$

### 3.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и затем “Лаб. раб. №3”. После загрузки в открывшемся окне на экране монитора появится схема, представленная на рис. 3.4.

Схема позволяет собрать  $RLC$ -цепи первого, второго и третьего порядков (рис. 3.1, 3.2) с использованием ключей  $S1$  и  $S2$ , которые управляются с клавиатуры клавишами 1 и 2 соответственно.

Исследуемые цепи возбуждаются короткими периодическими импульсами тока, заряжающими  $C$ -элемент; для этого используется импульсный источник тока  $i = I_m t_n \delta(t)$ , где  $I_m$  и  $t_n$  – амплитуда и длительность короткого импульса, приближенно описываемого дельта-функцией). У источника тока установлена амплитуда импульсов тока  $I_m = 1$ , а их частота повторения  $f = 1$  кГц (т.е. период  $T = 1$  мс). В паузах между импульсами запасенная энергия расходуется в  $R$ -элементах цепи, что соответствует свободной составляющей переходных процессов. Для наблюдения переходных процессов в работе используется осциллограф

XSC1. У осциллографа входной сигнал подается на канал “А”, а выходной – на канал “В” (режим работы осциллографа – ждущий, синхронизация внутренняя по каналу “А”).

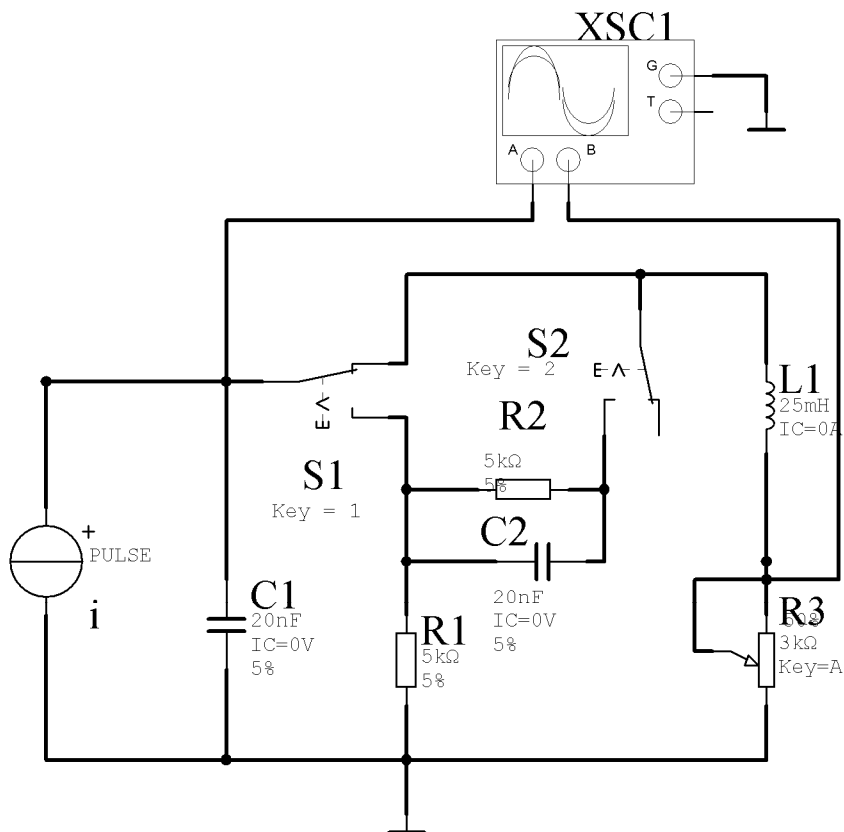





Рис. 3.4

Активация каждого режима работы цепи осуществляется клавишей *Simulate* ()

### 3.2.1. Исследование свободного процесса в цепи первого порядка

С помощью ключей S1, S2 соберите цепь, соответствующую схеме рис. 3.1, а, где  $R = R_1 = 5 \text{ кОм}$ ,  $C = C_1 = 0,02 \text{ мкФ}$  и снимите осциллограмму напряжения  $u_c(t)$ , соответствующую рис. 3.3, а. Для этого откройте окно осциллографа XSC1 двойным щелчком мыши по значку его изображения. Установите следующие значения: режим Y/T – установка временных диаграмм; Timebase Scale (временная развертка) –  $100 \text{ мс/Div}$ ; Channel A: DC – установка режима открытого входа, Scale (масштаб) –  $10 \text{ В/Div}$ ; Channel B: DC, Scale –  $10 \text{ В/Div}$ ; Sing, A – синхронизация ждущей развертки

от канала А. Если изображение осциллограммы окажется неустойчивым на экране осциллографа, в закладке меню *Simulate* в верхней строке окна выберете пункт *Pause*.

По осциллограмме напряжения  $u_C(t)$  определите постоянную времени  $\tau$  цепи первого порядка, используя метод подкасательной, как указано на рис. 3.3, а и по формуле (3.6). Значения напряжений  $u_1$ ,  $u_2$  и интервала  $\Delta t$  на осциллограмме можно определить по координатам курсоров Т1 и Т2, которые перемещаются по экрану осциллографа кнопками:  – влево и  – вправо или с помощью мыши.

Рассчитайте постоянную времени цепи  $\tau$  и по формуле (3.1). Сравните найденные значения постоянной времени цепи.

### **3.2.2. Исследование свободных процессов в цепи второго порядка**

Для исследования соберите цепь, соответствующую схеме рис. 3.1, б ( $C = C_1 = 0,02$  мкФ;  $L = L_1 = 25$  мГн;  $R_1 = R_3$ ). Изменяя величину сопротивления переменного резистора (уменьшая процентное соотношение от максимального 3 кОм клавишами *Shift A*, увеличивая клавишей *A*), снимите для трех режимов свободных процессов в цепи осциллограммы напряжений  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$ , пропорционального току.

Исследование апериодического режима произведите при величине сопротивления потенциометра  $R_3 = 3$  кОм (100%), колебательного режима при величине сопротивления потенциометра  $R_3 = 0,5$  кОм (17 %), определите экспериментально сопротивление потенциометра  $R_3$  (в диапазоне 50 – 70 %) для критического режима в цепи (граничного между колебательным и апериодическим режимами). Зафиксируйте величину сопротивления  $R_{3\text{крит}}$ .

Установите величину сопротивления  $R_3 = 30$  Ом (1 %) и снимите осциллограмму напряжения  $u_C(t)$  колебательного режима свободного процесса в цепи при высокой добротности.

Рассчитайте теоретические параметры всех режимов работы цепи  $\alpha$ ,  $\omega_0$ ,  $Q$ ,  $p_{1,2}$  по формулам (3.2) и (3.7) и по значениям собственных частот цепи определите длительность свободного процесса  $t_{\text{пп}}$  для каждого режима. По осциллограмме колебательного режима в цепи определите значения напряжений  $u_1$ ,  $u_2$  и периода  $T$ , а затем рассчитайте по формулам (3.8) –

– (3.11) экспериментально найденные параметры  $\alpha$ ,  $\omega_0$ ,  $Q$ . Частота затухающих колебаний определяется выражением  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , [с<sup>-1</sup>].

### **3.2.3. Исследование свободных процессов в цепи третьего порядка**

Для исследования соберите цепь, соответствующую схеме рис. 3.2 ( $C = C_1 = C_2 = 0,02$  мкФ,  $R = R_1 = R_2 = 5$  кОм,  $L = L_1 = 25$  мГн). Снимите осциллограммы напряжений  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$  при  $R_3 = 1$  кОм (33 %). Рассчитайте теоретически по формуле (3.3) частоты собственных колебаний цепи.

## **3.3. Требования к отчету**

Отчет должен содержать цель работы, материалы по каждому пункту выполненных экспериментов (схемы цепей, осциллограммы процессов, расчетные формулы и выполненные по ним вычисления, диаграммы расположения собственных частот на комплексной плоскости) и заключение.

Кроме того, необходимо письменно ответить на следующие вопросы:

1. Каким аналитическим выражением описывается переходный процесс в цепи первого порядка? 2. Как по осциллограмме определить собственную частоту цепи первого порядка? Соответствует ли она теоретическому расчету по (3.1)? 3. Какими аналитическими выражениями (в общем виде) описываются графики процессов во всех исследуемых цепях второго порядка? Как определить по осциллограмме, снятой при  $R_1 = 0,5$  кОм, собственные частоты цепи второго порядка? 4. Каким аналитическим выражением описывается полученный график свободного процесса в цепи третьего порядка? 5. Каковы теоретические значения собственных частот цепи третьего порядка? Соответствует ли им осциллограмма и почему?

## **Работа № 4**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО РЕЖИМА В ПРОСТЫХ ЦЕПЯХ**

*Цель работы:* практическое ознакомление с синусоидальными режимами в простых  $RL$ -,  $RC$ - и  $RLC$ -цепях.

## 4.1. Подготовка к работе

При анализе электрических цепей в установившемся синусоидальном режиме важно твердо усвоить амплитудные и фазовые соотношения между токами и напряжениями элементов цепи. Необходимо помнить, что ток в резистивном элементе совпадает по фазе с напряжением, ток в индуктивности отстает, а в емкости опережает напряжение на четверть периода.

Необходимо учитывать, что комплексное сопротивление индуктивности и емкости есть функция частоты:

$$Z_L = j\omega L = Le^{j90^\circ}; \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{-j90^\circ}.$$

Функциями частоты являются, следовательно, и комплексные сопротивления  $RL$ -,  $RC$ - и  $RLC$ -цепей (см. рис. 4.1). Так, для  $RLC$ -цепи, изображенной на рис. 4.1, в, комплексное сопротивление равно:

$$Z = \dot{U}/\dot{I} = R + Z_L + Z_C = R + j(\omega L - 1/\omega C).$$

Реактивная составляющая этого сопротивления равна разности модулей индуктивного и емкостного сопротивлений и поэтому может принимать различные знаки: если она положительна, реакция цепи имеет индуктивный характер, если отрицательна – емкостный, если обращается в нуль, цепь будет находиться в состоянии резонанса.

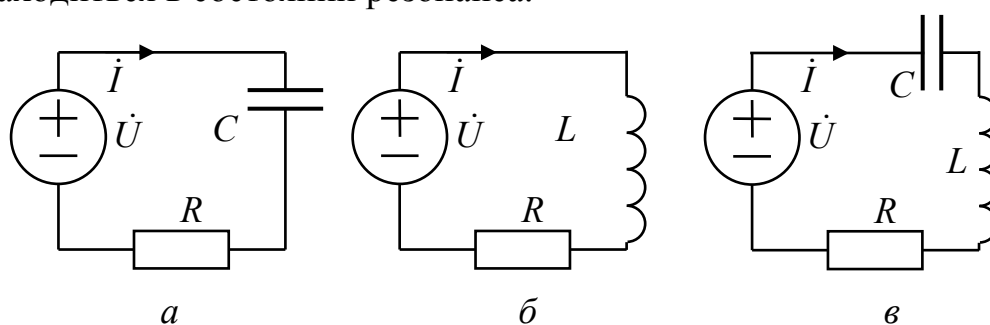


Рис. 4.1

Как модуль и аргумент комплексного сопротивления, так и определяемые ими по закону Ома действующее значение и начальная фаза тока в исследуемой  $RLC$ -цепи существенно зависят от соотношений индуктивного и емкостного сопротивлений:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}; \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}};$$

$$\alpha_i = \alpha_u - \varphi.$$

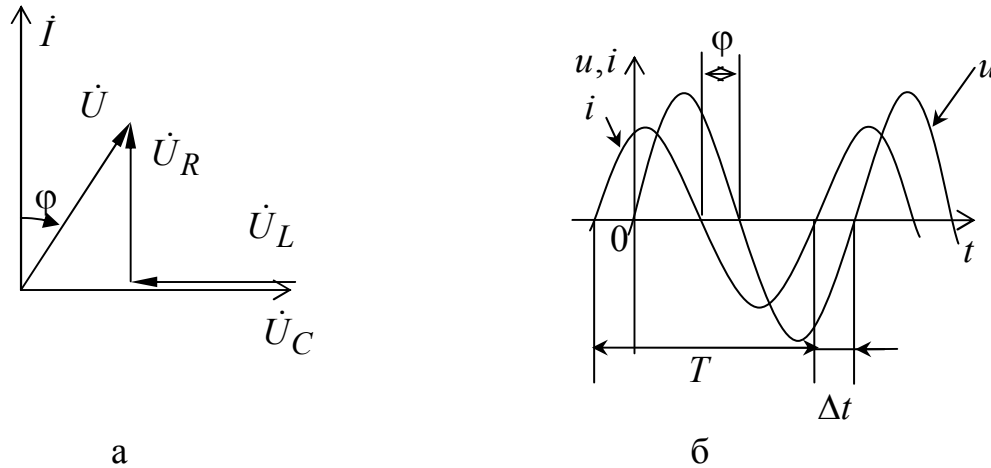


Рис. 4.2

Токи и напряжения цепи в установившемся синусоидальном режиме удобно наглядно представлять с помощью векторной диаграммы. Такая диаграмма для  $RLC$ -цепи приведена на рис. 4.2, *а*, где рассматривается случай  $\varphi = -45^\circ$ , т.е. ток  $\dot{I}$  опережает напряжение  $\dot{U}$  на  $45^\circ$  (т. е. на  $\Delta t = T/8$  – восьмую часть периода  $T$ ), что соответствует емкостной реакции и представленным временным диаграммам на рис. 4.2, *б*.

#### 4.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для проведения работы нужно открыть ярлык «Лабораторные работы» на рабочем столе монитора и затем «Лаб. работа №6». Схема цепи приведена на рис. 4.3. Для питания цепи применяется генератор синусоидального напряжения XFG1, выходное амплитудное напряжение которого  $U_m = 10\text{V}$ . Частота напряжения задается дискретно с клавиатуры компьютера. Измерение тока и напряжений осуществляется амперметром ХММ1, вольтметром ХММ2, а также индикатором напряжения U1 и динамическим пробником 1.4V (см. справа внизу панели ИНСТРУМЕНТОВ). Осциллограммы

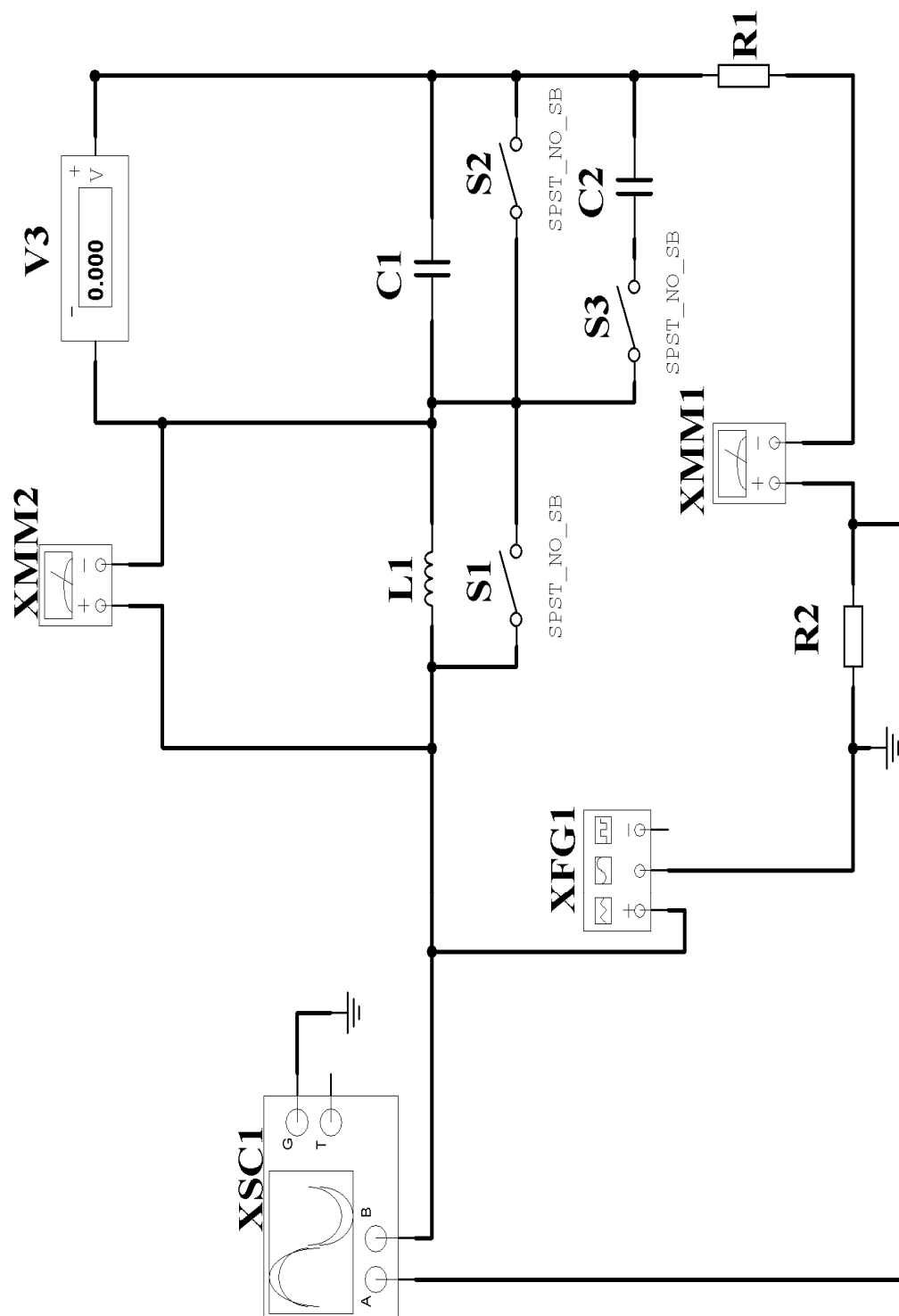



Рис. 4.3 Схема исследования RLC- цепи в установившемся режиме



входного напряжения и напряжения пропорционального току снимают двухканальным осциллографом XSC1. Ключи ( $S1 - S3$ ) переключаются с клавиатуры цифрами  $Key = 1.2.3$ .

Виртуальные изображения лицевых плат приборов осуществляются двумя щелчками левой кнопки [2ЛК] при установке курсора на их изображение. Для снятия частотных характеристик используется « Bode Plotter - XBP1»

#### 4.2.1. Исследование установившегося режима в RC -цепи

Соберите цепь, изображенную на рис. 4.1,а. Включите C1 или C1+C2 по указанию преподавателя. Задайте частоту генератора  $f = 8$  кГц. Кнопкой  на панели инструментов активируйте цепь. Откройте лицевые платы измерительных приборов. Установите на них род измерения на переменном токе. Измерьте ток и напряжения  $I$ ,  $U_C$  и  $U_R$  подключив *пробник*, к соответствующим зажимам  $R$  элемента. Результаты измерений занесите в табл. 4.1. Далее снимите осциллограмму входного напряжения и тока исследуемой цепи. Укажите, где кривая тока, а где напряжения.

По осциллограмме определите угол сдвига фаз напряжения и тока, измерив интервал  $\Delta t$  и  $T$  в делениях горизонтальной шкалы осциллографа (см. рис. 4.2).

Таблица 4.1

Устан авливают		Измеряют					Вычисляют			
№п.	$f$ , кГц	$I$ , мА	$U_R$ , В	$U_C$ , В	$U_L$ , В	$\varphi_{oc}$	$R$ , Ом	$L$ , Гн	$C$ , мкФ	$\varphi_{вд}$
1										
...										
7										

$$\varphi = 360\Delta t/T$$

По данным измерений постройте векторную диаграмму тока и напряжений. Сравните величины углов сдвига полученных по осциллограмме  $\varphi_{oc}$  и по векторной диаграмме  $\varphi_{вд}$  (см. рис. 4.2). Вычислите  $R = U_R/I$  и  $C = 1/|Z_C|$ , где  $|Z_C| = U_C/I$ . Те же измерения произведите при частоте  $f =$

16 кГц и результаты занесите в табл. 4.1. Снимите осциллограммы напряжения и тока. Определите  $R, C$  и постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

**Вопросы.** 1. Почему  $U_0 \neq U_R + U_C$ ? 2. Почему при увеличении частоты величины  $I$  и  $U_R$  увеличились, а  $U_C$  и  $|\varphi|$  уменьшились? изменились ли  $R$  и  $C$ ?

#### **4.2.2. Исследование установившегося режима в $RL$ -цепи**

Соберите схему  $RL$ - цепи, изображенную на рис. 4.1, б, и повторите все вышеперечисленные операции при частотах  $f = 8$  и  $4$  кГц. Сформулируйте вопросы 3, 4, аналогичные приведенным выше, и ответьте на них.

#### **4.2.3. Исследование установившегося режима в $RLC$ цепи**

Соберите схему, изображенную на рис. 4.1, в. По фигуре Лиссажу, полученной на экране осциллографа после нажатия кнопки (A/B) на лицевой панели, определите резонансную частоту  $f_0$ , изменяя её на шкале генератора. (При резонансе синусоиды тока и напряжения находятся в фазе, т.е. наблюдаемый эллипс превращается в прямую линию).

Далее установите частоты  $f = f_0$ ;  $f = 2f_0$  и  $f = 0,5f_0$  и измерьте  $I$ ,  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_L$ . Результаты занесите в табл. 4.1. Снимите осциллограммы входного напряжения и тока исследуемой цепи для трех выше указанных частот. По полученным данным постройте векторные диаграммы, из которых определите величины угла сдвига фаз между входным напряжением и током. Сравните их с соответствующими значениями углов сдвига, полученными по осциллограммам.

Сформулируйте вопросы 5, 6, аналогичные вопросам, приведенным выше при исследовании  $RC$ -цепи, и ответьте на них.

### **4.3. Требования к отчету**

Отчет должен содержать формулировку цели работы, все пункты экспериментального исследования и заключение. По каждому пункту в отчет необходимо включить его название, схемы для измерений, таблицу опытных данных и расчетных величин, обработанные осциллограммы, векторные диаграммы с указанием масштабов, а также письменные ответы на следующие вопросы: 1. Почему  $U \neq U_C + U_R$  в 4.2.1? 2. Почему при увеличении частоты величины  $I$  и  $U_R$  увеличились, а  $U_C$  и  $|\varphi|$

уменьшились в 4.2.1? 3. Почему  $U \neq U_L + U_R$  в 6.2.1? 4. Как изменятся при увеличении частоты величины  $I$ ,  $U_R$ ,  $U_L$  и  $|\varphi|$  в 4.2.1? 5. Почему  $U \neq U_L + U_R + U_C$  в 4.2.2? 6. Как изменятся величины  $I$ ,  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_L$  и  $|\varphi|$  при увеличении частоты?

Закключение должно содержать краткие выводы.

## Работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОСТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

*Цель работы:* исследование резонанса и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) последовательного и параллельного колебательных контуров.

#### 5.1. Подготовка к работе

*Резонанс* – такое состояние  $RLC$ -цепи в установившемся синусоидальном режиме, при котором напряжение и ток на входе цепи совпадают по фазе.

Схемы исследуемых цепей приведены на рис. 5.1. Резонанс в цепи на рис. 5.1, *а* называют резонансом напряжений, а цепь – последовательным контуром; резонанс в цепи на рис. 5.1, *б* – резонансом токов, а цепь – параллельным контуром. При резонансе вещественными становятся комплексное сопротивление последовательной цепи

$$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

и, соответственно, комплексная проводимость параллельной цепи

$$Y(j\omega) = C + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right).$$

Отсюда резонансные частоты приведенных на рис. 5.1, *а*, *б* цепей:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.1)$$

При резонансе модуль проводимости цепи на рис. 5.1, *а* становится максимальным:

$$|Y| = \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}} = \frac{1}{R}. \quad (5.2)$$

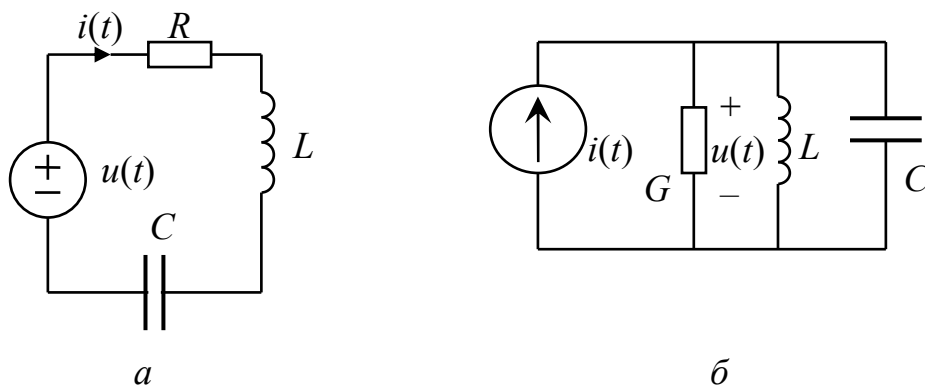


Рис. 5.1

Это значит, что при  $\omega = \omega_0$  максимальным будет ток:

$$I_0 = \frac{1}{R} U. \quad (5.3)$$

Напряжения на емкости и индуктивности в цепи на рис. 5.1,а при резонансе компенсируют друг друга и могут быть во много раз больше напряжения источника. Отношение действующего значения напряжения любого из реактивных элементов к напряжению источника при  $\omega = \omega_0$  называют добротностью  $Q$  последовательного контура:

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R}, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  – характеристическое сопротивление контура.

Если в режиме резонанса измерены напряжения на входе  $U$  и на емкости  $U_{C0}$ , ток  $I_0$  и резонансная частота  $f_0$ , то из приведенных соотношений можно определить все параметры последовательного контура: сопротивление  $R$  из (5.3), добротность  $Q$  и характеристическое сопротивление  $\rho$  из (5.4), а емкость и индуктивность из (5.1) и (5.4):

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 \rho}, \quad L = \frac{\rho}{2\pi f_0}. \quad (5.5)$$

Параллельный  $RLC$ -контур на рис. 5.1, б дуален последовательному. При резонансе токов максимальным становится модуль его комплексного сопротивления:

$$|Z| = \frac{1}{|Y|} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + \left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L}\right)^2}} = \frac{1}{G}. \quad (5.6)$$

Это значит, что при  $\omega = \omega_0$  максимальным будет напряжение на входе цепи:

$$U_0 = \frac{1}{G} I. \quad (5.7)$$

Токи, протекающие через индуктивность и емкость в цепи на рис. 5.1, б, при резонансе компенсируют друг друга и могут во много раз быть больше тока источника. Отношение действующего значения тока любого из реактивных элементов к току источника при  $\omega = \omega_0$  называют добротностью параллельного контура:

$$Q = \frac{I_{C0}}{I} = \frac{I_{L0}}{I} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L G} = \frac{1}{\rho G} = \frac{R}{\rho}. \quad (5.8)$$

Если в режиме резонанса измерены входной ток  $I$  и ток емкости  $I_{C0}$ , напряжение  $U_0$  и резонансная частота  $f_0$ , то из (7.7) можно определить  $G$ , из (5.8) –  $Q$  и  $\rho$ , а из (5.5) –  $L$  и  $C$ .

При отклонении частоты от резонансной реактивное сопротивление последовательного контура и реактивная проводимость параллельного не равны нулю, поэтому ток первого и напряжение второго уменьшаются.

Амплитудно-частотная характеристика (резонансная кривая) последовательного контура есть зависимость модуля проводимости (5.2) от частоты:

$$|Y(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}. \quad (5.9)$$

Для параллельного контура, дуально, АЧХ – это зависимость модуля сопротивления (5.6) от частоты:

$$|Z(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} = \frac{1}{G\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}. \quad (5.10)$$

Примерный вид АЧХ, построенных по выражению (7.9) при различных значениях  $R$ , представлен на рис. 5.2.

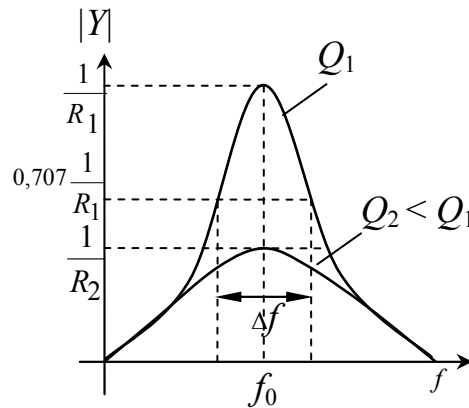


Рис. 5.2

“Острота” резонансной кривой определяет частотную избирательность цепи. По АЧХ можно определить добротность контура. Она равна отношению  $f_0$  к полосе пропускания  $\Delta f$ , измеренной по уровню 0,707 от максимума АЧХ:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}. \quad (5.11)$$

## 5.2. Экспериментальные исследования резонанса напряжений с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Исследования проводятся в цепи, показанной на рис. 7.3, где ключами S1, S2 собираются цепи, показанные на рис. 5.4, 5.5 и 5.6.

### 1. Исследование резонанса в цепи с малыми потерями

Соберите схему цепи, изображенную на рис. 5.4. Потери в контуре объясняются не идеальностью элементов и характеризуются сопротивлением потерь  $R_0$ , так что в данном случае в цепи на рис. 5.1, а имеем  $R = R_0$ .

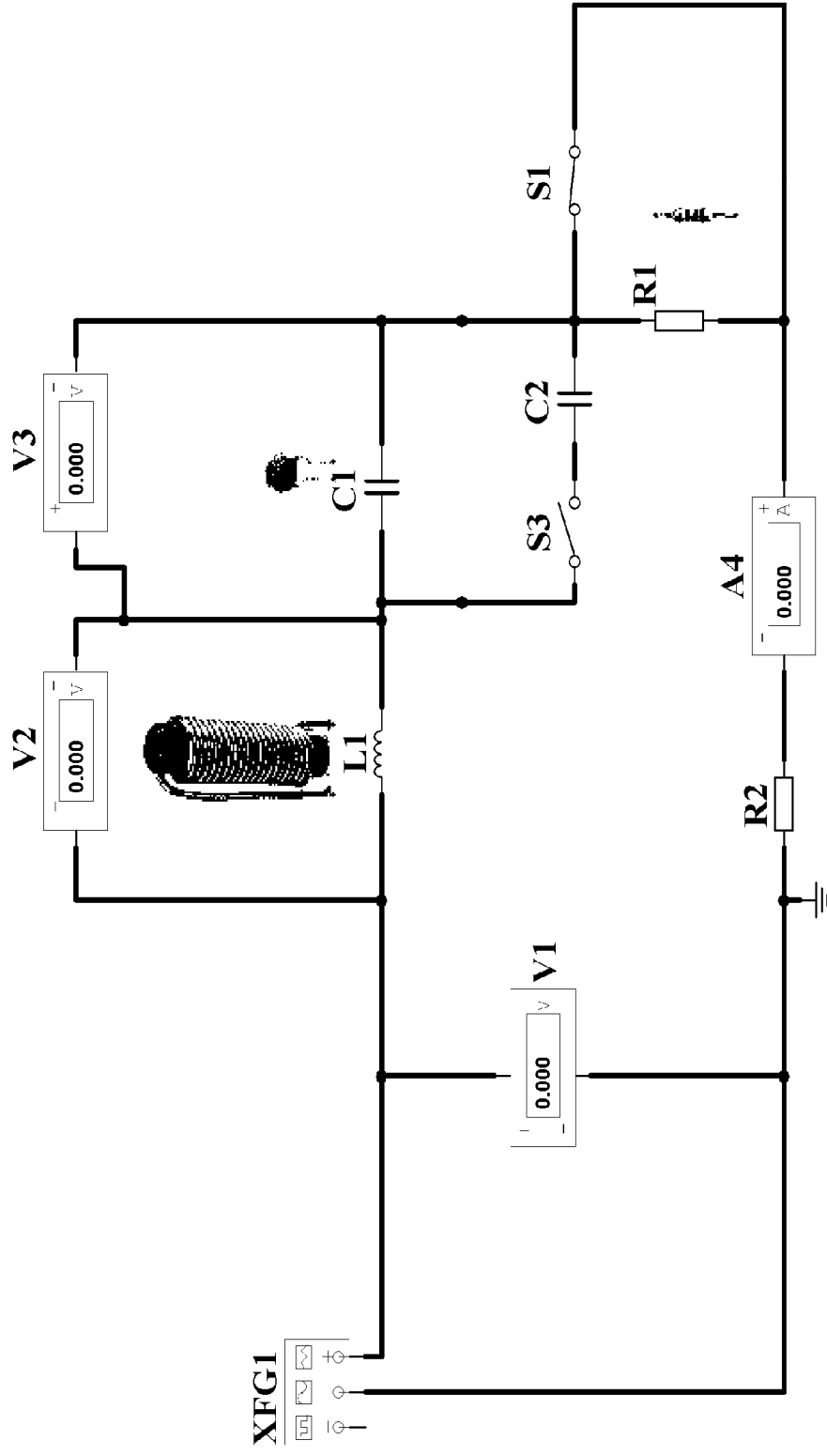


Рис. 5.3

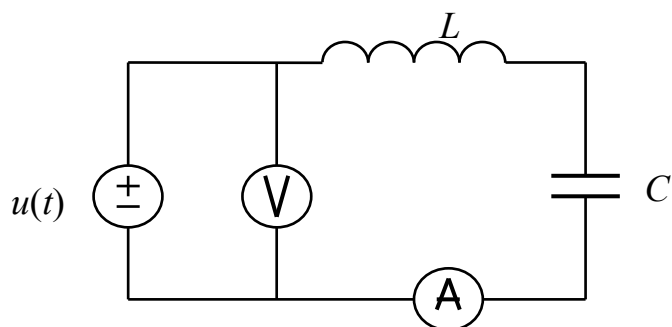


Рис. 5.4

Изменяя частоту ГС (XFG -1) в пределах от 1 до 17 кГц, снимите АЧХ. Для получения АЧХ проведите измерения тока при изменении частоты. Рекомендуется изменять частоту через 1 кГц в диапазоне 1...7 кГц, через 200 Гц – в диапазоне 7...9 кГц и далее снова через 1 кГц в диапазоне 9...17 кГц. Результаты измерений занесите в таблицу 5.1. Определите резонансную частоту  $f_0$  по максимуму тока и заполните п.1 в таблице 5.2

Таблица 5.1

Измеряют		Вычисляют
$f$ , кГц	$I$ , мА	$ Y(\omega)  = U / I$ , См

Таблица 5.2

№ пункта	Измеряют при резонансе				Вычисляют				
	$U$ , В	$I_0$ , мА	$f_0$ , кГц	$U_{C0}$ , В	$R$ , Ом	$Q$	$\rho$ , Ом	$L$ , Гн	$C$ , мкФ
1									
2									
3									

По данным измерений вычислите  $R = R_0$ ,  $Q$ ,  $\rho$ ,  $L$ ,  $C$ .

Рекомендуется, определив дополнительно две частоты, при которых  $I = 0,707I_0$ , вычислить добротность контура, используя (5.11).

**Вопрос 1.** Как, используя эквивалентные схемы цепи для  $\omega = 0$ ,  $\omega = \infty$  и  $\omega = \omega_0$ , определить значения АЧХ на этих частотах и проконтролировать результаты эксперимента?

**2. Исследование резонанса напряжений и АЧХ контура с большими потерями**

Соберите схему, изображенную на рис. 5.5



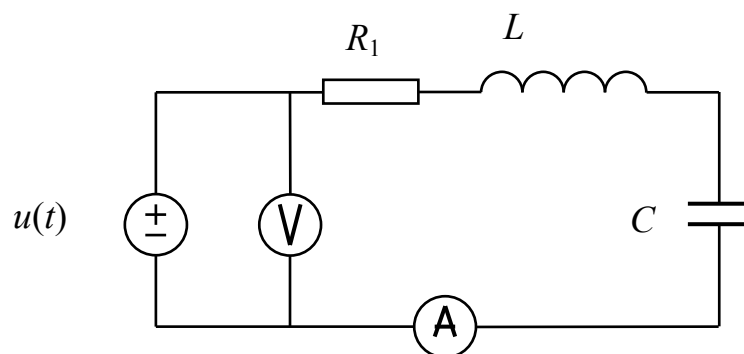


Рис. 5.5

Потери в этом контуре определяются сопротивлением  $R = R_1 + R_0$ . Методика исследования здесь такая же, как в п. 1. Поскольку АЧХ цепи является плавной, рекомендуется в диапазоне 7...10 кГц изменять частоту через 500 Гц. Результаты измерений АЧХ занесите в таблицу аналогичную табл. 5.1. Для резонансной частоты заполните п. №2 таблицы 5.2. По результатам измерений в табл. 5.2 вычислите лишь  $R$  и  $Q$ .

*Вопрос 2.* В чем сходство и в чем различие данных, измеренных и рассчитанных в п.п. 1 и 2?

### 3. Исследование влияния емкости на характеристики контура.

Соберите схему, изображенную на рис. 5.6.

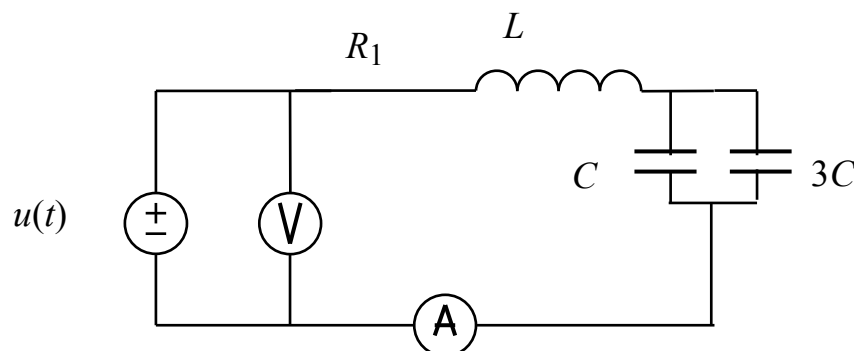


Рис. 5.6

Проведите измерения, аналогичные п. 1, изменяя частоту в диапазоне от 1 до 10 кГц, причем в диапазоне 3...6 кГц – через 200 Гц и заполните п. №3 таблицы 5.2

*Вопрос 3.* В чем сходство и в чем различие данных п. п. 2 и 3? Почему диапазон изменения частоты другой?

### 5.3. Экспериментальные исследования резонанса токов с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Исследования выполняются на схеме, представленной на рис. 5.8. Питание осуществляется от источника тока, амплитуда которого установлена  $I_m=0.142\text{A}$  и частота  $f=1.0\text{ кГц}$ . Для измерения токов и напряжений в цепи включены цифровые приборы. Структура цепи изменяется ключами S1и S2. Для снятия АЧХ применяется Bode Plotter, на входы которого подаются напряжения снимаемые с входа цепи  $U_{BX}$  и  $U_{R2}$  - пропорциональное току источника.

#### 4. Исследование резонанса токов и АЧХ контура с малыми потерями. Соберите схему, изображенную на рис. 5.7.

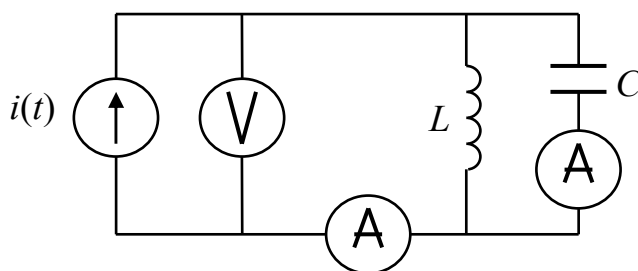


Рис. 5.7

Потери в цепи объясняются не идеальностью элементов и могут характеризоваться проводимостью потерь  $G_0$ , так что в данном случае в цепи на рис. 5.1, б имеем  $G = G_0$ .

Активируйте цепь и откройте Bode Plotter (2ЛК). Установите в режиме Lin, Magnitude диапазон частот ( $f=7\text{kHz}$ ,  $F=10\text{kHz}$ ) и значение АЧХ ( $H(\omega) = U_{BX} / U_{R2}$ ) в пределах ( $f=0$ ,  $F=(30\text{---}50)$ ). Перемещая измерительный курсор Боде Плоттера, снимите частотную характеристику АЧХ для 8-9 точек, фиксируя значения частоты и величину отношения  $U_{BX} / U_{R2}$  в местах пересечения кривой с сеткой экрана. Результаты внесите в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Измеряют		Вычисляют
$f, \text{кГц}$	$U_{BX} / U_{R2}$ ,	$ Z(j\omega)  = U_{BX} / U_{R2} / R2 \text{ Ом}$

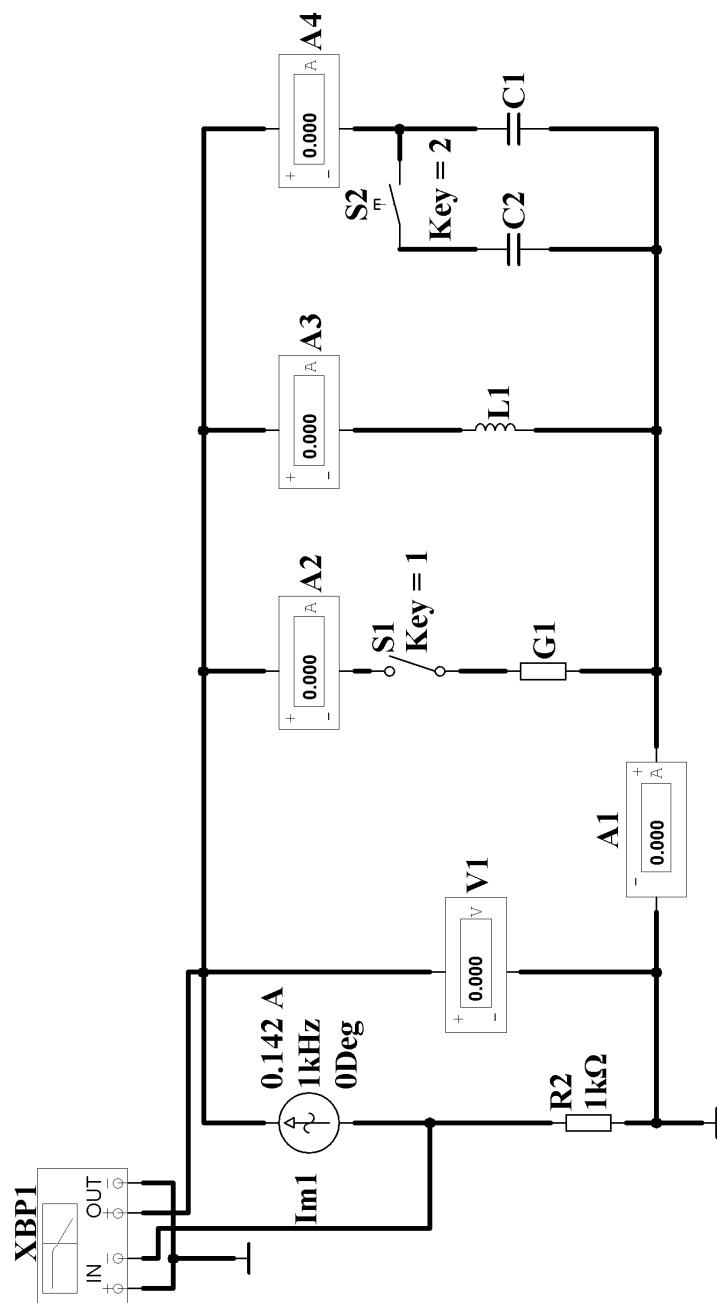


Рис. 5.8

Определите резонансную частоту  $f_0$  для максимума  $H(\omega)_{\max}$  цепи. Разблокируйте схему исследований, сняв метку в меню «Option» программы. Откройте окно параметров источника тока (2ЛК) и измените его частоту на значение  $f_0$ . Перезапустите активацию цепи и зафиксируйте величины указанные в п. №1 табл. 5.4.

Таблица 5.4

№ пункта	Измеряют при резонансе				Вычисляют					
	$I$ , мА	$U_0$ , В	$f_0$ , кГц	$I_{C0}$ , мА	$Q$	$G$ , См	$R = 1/G$ , Ом	$\rho$ , Ом	$L$ , Гн	$C$ , мкФ
1										
2										
3										

Рекомендуется, определив дополнительно две частоты  $f_1$  и  $f_2$  при которых  $H(\omega) = 0,707H(\omega)_{\max}$ , вычислить добротность контура, используя (5.11).

**Вопрос 4.** Как, используя эквивалентные схемы цепи для  $\omega = 0$ ,  $\omega = \infty$  и  $\omega = \omega_0$ , определить значения АЧХ на этих частотах и проконтролировать результаты эксперимента?

#### 5. Исследование резонанса токов и АЧХ контура с большими потерями.

Соберите схему, изображенную на рис. 5.9.

Потери в цепи определяются проводимостью  $G = G_2 + G_0$ . Методика исследования такая же, как в п.4. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную

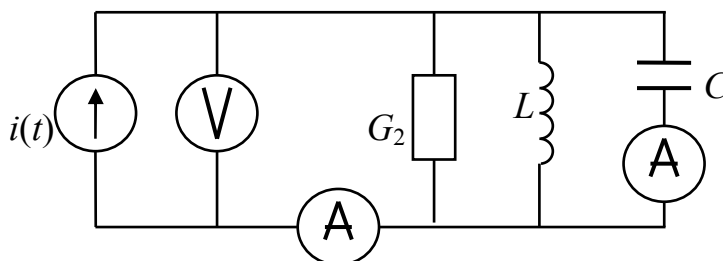


Рис. 5.9

таблицы 5.3, а величины, измеренные при резонансе в п. №2 таблицы 5.4. Поскольку АЧХ цепи является плавной, рекомендуется изменить пределы

значений частоты и АЧХ ( $I=1\text{kHz}$ ,  $F=20\text{kHz}$ ), ( $I=0$ ,  $F=1-2$ ). По результатам измерений в табл. 5.4 вычислите лишь  $G$ ,  $R = 1/G$  и  $Q$ .

*Вопрос 5.* В чем сходство и в чем различие данных, измеренных и рассчитанных в п. 4 и п.5?

**6. Исследование влияния изменения емкости на характеристики контура.**

Соберите схему, изображенную на рис. 5.10.

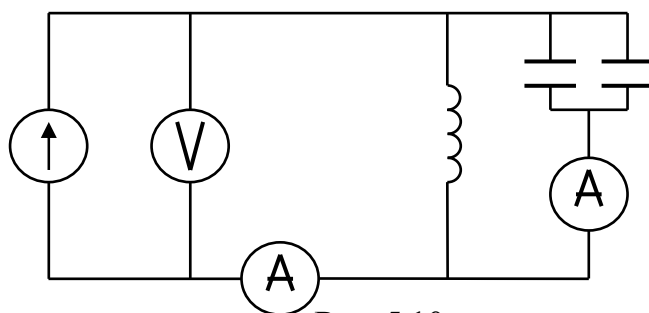


Рис. 5.10

Проведите измерения аналогичные п. 4, изменяя частоту в диапазоне ( $I=1\text{kHz}$ ,  $F=7\text{kHz}$ ). Пределы АЧХ установите самостоятельно. Результаты, измеренные при частоте  $f_0$  внести в п. №3 таблицы 5.4.

*Вопрос 6.* В чем сходство и в чем различие данных п.п. 5 и 6? Почему диапазон изменения частоты иной?

## 5.4. Требования к отчету

В отчете должны быть отражены цель работы, все разделы экспериментального исследования и заключение с краткими выводами. По каждому разделу в отчет следует включить его название, схемы исследуемых цепей, таблицы измерений и вычислений, а также необходимые расчеты.

Рекомендуется на одном графике построить все АЧХ по пп. 5.2.1 – 5.2.3 с расчетом добротности по ним, на другом – аналогично по пп. 5.3.1 – 5.3.3. Необходимо также письменно ответить на следующие вопросы:

1. Как, используя эквивалентные схемы цепи для  $\omega = 0$ ,  $\omega = \infty$  и  $\omega = \omega_0$ , определить значения АЧХ на этих частотах и проконтролировать результаты эксперимента? Приведите схемы замещения для этих частот. 2. В чем сходство и в чем различие данных, измеренных и рассчитанных в 5.2.1 и 5.2.2? 3. В чем сходство и в чем различие данных 5.2.2 и 5.2.3? Почему диапазон изменения частоты иной? 4. Как, используя эквивалентные схемы цепи для  $\omega = 0$ ,  $\omega = \infty$  и  $\omega = \omega_0$ , определить значения АЧХ на этих частотах и

проконтролировать результаты эксперимента? 5. В чем сходство и в чем различие данных, измеренных и рассчитанных в 5.3.1 и 5.3.2? 6. В чем сходство и в чем различие данных 5.3.1 и 5.3.2? Почему диапазон изменения частоты иной?

## Работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХПОЛЮСНИКОВ

*Цель работы:* исследование амплитудно-частотных и фазовых характеристик входных сопротивлений  $LC$  - и  $RLC$  -двухполюсников.

#### 8.1. Подготовка к работе

В работе необходимо исследовать частотные характеристики реактивного  $LC$ -двухполюсника и  $RLC$ -двухполюсника, схемы которых представлены на рис. 8.1.

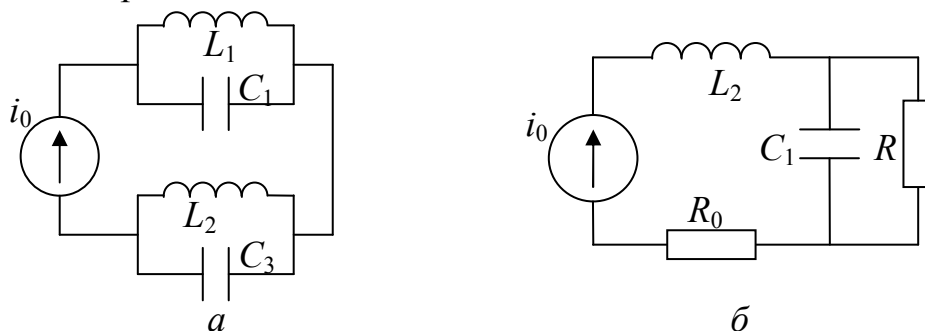


Рис. 6.1

При действии на цепь источника тока реакцией на входе является напряжение и свойства пассивного двухполюсника (ДП) в установившемся синусоидальном режиме определяются входным сопротивлением

$$Z(j\omega) = |Z(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} = r(\omega) + jx(\omega).$$

График  $|Z(j\omega)|$ , построенный в функции частоты  $\omega$ , является в данном случае амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), график аргумента  $\varphi(\omega)$  – фазочастотной характеристикой (ФЧХ), а графики  $r(\omega)$  и  $x(\omega)$  – соответственно вещественной и мнимой частотными характеристиками двухполюсника. Используют также амплитудно-фазовую характеристику

(АФХ), представляющую собой геометрическое место значений  $Z(j\omega)$ , построенное в комплексной плоскости, например по графикам АЧХ и ФЧХ.

При резонансе в пассивном двухполюснике выполняются условия  $\text{Im} Z(j\omega) = 0$  и  $\text{Im} Y(j\omega) = 0$ , т. е. на резонансной частоте  $\omega_0$  в установившемся синусоидальном режиме ток и напряжение двухполюсника совпадают по фазе:  $\varphi(\omega_0) = 0$ .

Для  $LC$ -двухполюсника входное сопротивление будет мнимой дробно-рациональной функцией  $\omega$  вида:

$$Z(j\omega) = jx(\omega) = jk \frac{\omega(\omega_{1H}^2 - \omega^2)(\omega_{2H}^2 - \omega^2) \dots}{(\omega_{1T}^2 - \omega^2)(\omega_{2T}^2 - \omega^2) \dots}. \quad (6.1)$$

Нули  $j\omega_{kH}$  и полюсы  $j\omega_{kT}$  сопротивления  $Z(j\omega)$ , определяемые соответственно из условия резонанса напряжений  $Z(j\omega) = 0$  и условия резонанса токов  $Z(j\omega) = \infty$ , совпадают с резонансными частотами  $LC$ -двухполюсника. Они являются мнимыми числами и располагаются, чередуясь друг с другом, на оси  $j\omega$  плоскости комплексной частоты  $s = \sigma + j\omega$ . В зависимости от структуры и элементов цепи в начале координат располагается либо нуль, как в (6.1), либо полюс. Обычно общее число резонансов напряжений и токов на единицу меньше количества реактивных элементов.

Используя указанные свойства реактивных двухполюсников, а также свойство  $dx/d\omega \geq 0$ , можно построить частотные характеристики  $jx(\omega)$  качественно. Например, для двухполюсника, изображенного на рис. 6.1, а, частотная характеристика  $jx(\omega)$ , приведенная на рис. 6.2, а, может быть построена качественно для  $\omega > 0$  исходя из следующих соображений: в цепи возможны лишь 3 резонансные частоты  $\omega_{1T}$ ,  $\omega_{1H}$  и  $\omega_{2T}$ ; предельные значения сопротивления  $x(0) = 0$  и  $x(\infty) = 0$  оцениваются путем анализа эквивалентной схемы замещения при  $\omega = 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$ .

Амплитудно-частотная характеристика этого идеализированного  $LC$ -двухполюсника определяется модулем функции, изображенной на рис. 6.2, а, поскольку  $|Z(j\omega)| = |jx(\omega)| = |x(\omega)|$ . АЧХ двухполюсника с реальными катушками индуктивности и конденсаторами, полученная опытным путем, не принимает нулевых и бесконечно больших значений; она является

непрерывной функцией частоты, но при высокой добротности контуров, исследуемых в работе ( $Q \geq 15 \dots 20$ ), сохраняет большую крутизну в области резонансных значений частоты.

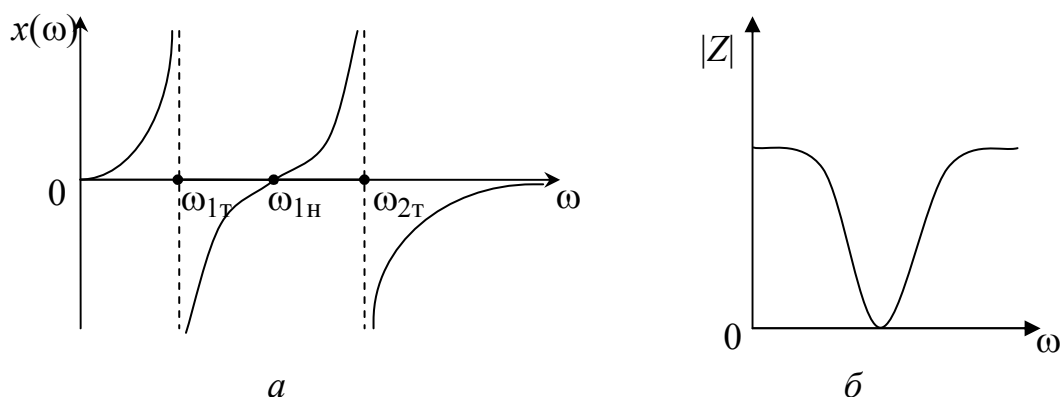


Рис. 6.2

Для  $RLC$ -двухполюсника в зависимости от соотношения значений параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  резонанс может и не наблюдаться. Следует также отметить, что в  $RLC$ -двухполюсниках частоты, соответствующие максимальным и минимальным значениям  $|Z(j\omega)|$ , в общем случае не совпадают с резонансными.

Перед экспериментальным исследованием выполните следующее расчетное задание, необходимое для контроля опытных данных:

1. Вычислите резонансные частоты  $LC$ -двухполюсника, изображенного на рис. 8.1, а (по указанию преподавателя для п.6.2 принять  $L_1 = 25 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $L_2 = 25 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $C_1 = 0,015$  мкФ,  $C_3 = 0,10$  мкФ, для п.8.3  $L_1 = 56,3$  мГн,  $L_2 = 20,3$  мГн,  $C_1 = C_2 = 0,05$  мкФ), по формулам:

$$f_{1Т} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_3}}; \quad f_{1Н} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1L_2(C_1 + C_3)}}}; \quad f_{2Т} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (6.2)$$

и постройте качественно график АЧХ  $|Z(j\omega)|$  двухполюсника.

2. Для  $RLC$ -двухполюсника, изображенного на рис. 6.1, б, резонансная частота

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{1}{L_2C_1} - \frac{1}{R^2C_1^2}}}. \quad (6.3)$$

Приняв для п.8.2  $L_2 = 25 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $C_1 = 0,015$  мкФ, а для п. 6.3  $L_2 = 56,3$  мГн,  $C_1 = 0,05$  мкФ, выясните, при каком из резисторов, используемых в работе (в п. 6.2  $R_1 = 10$  кОм или  $R_2 = 0,3$  кОм, а в п. 6.3



$R_1 = 4$  кОм или  $R_1 = 0,8$  кОм), резонанс невозможен, а при каком возможен; вычислите на основании (6.3) значение резонансной частоты и постройте качественно АЧХ  $|Z(j\omega)|$   $RLC$ -двухполюсника для обоих случаев.

## 6.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и в ней “Лаб. раб. №8”. Для снятия частотных характеристик используется общая схема, изображенная на рис. 6.3, где ДП – двухполюсник, схема которого изображена на рис. 6.1, а. Выходной сигнал  $U_{\text{ВЫХ}}$  соответствует напряжению на двухполюснике, а напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  пропорционально току, проходящему через него. Модуль входного комплексного сопротивления двухполюсника определяется

$$|Z_{\text{ВХ}}| = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{R1} / R_1} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{R1}} \cdot 1000, \text{ т.к. } R_1 = 1 \text{ кОм} \quad (6.4)$$

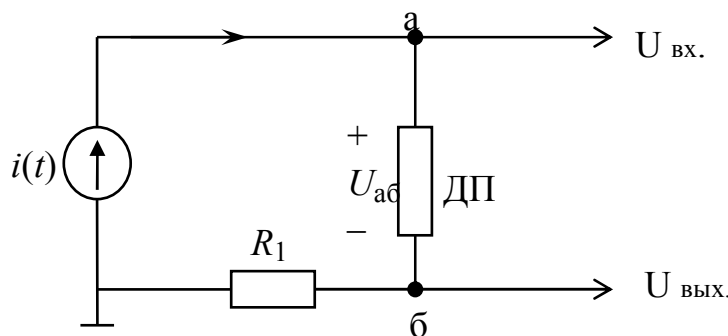




Рис. 6.3

### 6.2.1. Исследование частотных характеристик $LC$ -двухполюсника.

Исследования реактивного двухполюсника изображенного на рис. 6.1, а, проводятся в цепи, схема которой представлена на рис. 6.4. К клеммам (а, б) подключен источник синусоидального тока с частотой  $f = 1$  кГц и амплитудой  $I_m = 0,05$  мА. Для снятия частотных характеристик применяется *Bode Plotter* ХВР1. Строго говоря, для получения частотных характеристик необходимо подать на входы ХВР1 напряжение двухполюсника  $U_{\text{аб}}$  и пропорциональное току напряжение  $U_{R1}$ , снятое с сопротивления  $R_1$ . Хотя в схеме на рис. 6.3 вместо  $U_{\text{аб}}$  к каналу *Out* подводится напряжение

$U_{\text{вх}} = U_{\text{аб}} + U_{R_1}$ , вносимая ошибка невелика, так как в диапазоне исследуемых частот сопротивление  $R_1$  много меньше сопротивления двухполюсника.

Активируйте цепь переключателем  и двойным щелчком левой клавиши мыши откройте лицевую панель *Bode Plotter* и установите для снятия АЧХ в режиме *Magnitude* по горизонтали  $I=2\text{kHz}$ ,  $F=10\text{kHz}$ , *Lin*, по вертикали *Lin*,  $I=0$ ,  $F=50$ . Передвигая измерительный курсор , определите резонансные частоты  $f_{1T}$ ,  $f_{1H}$ ,  $f_{2T}$ .

Установите частоту  $F=4\text{ kHz}$  и снимите график вблизи  $f_{1T}$ , зафиксировав частоты и значения АЧХ ( $U_{\text{вх}}/U_{R_1}$ ) на пересечении кривой и сетки экрана. Затем включите  $F=10\text{ kHz}$  и снимите остальную часть АЧХ вблизи  $f_{2T}$ . Результаты всех измерений занесите в табл. 6.1. Включите кнопку *Phase* и снимите таким же образом ФЧХ  $\varphi(f)$ . Обязательно зафиксируйте минимальные при изменении знака и максимальные значения функции  $\varphi(f)$  во всем диапазоне частот. Рассчитайте зависимость  $|Z(j\omega)|$ .

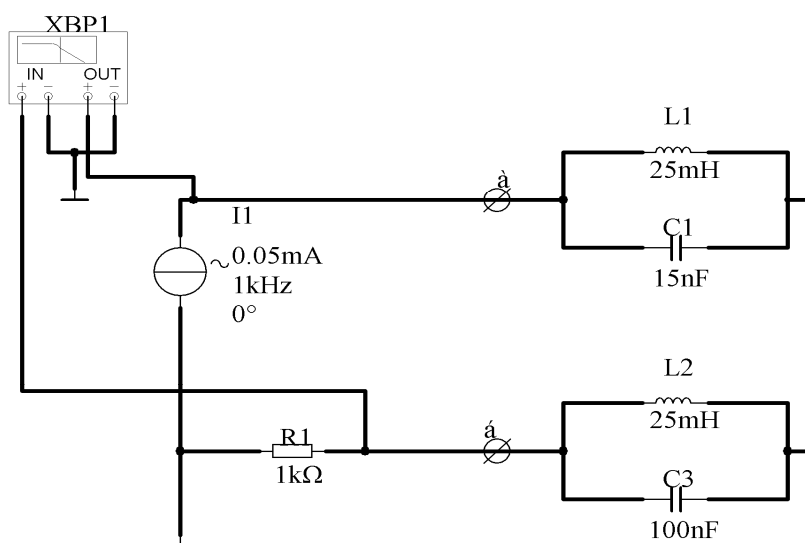


Рис.6.4

Постройте графики АЧХ и ФЧХ, сравните их с полученными качественно при подготовке к работе.

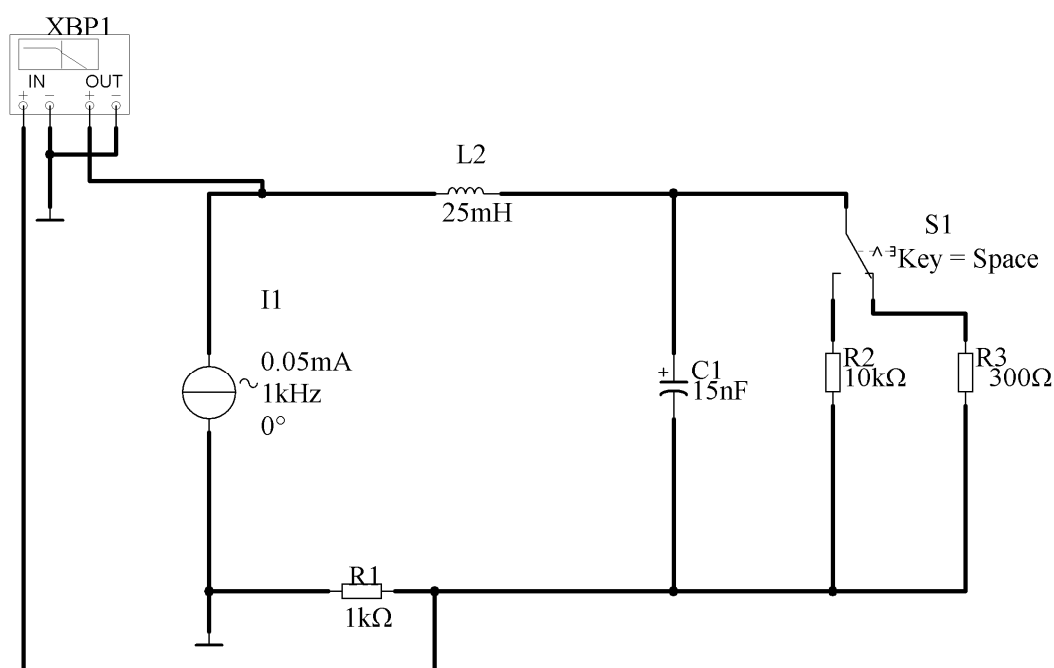
Таблица 6.1

$f$ , кГц	$U_{\text{вх}}/U_{R_1}$	$\varphi$ , °	$ Z $ , кОм

**6.2.2. Исследование частотных характеристик  $RLC$ -двухполюсника, в котором резонанс возможен.**

Откройте схему 2 цепи, изображенную на рис. 6.5. Используйте тот из резисторов, при котором на основании расчета по формуле (6.3) возможен резонанс.

Исследуйте АЧХ способом, аналогично способу, описанному в п. 6.2.1. Установив по горизонтали Log,  $I = 100$  Hz,  $F = 2$  MHz и по вертикали Lin,  $I = 0$ ,  $F = 15$  снимите данные измерений в 8 – 9 точках диапазона частот и занесите их в таблицу, подобную предыдущей. Затем снимите ФЧХ двухполюсника в диапазоне  $I = -180$ ,  $F = 180$ . Вычислите  $|Z(j\omega)|$ .



Circuit 2

Рис. 6.5

Используя графики АЧХ и ФЧХ, изобразите АФХ. Для этого целесообразно определить по графику ФЧХ значения частот, соответствующих некоторым значениям угла  $\varphi$  (например,  $\varphi = \pm 20^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$  и т. д.). Затем для этих частот по АЧХ отсчитайте значения  $|Z(j\omega)|$  и нанесите на комплексную плоскость точки, соответствующие концам вектора  $Z(j\omega) = |Z(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$ . К полученным таким образом точкам АФХ добавьте точки, определяемые значениями при резонансной, нулевой и бесконечной частотах.

### **6.2.3. Исследование частотных характеристик $RLC$ -двухполюсника, в котором резонанс невозможен.**

Проведите в полном объеме исследования, аналогично исследованиям, описанным в п. 6.2.2, используя второй резистор.

## **6.3. Требования к отчету**

Отчет должен содержать цель работы, все разделы исследований и заключение. По каждому разделу в отчет необходимо включить название, схемы исследуемых цепей, расчетные формулы и результаты расчетов, таблицы данных, графики АЧХ, ФЧХ и АФХ. Так же необходимо письменно ответить на следующие вопросы:

1. В чем отличие частотных характеристик реальной цепи, составленной из катушек индуктивностей и конденсаторов, от характеристик идеальных реактивных двухполюсников? 2. Как проконтролировать полученные АЧХ и ФЧХ по эквивалентным схемам цепи при  $f = 0$ ,  $f = \infty$ ,  $f = f_{1T}$ ,  $f = f_{2T}$ ? 3. Можно ли по частотным характеристикам (АЧХ, ФЧХ, АФХ) определить резонансные частоты двухполюсника? По каким признакам? 4. В чем причина отсутствия резонанса в исследуемой  $RLC$ -цепи и какие из графиков (АЧХ, ФЧХ или АФХ) об этом свидетельствуют?

## **Работа № 7**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ**

*Цель работы:* экспериментальное определение параметров двух индуктивно связанных катушек и проверка основных соотношений индуктивно связанных цепей при различных соединениях катушек.

#### **7.1. Подготовка к работе**

Схема замещения двух индуктивно связанных катушек, удовлетворительно учитывающая электромагнитные процессы в диапазоне низких и средних частот, представлена на рис. 7.1, где  $L_1$ ,  $R_1$  и  $L_2$ ,  $R_2$  – индуктивности и сопротивления соответственно первой и второй катушек;  $M$  – их взаимная индуктивность.

Степень магнитной связи двух катушек определяется коэффициентом связи:

$$k_{\text{св}} = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{|x_M|}{\sqrt{x_1 x_2}}, \quad (7.1)$$

где  $x_1 = \omega L_1$ ,  $x_2 = \omega L_2$  – индуктивные сопротивления катушек;  $x_M = \omega M$  – сопротивление взаимной индуктивности, при этом  $0 \leq k_{\text{св}} \leq 1$ .

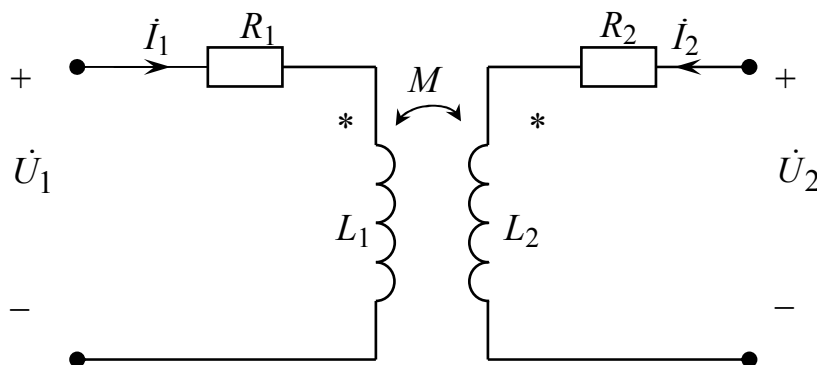


Рис. 7.1

В режиме гармонических колебаний уравнения цепи на рис. 7.1 имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_2 = (R_1 + jx_1)\dot{I}_1 + jx_M\dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 = j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 = jx_M\dot{I}_1 + (R_2 + jx_2)\dot{I}_2. \end{cases} \quad (7.2)$$

Знак  $M$  и  $x_M$  определяется выбором положительных направлений токов  $I_1$  и  $I_2$ . Для выбранных направлений токов  $M > 0$ , если включение катушек согласное, и  $M < 0$ , если включение встречное. Способ включения катушек устанавливается с помощью однополярных выводов, отмеченных «звездочками»: если токи катушек направлены одинаково относительно однополярных выводов (например, как показано на рис. 7.1), то катушки включены согласо; в противном случае включение встречное.

Параметры уравнения (7.2) могут быть определены из двух опытов холостого хода, в одном из которых  $I_2 = 0$ , в другом  $I_1 = 0$ ; осуществляют эти опыты размыканием соответствующей пары внешних выводов катушек. Если используют катушки достаточно высокой добротности ( $\omega L \gg R$ ), то при определении их индуктивности допустимо пренебречь активными сопротивлениями обмоток катушек, т. е. считать  $R_1 = 0$  и  $R_2 = 0$ ; ошибка при этом будет несущественной с точки зрения инженерной практики. Полагая в

уравнениях (7.2) сначала  $I_2 = 0$ , а затем  $I_1 = 0$ , при условии  $R_1 = R_2 = 0$  получаем соответственно:

$$\begin{cases} x_1 = \omega L_1 = U_1 / I_1; & |x_M| = |\omega M| = U_2 / I_1, \\ x_2 = \omega L_2 = U_2 / I_2; & |x_M| = |\omega M| = U_1 / I_2. \end{cases} \quad (7.3)$$

На рис. 7.2, а показано последовательное соединение двух индуктивно связанных катушек. В этом случае  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}$ ,  $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$  и из уравнения (7.2) при  $R_1 = R_2 = 0$  находим выражение эквивалентной индуктивности:

$$L_3 = \frac{U}{\omega I} = L_1 + L_2 + 2M. \quad (7.4)$$

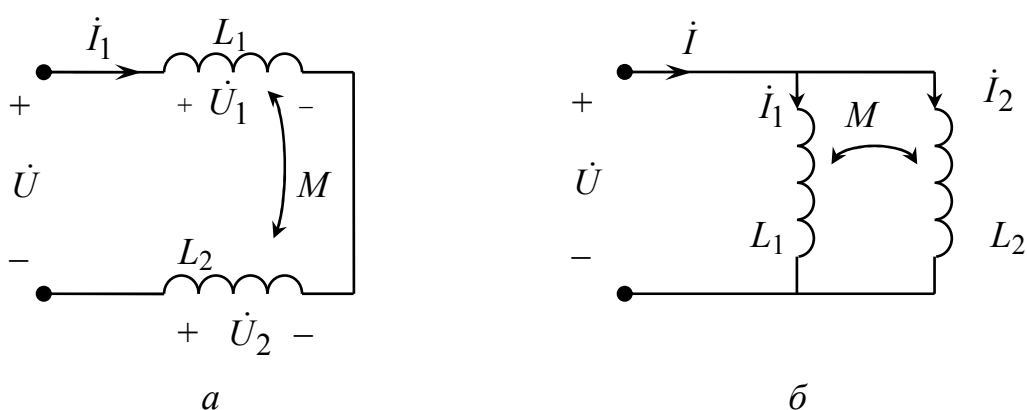


Рис. 7.2

Для параллельного соединения (рис. 7.2, б)  $\dot{U} = \dot{U}_1 = \dot{U}_2$ ,  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ . Разрешая систему уравнений (7.2) относительно токов с учетом  $R_1 = R_2 = 0$ , можно получить выражение эквивалентной индуктивности:

$$L_3 = \frac{U}{\omega I} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}. \quad (7.5)$$

В выражениях (7.4), (7.5)  $M > 0$  при согласном и  $M < 0$  при встречном включении катушек.

Если к выводам второй катушки присоединить нагрузочное сопротивление  $Z_H$ , получим двухобмоточный трансформатор (рис. 7.3). В трансформаторе энергия от источника, включенного в цепь первичной обмотки, передается нагрузке  $Z_H$ , подключенной к вторичной обмотке. Эта передача осуществляется без электрической связи между обмотками посредством изменяющегося потока взаимной индукции.

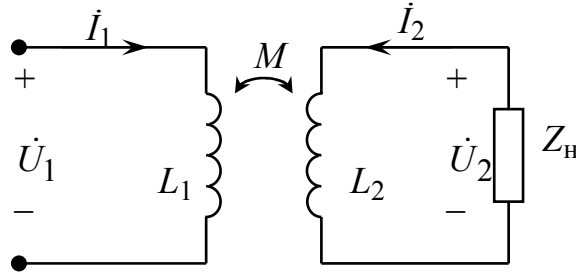


Рис. 7.3

Рассматривая трансформатор как четырехполюсник, можно его передающие свойства характеризовать функциями передачи напряжений и токов. Положив  $\dot{U}_2 = -Z_H \dot{I}_2$ , из уравнений (7.2) при  $R_1 = R_2 = 0$  получаем:

$$H_U(j\omega) = \frac{-jMZ_H\omega}{\omega^2(M^2 - L_1L_2) + jL_1Z_H\omega} = \dot{U}_2/\dot{U}_1. \quad (7.6)$$

В случае активной нагрузки ( $Z_H = R_H$ ) модуль функции передачи по напряжению (АЧХ)

$$|H_U(j\omega)| = \frac{|M|R_H}{\omega\sqrt{(L_1L_2 - M^2)^2 + (L_1R_H/\omega)^2}}. \quad (7.7)$$

## 7.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Включите компьютер и откройте в папке «Лаб. раб. Т.О.Э» схему цепи работы № 9.

Исследования свойств ИСЭ проводятся на схеме, показанной на рис. 7.4.

Объектом исследований являются две катушки  $L_1$  и  $L_2$ , подключённые к клеммам (1 – 1') и (2 – 2') (рис. 7.4) и размещенные на общем ферритовом сердечнике. Так как сердечник ни в одном из режимов работы не насыщается, всю цепь можно рассматривать как линейную. При достаточно больших значениях частоты сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$  в сравнении с  $\omega L_1$  и  $\omega L_2$  можно пренебречь, не допуская при этом значительной погрешности.

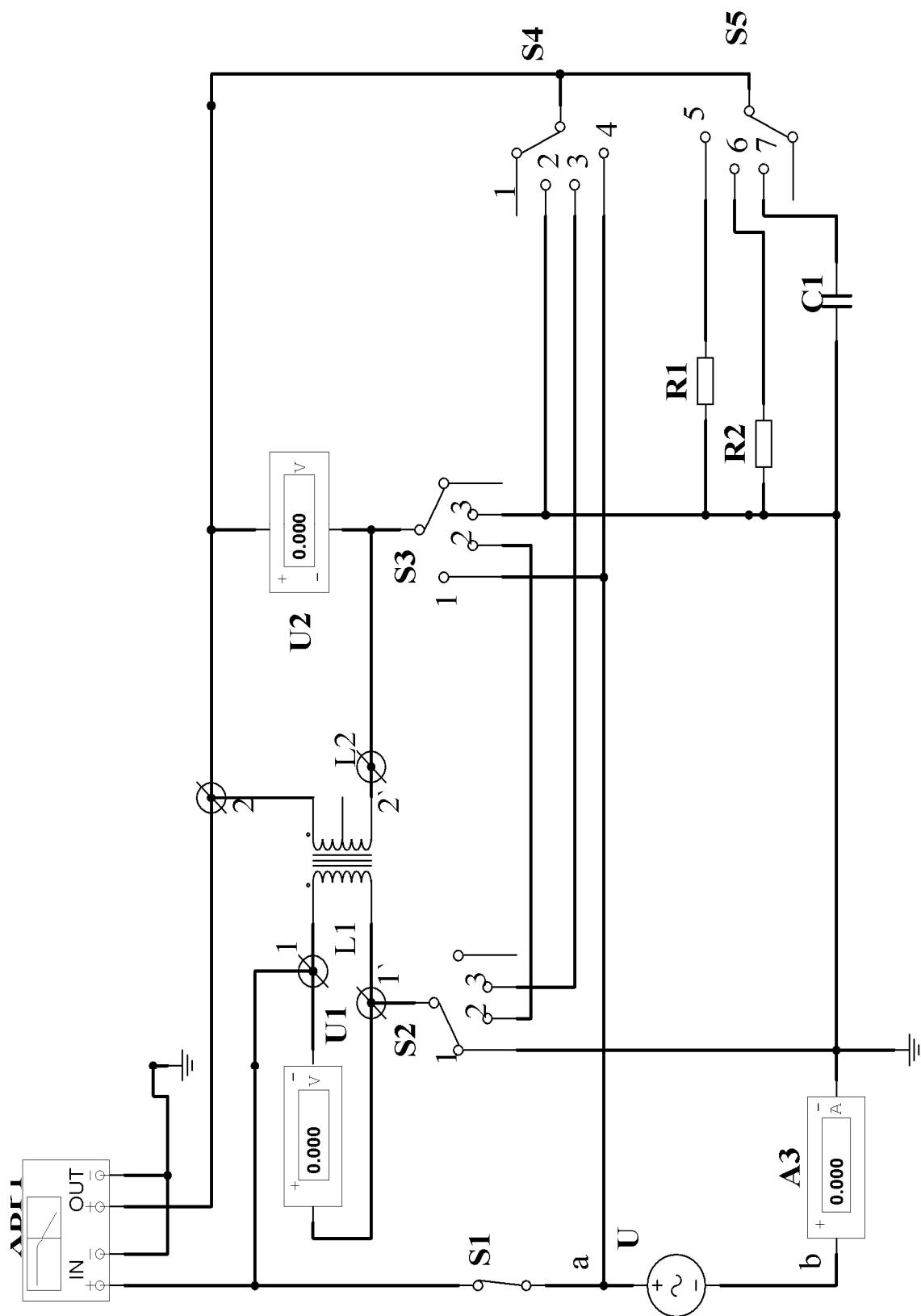


Рис. 7.4 Схема исследования индуктивно связанных элементов



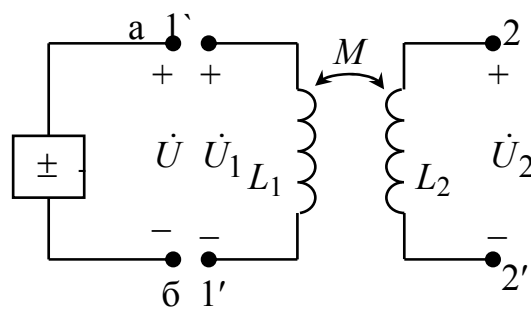


Рис. 7.5

Питание цепи осуществляется от источника напряжения  $U=2\text{В}$  частотой  $f=1.0\text{ кГц}$ . Значения напряжений и токов считываются с вольтметров  $U_1$ ,  $U_2$  и амперметра  $A_3$ . Переключатели  $S_1, S_2, S_3, S_4$  и  $S_5$  служат для коммутации катушек в различных режимах их включения. Для регистрации частотных характеристик служит Vode Plotter (ХВР1).

**1. Определение индуктивности катушек, взаимной индуктивности и коэффициента связи.**

Для проведения исследований соберите схему, изображенную на рис. 7.4.

Каждую из катушек поочередно подключите к источнику, оставляя вторую разомкнутой. Измерьте напряжение каждой из катушек и ток той катушки, которая подключена к источнику. Результаты измерений занесите в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Номер катушки	Наблюдают			Вычисляют			
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$X, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$ X_M , \text{Ом}$	$ M , \text{Гн}$
1							
2							

Параметры вычисляйте по формулам (7.3), коэффициент связи – по формуле (7.1). С целью контроля после получения экспериментальных данных определите  $X_M$  (по двум опытам).

**2. Исследование последовательного соединения индуктивно связанных катушек.**

Соберите схему последовательного соединения катушек (рис 7.2, а).

Измерьте напряжения и ток, результаты занесите в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Вид включения	Наблюдают				Вычисляют			
	$U$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I$ , мА	$I$ , мА	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$L_{\Sigma}$ , Гн
1								
2								

Эксперимент осуществите дважды – при согласном и встречном включении катушек. Для перехода от одного способа включения к другому поменяйте местами выводы любой из катушек; самостоятельно установите способ включения по данным эксперимента.

Для вычисления  $I$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $L_{\Sigma}$  используйте рассчитанные в п. 1 значения  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$  и соотношения (7.2) и (7.4), при этом  $M$  примите как среднее из двух значений, определенных в п. 1.

### **3. Исследование параллельного соединения индуктивно связанных катушек.**

Соберите схему параллельного соединения катушек (рис. 7.2, б). Данные измерений ( $U$ ,  $I$ ) занесите в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Вид включения	Наблюдают		Вычисляют	
	$U$ , В	$I$ , мА	$I$ , мА	$L_{\Sigma}$ , Гн
1				
2				

При выполнении эксперимента и обработке опытных данных руководствуйтесь пояснениями, приведенными в п. 2, и соотношением (7.5).

### **4. Исследование А.Ч.Х функции передачи трансформатора по напряжению.**

Соберите схему, представленную на рис. 7.3. В качестве нагрузки используйте поочередно 2 резистора:  $R_{H1} = 100$  Ом и  $R_{H2} = 1000$  Ом.

Амплитудно-частотную характеристику  $|H_U(j\omega)|$  снимите, открыв двумя щелчками мыши (2ЛК) лицевую панель Bode Plotter (ХВР1). Установите логарифмический масштаб частоты Log ( $F=1.0$  Гц,  $F=1.0$  МГц) и минималь-

Таблица 7.4

$f$ , кГц	Нагрузка $R_{H1}$		Нагрузка $R_{H2}$	
	$ H_U(j\omega)  = U_2/U_1$		$ H_U(j\omega)  = U_2/U_1$	
	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет

ное и максимальное значения АЧХ – Magnitude ( $I=0$ ,  $F=1.0$ ) в режиме Lin. Передвигая измерительный курсор, зафиксируйте 6-10 значений частоты  $f$  и АЧХ ( $|H_U(j\omega)|$ ) в табл. 7.4 (или снимите АЧХ любым другим доступным способом). Расчеты выполните по формуле (7.7).

### 7.3. Требования к отчету

В отчете следует сформулировать цель работы, привести все разделы исследований и сделать заключение. По каждому разделу в отчет необходимо включить его название, схемы исследуемых цепей, таблицы данных эксперимента и выполненных вычислений; должны быть приведены соответствующие соотношения и требуемые расчеты. Следует привести графики АЧХ и ФЧХ функции передачи напряжения трансформатора (экспериментально снятые и расчетные).

Необходимо также письменно ответить на следующие вопросы:

1. Как установить правильность выполнения проведенных исследований? 2. Как практически разметить однополярные выводы двух индуктивно связанных катушек? 3. При каком соотношении между параметрами катушек  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$  напряжение одной из них в режиме гармонических колебаний при последовательном соединении катушек и встречном включении будет отставать от тока? 4. Почему АЧХ трансформатора падает в области низких и высоких частот? В какой частотной области исследуемый трансформатор приближается к идеальному? Почему на нулевой частоте сигнал через трансформатор к нагрузке не проходит? 5. Чем объяснить резкое расхождение расчетных и опытных значений  $H_U(j\omega)$  при  $\omega \rightarrow 0$ ?

## Работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

*Цель работы:* опытная проверка соотношений, связывающих напряжения и токи трехфазных цепей при соединении приемников звездой и треугольником в установившемся синусоидальном режиме.

#### 8.1. Подготовка к работе

На рис. 8.1. изображена четырехпроводная трехфазная цепь, у которой источник и приемник соединены звездой с нейтральным (нулевым) проводом.

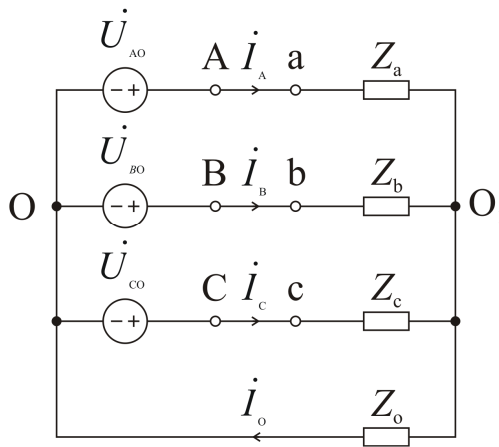


Рис. 8.1

Напряжение узловой точки  $O_1$  приемника относительно узловой точки  $O$  источника:

$$\dot{U}_{O_1O} = (Y_a \dot{U}_{AO} + Y_b \dot{U}_{BO} + Y_c \dot{U}_{CO}) / (Y_a + Y_b + Y_c + Y_0),$$

где  $\dot{U}_{AO}$ ,  $\dot{U}_{BO}$ ,  $\dot{U}_{CO}$  – фазные напряжения источника,  $Y_a$ ,  $Y_b$ ,  $Y_c$ ,  $Y_0$  – проводимости фаз приемника и нейтрального провода.

Фазные напряжения приемника:  $\dot{U}_{AO_1} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{OO_1}$ ,  $\dot{U}_{BO_1} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{OO_1}$ ,  $\dot{U}_{CO_1} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{OO_1}$ . Линейные напряжения приемника:  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AO_1} - \dot{U}_{BO_1}$ ,  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BO_1} - \dot{U}_{CO_1}$ ,  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CO_1} - \dot{U}_{AO_1}$ .

Фазные, они же линейные токи:  $\dot{I}_A = Y_a \dot{U}_{AO_1}$ ,  $\dot{I}_B = Y_b \dot{U}_{BO_1}$ ,  $\dot{I}_C = Y_c \dot{U}_{CO_1}$ . Ток нулевого (нейтрального) провода:  $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

При нулевом сопротивлении нейтрального провода узловое напряжение  $\dot{U}_{O_1O} = 0$ , что обеспечивает независимый режим работы фаз. В случае

симметричного источника и симметричного приемника ( $Z_a = Z_b = Z_c$ ) линейные и фазные напряжения связаны соотношением  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$  при этом,  $\dot{U}_{O_1O} = 0$  и  $I_0 = 0$ , поэтому включение или отключение нулевого провода не меняет режима работы цепи.

При отсутствии нулевого провода в несимметричной трехфазной системе имеет место зависимый режим работы фаз приемника: в случае изменения сопротивления одной фазы изменяются все фазные напряжения и токи.

При симметричном источнике с прямым порядком следования фаз  $U_{AO}$ ,  $U_{BO}e^{j120^\circ}$ ,  $U_{CO}e^{-j120^\circ}$ ,  $U_{O_1O} = 0$  (как показано пунктиром на векторной диаграмме рис. 8.2, б). Для определения порядка следования фаз, что важно, например, при запуске трехфазного двигателя, часто используют приемник, соединенный звездой без нейтрального провода, при этом в две фазы включают лампы накаливания, а в третью – конденсатор (причем  $R_1 \approx R_2 \approx |Z_C|$ ). Если предположить, что конденсатор включен в фазу С, то ярко горящая лампа укажет «отстающую» фазу, т.е. фазу А. Схема для проведения опыта и соответствующая векторная диаграмма (ВД) напряжений и токов приведены на рис. 8.2.

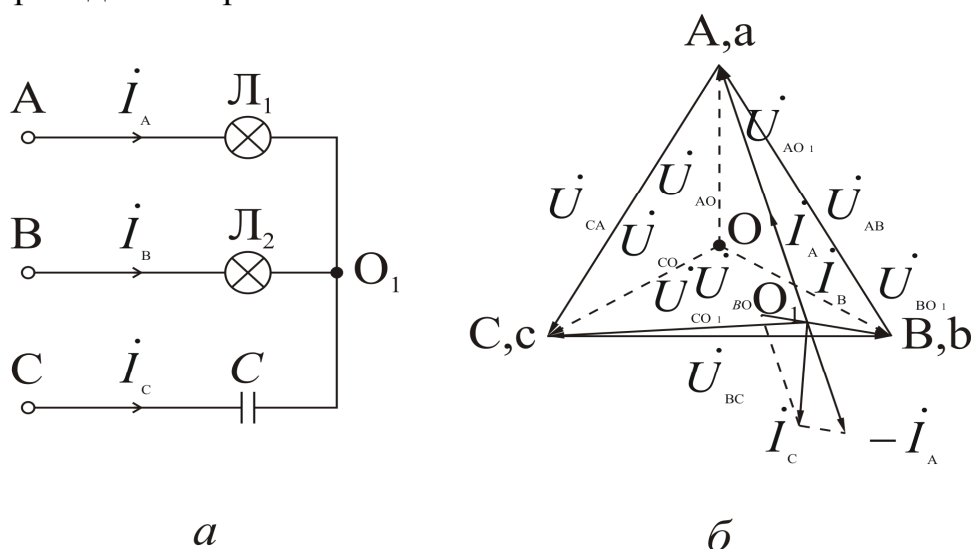


Рис. 8.2

На рис. 8.3, а изображена схема трехфазной цепи, у которой приемник соединен треугольником. Фазные токи приемника:  $\dot{I}_{ab} = Y_{ab}\dot{U}_{ab}$ ,  $\dot{I}_{bc} = Y_{bc}\dot{U}_{bc}$ ,  $\dot{I}_{ca} = Y_{ca}\dot{U}_{ca}$ . Линейные токи:  $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$ ,  $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$ . При

одинаковых напряжениях источника и симметричной нагрузке приемника линейные и фазные токи связаны соотношением:  $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$ .

Режим работы фаз приемника является независимым, т. к. напряжения фаз приемника определяются линейными напряжениями источника:  $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ . ВД для несимметричной активной нагрузки ( $2R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$ ) представлена на рис. 8.3, б.

Активная мощность  $P$  в нагрузке может быть измерена тремя ваттметрами  $P = P_1 + P_2 + P_3$  или

$$P = P_{S1} \cos \varphi_1 + P_{S2} \cos \varphi_2 + P_{S3} \cos \varphi_3,$$

где  $P_k$  и  $P_{Sk}$  – активная и полная мощности каждой фазы;  $\cos \varphi_k$  – коэффициент мощности каждой фазы приемника (так называемый «Power Factor»).

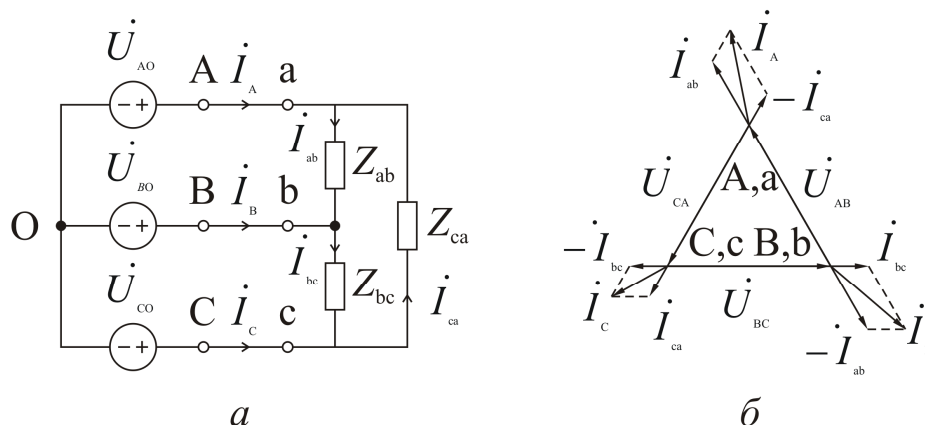


Рис. 8.3.

В цепи без нулевого провода мощность может быть измерена двумя ваттметрами  $P = P_1 + P_2$ , включенными в две фазы, причем обмотки напряжения ваттметров включены на линейные напряжения (между каждой из этих фаз и третьей фазой). Активная мощность цепи при этом формально равна:

$$P = P_{S1} \cos \varphi_1 + P_{S2} \cos \varphi_2,$$

а реактивная мощность:

$$P_q = P_{S1} \sin \varphi_1 + P_{S2} \sin \varphi_2,$$

где  $P_{Sk} = U_{\text{л}} I_{\text{л}}$  – причем  $U_{\text{л}}$ ,  $I_{\text{л}}$  – линейные напряжение и ток «каждого ваттметра», а  $\varphi_k$  – угол между ними.

## 8.2. Экспериментальные исследования соединения нагрузки звездой с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и в ней “Лаб. раб. №10”, а затем откройте цепь «Circuit 1 - 3х фазная звезда». В начальном положении цепи все ключи должны быть разомкнуты.

После загрузки в открывшемся окне на экране монитора появится схема (рис. 8.4). Питание цепи осуществляется от трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены «звездой» с нулевым выводом «О». Нагрузкой цепи является приемник, состоящий из трех одинаковых ламп  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  с нулевой точкой «O1». Несимметричный режим создается лампой  $L4$  и емкостью  $C$ .

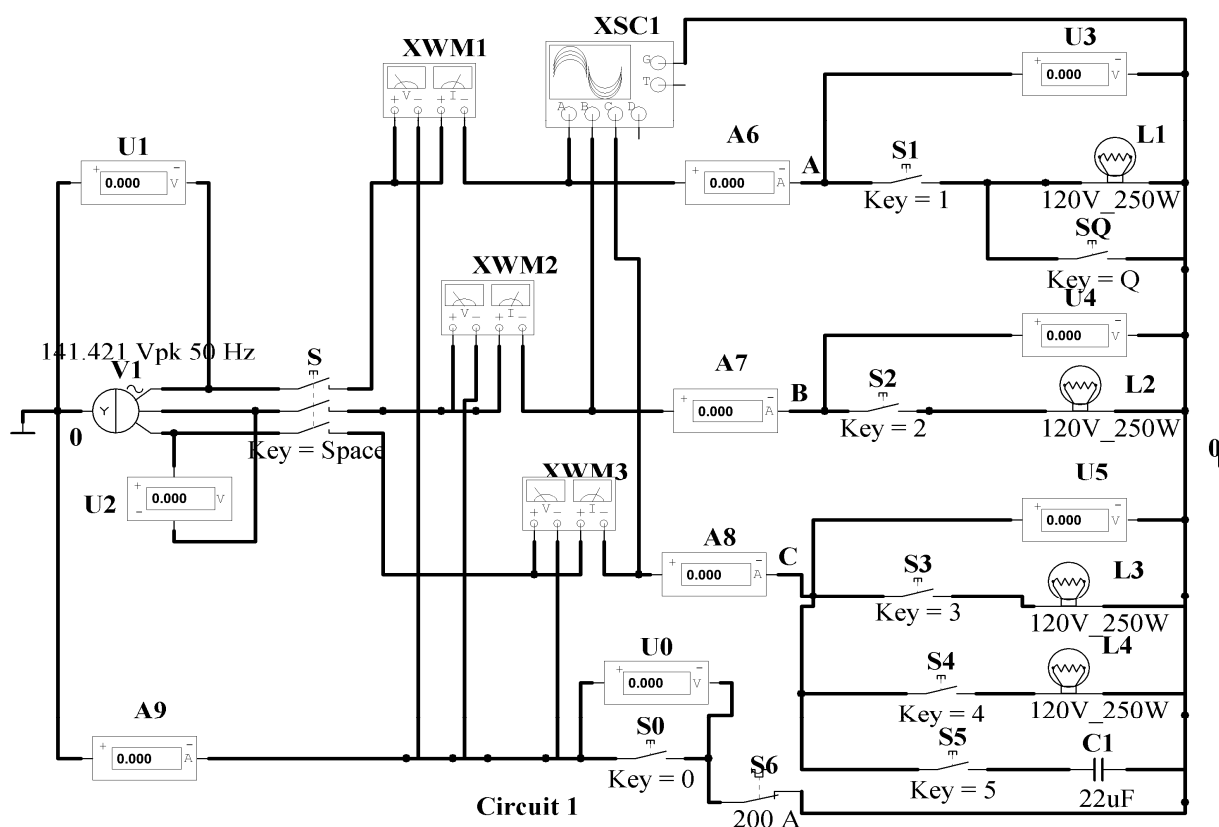


Рис. 8.4

Подключение цепи к источнику производится трехфазным рубильником  $S$ . Для исследования различных режимов работы цепи служат ключи  $S0 \div S5$ . Защита источника от возможных коротких замыканий осуществляется

автоматическим выключателем S6. Измерение напряжений и токов производится вольтметрами  $U_0 \div U_5$  и амперметрами  $A_6 \div A_9$ .

Для измерения активной мощности источника применяются три ваттметра XWM1, XWM2 и XWM3. Контроль фазных напряжений на нагрузке производится по четырехканальному осциллографу XSC1.


Включите цепь выключателем S, активируйте ее кнопкой  и зафиксируйте фазное  $U_\phi$  и линейное  $U_\Delta$  напряжения. Все результаты исследований запишите в табл. 8.1, в которой должно быть 8 строк. Дискретность показаний измерительных приборов примерно 5-7 сек.


Таблица. 8.1

№	$U_{AO_1}, \text{В}$	$U_{BO_1}, \text{В}$	$U_{CO_1}, \text{В}$	$U_{OO_1}, \text{В}$	$I_A, \text{А}$	$I_B, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$I_0, \text{А}$
1								
...								
8								

### 8.2.1. Определение порядка следования фаз

Соберите схему, соответствующую рис. 8.2, а. Включите рубильник S и активизируйте лицевую плату четырехканального осциллографа XSC1, который служит для наблюдения процессов, проходящих в цепи. Ручкой «ABCD» подключается управление соответствующим каналом. Кнопкой с точкой устанавливается инверсия выбранного канала.

В этом и всех последующих экспериментах зафиксируйте значения величин, указанных в табл. 8.1.

Для проведения каждого опыта необходимо активировать схему исследований выключателем .

Определите порядок следования фаз A, B, C в трехфазной цепи, в соответствии с ВД цепи (см. рис. 8.2) и описанием эксперимента (см. п. 8.1.): напряжение  $\dot{U}_{AO_1}$  – максимально, а  $\dot{U}_{BO_1}$  – минимально.

При оформлении отчета на основе результатов измерений начертите в масштабе ВД исследуемой цепи, учитывая, что диаграмма линейных напряжений представляет собой треугольник, построенный по трем сторонам (см. рис. 8.2, б). Положения точки «O<sub>1</sub>» определите пересечением дуг окружностей радиусов  $U_{AO_1}$ ,  $U_{BO_1}$ ,  $U_{CO_1}$ , проведенных из вершин



треугольника линейных напряжений. Затем изобразите ВД токов, учитывая, что в фазах *A* и *B* активная нагрузка, а в фазе *C* – ток опережает напряжение на  $90^\circ$ .

#### **8.2.2. Одинаковая нагрузка фаз без нулевого провода**

Включите *L1*, *L2*, *L3*, а *L4* и емкость *C1* – отключите. По результатам измерений постройте ВД.

#### **8.2.3. Неодинаковая нагрузка фаз без нулевого провода**

Включите *L1*, *L2*, а в фазу *C* – *L3*, *L4*.

#### **8.2.4. Неодинаковая нагрузка фаз с нулевым проводом**

Замкните накоротко точки «*O*<sub>1</sub>» и «*O*» переключателем *S0* при этом *SQ* должен быть отключен. Зафиксируйте отдельно *I*<sub>0</sub>. Активируйте лицевые платы ваттметров и зарегистрируйте их показания *P*<sub>1</sub>, *P*<sub>2</sub>, *P*<sub>3</sub> и коэффициенты мощности «*Power Factor*». **После проведения опыта нулевой провод обязательно отключите!**

#### **8.2.5. Обрыв фазы В при отсутствии нулевого провода**

Включите только *L1* в фазу *A* и *L3* в фазу *C*.

#### **8.2.6. Обрыв фазы В при наличии нулевого провода**

Включите *L1* и *L3* и замкните *S0*. Провести измерения аналогично п. 8.2.4.

#### **8.2.7. Обрыв фазы В при резистивно-емкостной нагрузке в других фазах без нулевого провода**

Разомкните *S0*. Включите *L1* в фазу *A*, а в фазу *C* – только конденсатор *C1*. Отдельно зафиксируйте показания ваттметров. Обратите внимание на величины «*Power Factor*».

#### **8.2.8. Короткое замыкание фазы А без нулевого провода**

Включите *L1*, *L2*, *L3*, а в фазе *A* (!) включите также *SQ* клавишей *Q*. По окончании опыта отключите этот короткозамкнутый провод.

Закройте схему соединения звездой.

### **8.3. Экспериментальное исследование соединения нагрузки треугольником**

Схема цепи изображена на рис. 8.5. Обратите внимание на расположение амперметров *A1*, *A2*, *A3* для измерения линейных токов *I*<sub>*A*</sub>, *I*<sub>*B*</sub>, *I*<sub>*C*</sub> и фазных токов *I*<sub>*ab*</sub>, *I*<sub>*bc*</sub>, *I*<sub>*ca*</sub> (*A4*, *A5*, *A6*).

Для исследования цепи в папке Лаб.раб. №10 откройте цепь «Circuit 2 - 3х фазный треугольник». В цепи использованы резисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  и  $R4$  с разбросом параметров 5%.

Перед исследованием измерьте линейные напряжения  $U_{\text{л}}$ . Фазные напряжения измерьте пробником V1.4, расположенным справа внизу панели измерительных приборов.

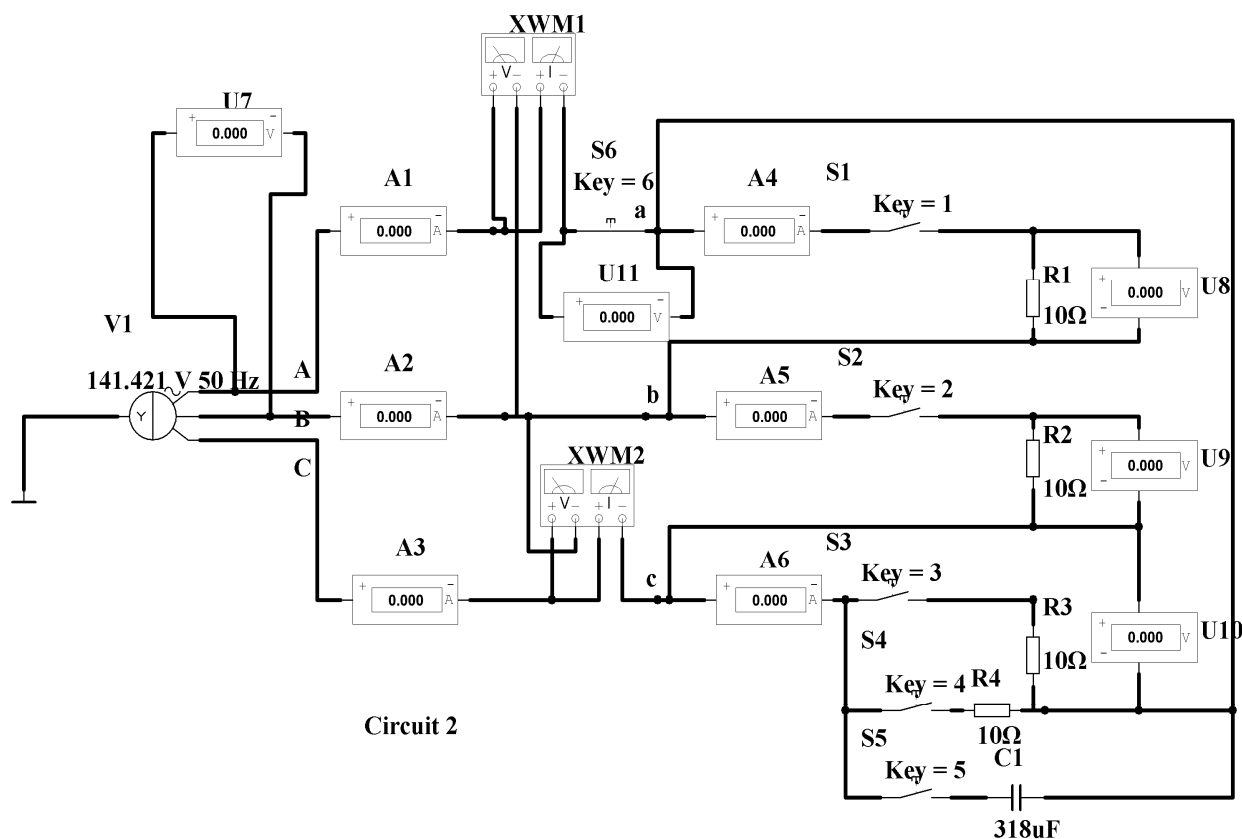


Рис. 8.5

### 8.3.1. Одинаковая нагрузка фаз

В фазе  $ab$  включите  $S1$ , в фазе  $bc$  –  $S2$ , в фазе  $ca$  –  $S3$ . В этом и каждом из последующих пунктов исследования проведите измерение величин, указанных в табл. 8.2.

Таблица 8.2

№	$I_A, \text{A}$	$I_B, \text{A}$	$I_C, \text{A}$	$I_{ab}, \text{A}$	$I_{bc}, \text{A}$	$I_{ca}, \text{A}$
1						
...						
7						

При оформлении отчета, для каждого пункта исследования по результатам измерений подобно рис. 8.3, б постройте ВД в масштабе

напряжений и токов. Для пунктов, где измеряется мощность, определите активную мощность  $P$  всей цепи, полную  $P_S$  и реактивную  $P_q$ , используя формулы п. 8.1.

### **8.3.2. Неодинаковая нагрузка фаз**

Включите  $R1$  (S1) и  $R2$  (S2), а в фазу  $ca$  –  $R3$  (S3) и  $R4$  (S4).

### **8.3.3. Резистивно-емкостная нагрузка фаз**

Включите  $R1$  (S1),  $R2$  (S2), а в фазу  $ca$  – конденсатор  $C1$  (S5). Активируйте лицевые платы ваттметров и запишите также показания мощности и коэффициентов мощности «*Power Factor*».

### **8.3.4. Обрыв фазы $ab$**

Включите только  $R2$  (S2) и  $R3$  (S3).

### **8.3.5. Обрыв фаз $ab$ и $bc$**

Оставьте включенным только  $R3$  (S3).

### **8.3.6. Обрыв линейного провода фазы $A$ при одинаковой нагрузке фаз приемника**

Включите  $R1$  (S1),  $R2$  (S2),  $R3$  (S3) и осуществите обрыв линейного провода  $Aa$ , разомкнув S6. Заполнив табл. 8.2, проведите измерения фазных напряжений приемника  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ . На ВД укажите положение точки « $a$ ».

### **8.3.7. Обрыв линейного провода фазы $A$ при резистивно-емкостной нагрузке фаз приемника**

Осуществите опыт, описанный в п. 8.3.6., заменив в фазе  $ca$   $R3$  (S3) конденсатором  $C1$  (S5).

## **8.4. Содержание отчета**

Отчет должен содержать формулировку цели работы, материалы всех пунктов экспериментальных исследований и заключение. По каждому пункту необходимо включить его название, результаты измерений, схему цепи и ВД, построенную в масштабе (подобно рис. 8.2,  $a$ ,  $b$ ), а также расчеты мощностей и ответы на следующие вопросы:

1. По каждому пункту исследований сформируйте критерии проверки полученных данных. Соответствует ли ВД первому закону Кирхгофа?
2. Соответствует ли ВД симметричному приемнику как в отношении расположения точки « $O_1$ », так и в отношении изображенных величин напряжений и токов?

## Работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

*Цель работы:* исследование особенностей установившихся реакций линейных цепей в периодическом несинусоидальном режиме.

#### 9.1. Подготовка к работе

В работе исследуют реакции  $L$ - и  $C$ -элементов и последовательной  $RLC$ -цепи на воздействие источника периодического несинусоидального напряжения, форма которого показана на рис. 9.1, *а*. Разложение в ряд Фурье входного сигнала  $u(t)$  имеет вид

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \sin k 2\pi f_1 t, \quad (9.1)$$

где амплитуды гармоник  $U_{mk} = \frac{4U_m}{\pi k}$ , частота первой (основной) гармоники

$f_1 = \frac{1}{T}$ ,  $T$  – период сигнала.

Амплитудный спектр сигнала, показанный на рис. 9.1, *б*, содержит только гармоники нечетных номеров ( $k = 2n + 1$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ), так как  $u(t) = -u(t \pm T/2)$ .

Напряжение и ток  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов определяются соответствующей вольтамперной характеристикой:  $u_R = Ri_R$ ,  $u_L = L \frac{di_L}{dt}$ ,  $u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$ . Законы изменения  $i_R$  и  $u_R$  подобны друг другу, следовательно, в установившемся периодическом режиме подобными будут и спектры. Поэтому для  $k$ -ой гармоники справедливо соотношение  $\dot{I}_{Rk} = \frac{1}{R} \dot{U}_{Rk}$ .

Операция интегрирования  $i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$  приводит к сглаживанию функции, т. е. к улучшению сходимости ряда Фурье. Действительно, в соответствии с формулой

$$\dot{I}_{Lk} = \frac{1}{jk\omega_1 L} \dot{U}_{Lk} \quad (9.2)$$

высшие гармоники в спектре тока индуктивности всегда выражены слабее, чем в спектре напряжения.

При воздействии на  $L$ -элемент указанного на рис. 9.1, а напряжения ток будет иметь пилообразную форму (рис. 9.1, в), сохраняя непрерывность в моменты смены знака  $u(t)$ . На основании (9.2) и рис. 9.1, б в спектре тока будет ярко выражена амплитуда первой гармоники (амплитуда третьей гармоники будет меньше первой в 9 раз, а не в 3 раза, как на рис. 9.1, б).

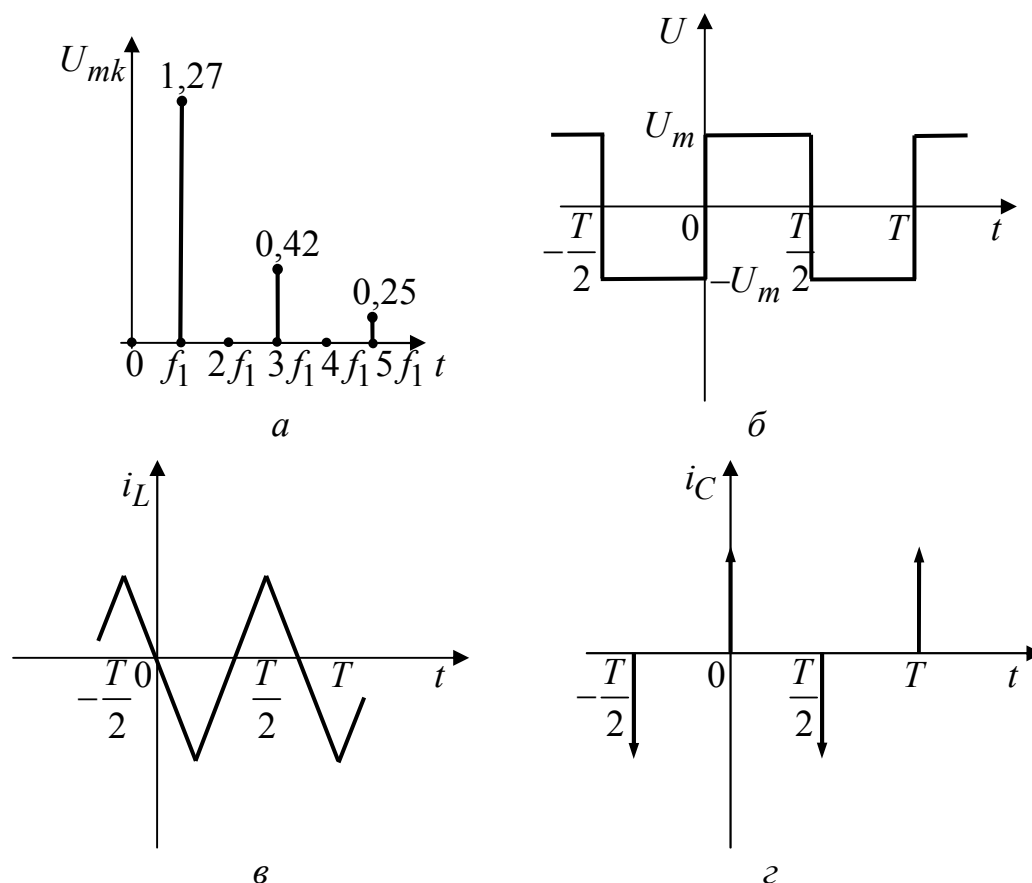


Рис. 9.1

Так как  $i_C = C \frac{du_C}{dt}$  и спектр тока  $C$ -элемента определяется как

$$\dot{I}_{ck} = jk\omega_1 C \dot{U}_{ck}, \quad (9.3)$$

высшие гармоники тока выражены резче, чем в спектре напряжения.

При воздействии на  $C$ -элемент указанного на рис. 9.1, а напряжения ток будет представлять собой последовательность импульсных функций (дельта-функций) с чередующимися знаками (рис. 9.1, г). На основании (9.3) и рис. 9.1, б в спектре тока амплитуды гармоник должны быть приблизительно одинаковы (как известно, спектр дельта-функции равен единице на любой частоте).

В лабораторной установке для наблюдения формы тока  $L$ - или  $C$ -элемента последовательно с ним включают резистор с малым сопротивлением (шунт), к которому подключается осциллограф для наблюдения осциллограммы тока. В результате напряжение кусочно-постоянной формы (рис. 9.1, *а*) подводят к последовательной  $RL$ - или  $RC$ -цепи, при этом наблюдаемые отклонения от графиков (рис. 9.1, *в* и *г*), соответствующих операциям идеального интегрирования и дифференцирования, объясняются возникновением переходных процессов в указанных цепях при каждом изменении знака  $u(t)$ . Однако сопротивление шунта выбрано значительно меньшее по величине сопротивления  $L$ - и  $C$ -элементов для исследуемых частот, поэтому описанные спектральные соотношения в основном соблюдаются.

При воздействии несинусоидального периодического сигнала на  $RLC$ -цепи преобразование спектров может быть более сложным, соответствующим частотной характеристике цепи. В частности, в цепях, где возможен резонанс, в составе реакции могут оказаться усиленными или ослабленными гармоники с частотами, близкими к резонансным. Так, если резонансная частота последовательной  $RLC$ -цепи равна частоте третьей гармоники, то в спектре тока

$$\dot{I}_k = \frac{1}{R + j\left(k\omega_1 L - \frac{1}{k\omega_1 C}\right)} \dot{U}_k \quad (9.4)$$

третья гармоника будет ярко выражена в случае малого значения сопротивления  $R$ , т. е. при высокой добротности контура.

## 9.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и в ней “Лаб. раб. №11”.

### 9.2.1. Исследование периодического входного сигнала и его спектра

Для выполнения работы используют схему, на которой расположены катушка индуктивности  $L$ , конденсатор  $C$  и резистор  $R$ .

Для снятия амплитудного спектра применяют анализатор гармоник, содержащий усилитель с подключенными к нему фильтрами высокой добротности. Если настроить резонансные частоты фильтров на частоты

гармоник исследуемого сигнала, то вследствие избирательности контура каждая гармоника будет выделена, усилена и пропущена на выход анализатора, где ее амплитуду можно измерить.

На рисунке 9.2 представлена блок схема, а на рисунке 9.3 – схема для исследования, где ключами S4, S5 включаются элементы  $C_1$ ,  $L_1$  на вход анализатора X1.

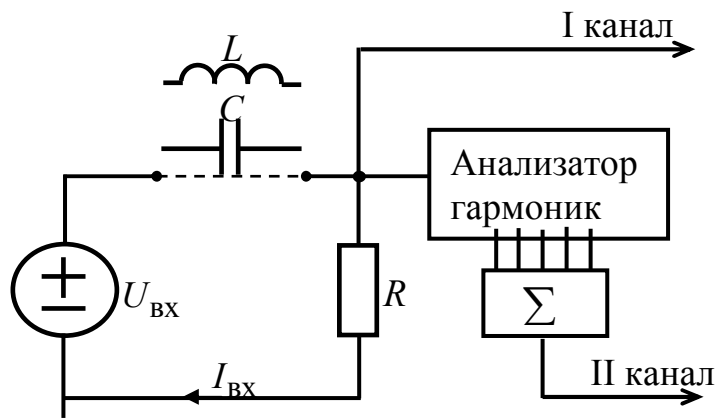


Рис. 9.2

Ключи S1, S2, S3 коммутируют выделенные гармоники на входе сумматора. Измерительный прибор XSA1 (анализатор спектра) позволяет увидеть на экране и измерить параметры дискретных спектров входных сигналов. Двухлучевой осциллограф XSC1 дает изображение формы входного воздействия и его аппроксимации тремя гармониками на выходе сумматора. Для наблюдения формы гармоник служит четырех лучевой осциллограф XSC2.

Напряжение прямоугольной формы  $U_{мвх} = 1.0$  В, изображенное на рис. 9.1, а, заданной частоты  $f_1 = 5$  кГц подается на вход анализатора от источника V1.

Для исследований замкните S4 и S5 и активируйте схему. Активируйте анализатор спектра XSA1 и установите на нем следующие параметры измерения; в режиме *Set Span* и *Stop* ( $Span = 30\text{kHz}$ ,  $Start = (0\_1)\text{kHz}$ ,  $Center = 15\text{kHz}$ ,  $End = 30\text{kHz}$ ,) и введите их кнопкой *Enter*, затем установите цену одной клетки экрана по вертикали в режиме *Lin* ( $Range = 0.2\text{V/Div}$  и  $Resolution Freq = 200\text{Hz}$ ). Запустите анализатор кнопкой *Start*. Занесите в приведенную ниже таблицу амплитудные  $U_{mk}$  значения 3-х гармоник, измерив их на экране анализатора XSA1 перемещением измерительного курсора.

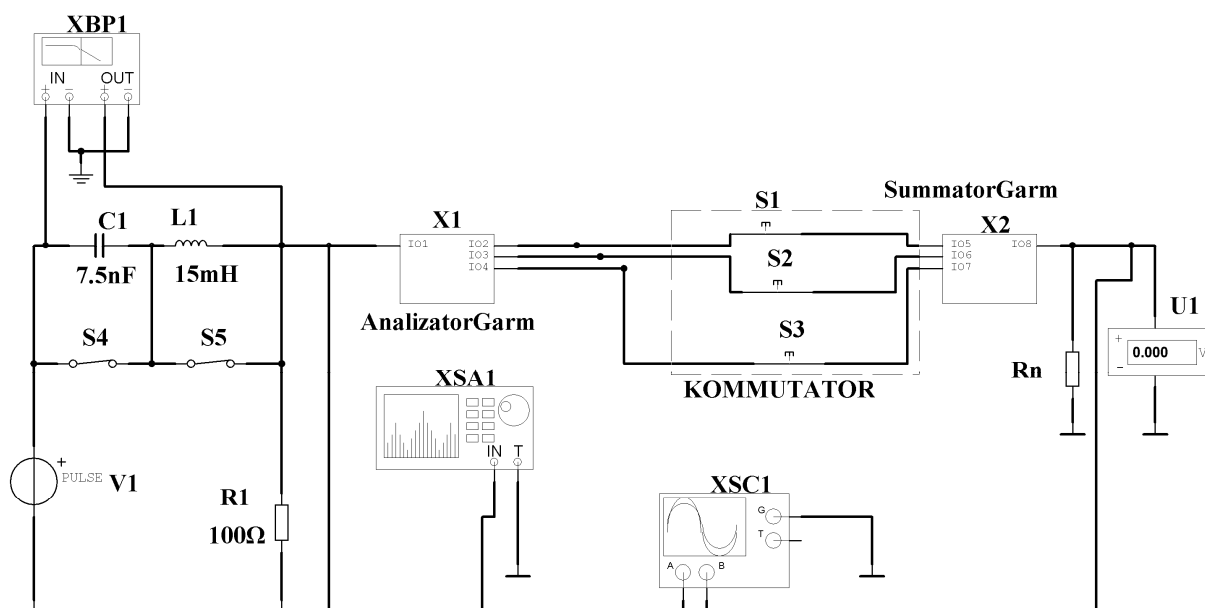


Рис. 9.3

Номер пункта	$k$ (номер гармоники)	$U_k$ , мВ	$U_{mk}$

Измерьте вольтметром U1 действующие значения  $U_k$  каждой гармоники, включая их поочередно ключами S1, S2, S3, и внесите показания в таблицу.

Активируйте осциллограф XSC1 и снимите осциллограммы напряжения на входе анализатора и аппроксимации напряжения на выходе сумматора для одной, двух и трех гармоник. Запишите отдельно показания вольтметра U1 при аппроксимации воздействия 3-мя гармониками.

Учитывая, что вольтметр показывает действующее значение синусоидального напряжения, рассчитайте амплитудные значения гармоник сигнала по формуле

$$U_{mk} = U_k \sqrt{2} \quad (9.5)$$

и сравните их с амплитудами гармоник, измеренных по анализатору.

Определите действующее значение периодического сигнала по формуле

$$U \cong \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^5 U_{mk}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^5 U_k^2} \quad (9.6)$$

и сравните с показаниями вольтметра U1.

Постройте график дискретного амплитудного спектра сигнала.

### 9.2.2. Исследование периодического режима в $L$ -элементе.

Подайте периодическое входное напряжение на  $L$ -элемент, для чего разомкните ключ S5. Зарисуйте осциллограммы наблюдаемого на элементе



$R_1$  напряжения, которое пропорционально току  $L$ -элемента, и аппроксимации напряжения на выходе сумматора.

Активируйте *Bode Plotter* (ХВР1) и снимите АЧХ в диапазоне частот от 1 до 50 кГц.

По методике, описанной в п. 9.2.1, проведите анализ амплитудного спектра тока  $L$ -элемента. Результаты измерений трех гармоник занесите в приведенную ранее таблицу. По формуле (9.5) вычислите амплитуды гармоник напряжения на  $R_1$ , которые пропорциональны соответствующим гармоникам тока. Постройте график амплитудного спектра напряжения пропорционального току.

### **9.2.3. Исследование периодического режима в $C$ -элементе.**

Вместо  $L$ -элемента подключите к выводам источника емкостный элемент. Проведите исследования, аналогичные исследованиям в п. 9.2.2.

### **9.2.4. Исследование периодического режима в последовательной $RLC$ -цепи.**

Подключите к выводам источника последовательно соединенные  $R$ -,  $L$ - и  $C$ -элементы. Проведите исследования, подобные исследованиям в п. 9.2.2. Активируйте *Bode Plotter* (ХВР1) и снимите АЧХ для  $RLC$ -цепи в диапазоне от 1 до 50 кГц. Определите резонансную частоту.

## **9.3. Требования к отчету**

В отчете следует сформулировать цель работы, привести материалы всех пунктов экспериментального исследования, ответить письменно на все вопросы и сделать заключение. По каждому пункту необходимо привести его название, схему исследуемой цепи, осциллограммы наблюдаемых сигналов, таблицу измерений и вычислений; требуемые расчеты, графики амплитудных спектров, а по пп. 2 – 4 также качественно построенные графики частотных характеристик цепей.

Ответьте письменно на следующие вопросы. 1. Сигнал  $U(t)$  изображенный на рис. 9.1, б не содержит гармоник четных номеров. Почему? Соответствуют ли этому результаты эксперимента? 2. Согласуются ли результаты расчетов по формулам (9.6) и (9.7)? 3. Соответствует ли полученный график амплитудного спектра рисунку 9.1, в? 4. Почему график тока  $i_L(t)$  на рис. 9.1, в имеет пилообразную форму? Сравните его с данными осциллограммы. 5. Как графики амплитудных спектров тока  $i_L(t)$  и входного

напряжения соответствуют формуле (9.2)? 5. Почему график тока  $i_C(t)$  на рис. 11.1,  $z$  имеет форму последовательности дельта-функций? Сравните его с данными осциллограммы. 6. Насколько графики амплитудных спектров  $i_C(t)$  и входного напряжения соответствуют формуле (9.3)? 7. Какова резонансная частота цепи? Согласуется ли деформация спектра входного напряжения с частотной характеристикой цепи?

### **Работа № 10**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИХ ЧЕРЕЗ ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ**

*Цель работы:* изучение характера и степени искажений импульсных сигналов прямоугольной формы при прохождении их через линейные цепи.

### **10.1. Подготовка к работе**

При исследовании искажений импульсных сигналов обычно через цепь пропускают сигнал прямоугольной формы. Более «гладкие» сигналы той же длительности имеют меньшую ширину спектра и, следовательно, искажаются слабее, чем прямоугольные импульсы. Искажения проявляются в удлинении передних и задних фронтов импульсов, в колебаниях на переднем и заднем фронтах (появление «выбросов»), в спаде плоской части импульсов.

Для оценки искажений используют 2 основных подхода:

1) в цепях первого и второго порядков, где корни характеристического уравнения (собственные частоты цепи) могут быть вычислены относительно просто, степень искажений можно оценить сравнением длительности импульса с длительностью переходного процесса (необходимо учитывать также форму переходного процесса);

2) в цепях высокого порядка, где вычисление собственных частот затруднено, сравнивают полосу пропускания цепи (определяемую значительно проще) с шириной спектра сигнала.

В обоих случаях оценка искажений будет приближенной, т. е. качественной:

1) чем меньше длительность переходного процесса и меньше величина полюсной добротности функции передачи цепи, тем ниже уровень ожидаемых искажений;

2) если главная часть спектра сигнала лежит в полосе пропускания цепи, то следует ожидать малых искажений.

Исследуемая в работе цепь первого порядка (рис. 10.1, а) имеет собственную частоту

$$p_1 = -1/(RC) = -1/\tau_{\text{ц}}, \quad (10.1)$$

где  $\tau_{\text{ц}}$  – постоянная времени цепи.

Уменьшение  $\tau_{\text{ц}}$  снижает длительность переходного процесса и искажения сигнала. Очевидно, если  $\tau_{\text{ц}}$  будет на порядок меньше длительности сигнала, то искажения ожидаются незначительные.

В исследуемой цепи второго порядка (рис. 10.1, б) собственные частоты цепи определяются выражением

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (10.2)$$

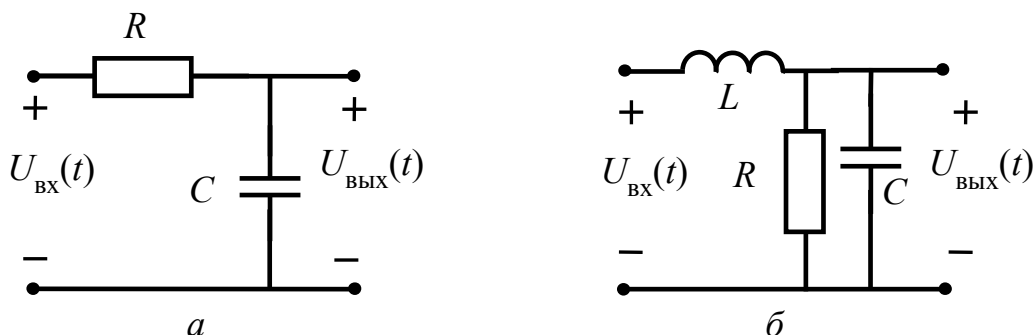


Рис. 10.1

Наиболее быстрый переходный процесс и, следовательно, меньшие искажения формы сигнала будут при кратных собственных частотах  $p_1 = p_2$ ; при вещественных различных корнях длительность переходного процесса увеличивается, а при комплексных собственных частотах на осциллограмме переходного процесса наблюдаются «колебания» и появляются «выбросы» на переднем и заднем фронтах выходного сигнала.

Исследуемые в работе цепи высокого порядка (рис. 10.2) также представляют собой фильтр нижних частот, но для оценки искажений здесь следует использовать частотный подход. АЧХ функции передачи по напряжению

$$|H_U(j\omega)| = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} \quad (10.3)$$

в области низких частот мало отличается от начального значения  $H_U(0)$ . Ширина полосы определяется граничной частотой (частотой среза  $f_{\text{ср}} = \omega_{\text{ср}}/(2\pi)$ ), на которой выполняется условие

$$|H_U(j\omega_{\text{ср}})| = H_U(0)/\sqrt{2}. \quad (10.4)$$

Амплитудный спектр единичного по уровню входного прямоугольного импульса длительностью  $t_{\text{и}}$  описывается выражением

$$|U_{\text{вх}}(j\omega)| = 2|\sin 0,5\omega t_{\text{и}}|/\omega. \quad (10.5)$$

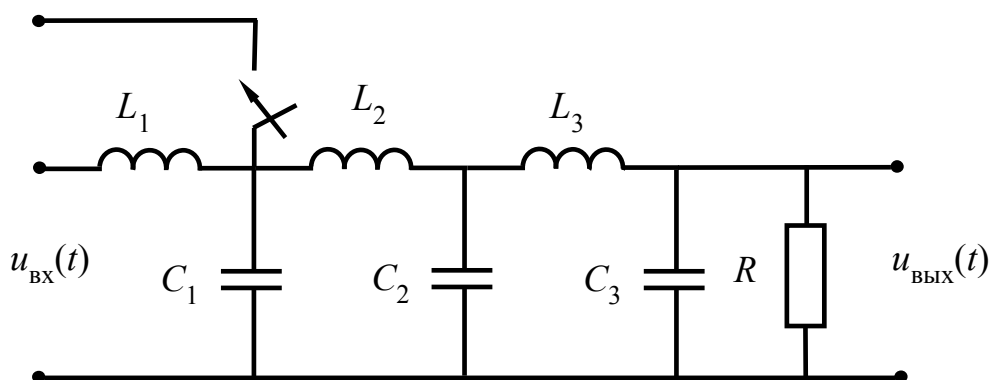


Рис. 10.2

Ширина спектра определяется в первом приближении шириной первого «лепестка», т. е. первым нулем спектра (10.5)

$$\Delta\omega_{\text{сп}} = 2\pi/t_{\text{и}}; f_{\text{сп}} = 1/t_{\text{и}}. \quad (10.6)$$

Очевидно, что искажения будут малы при выполнении условия

$$f_{\text{сп}} < f_{\text{ср}}. \quad (10.7)$$

## 10.2. Экспериментальные исследования с применением моделирующих компьютерных программных средств *Multisim*

Для начала работы необходимо включить компьютер и на рабочем столе открыть папку “Лаб. раб. ТОЭ” и в ней “Лаб. раб. №12”. Исследования проводятся в цепи схема, которой приведена на рис.12.3, где два источника напряжения генерируют импульсы прямоугольной формы длительностью 2 и 10 мкс, которые подключаются к цепи ключом S5. Цепи I – VI порядка составляются ключами  $\text{Key} = 1, 2, 3, 4$ . Резисторы нагрузки  $R_1 - R_4$  подключаются роторным переключателем  $\text{Key} = 6$ .

### 10.2.1. Исследование искажений в цепи первого порядка.

Соберите схему, изображенную на рис. 10.1, а ( $C = 200$  пФ,  $R = 5$  кОм), и снимите осциллограммы напряжений  $u_{\text{ВХ}}(t)$  и  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ .

Установите режим работы осциллографа (ждущий) *Norm* или *Sing*. Исследование проведите для двух входных сигналов прямоугольной формы длительностью 2 мкс и 10 мкс.

Снимите осциллограммы входного и выходного напряжения, установив на экране их совмещенное изображение.

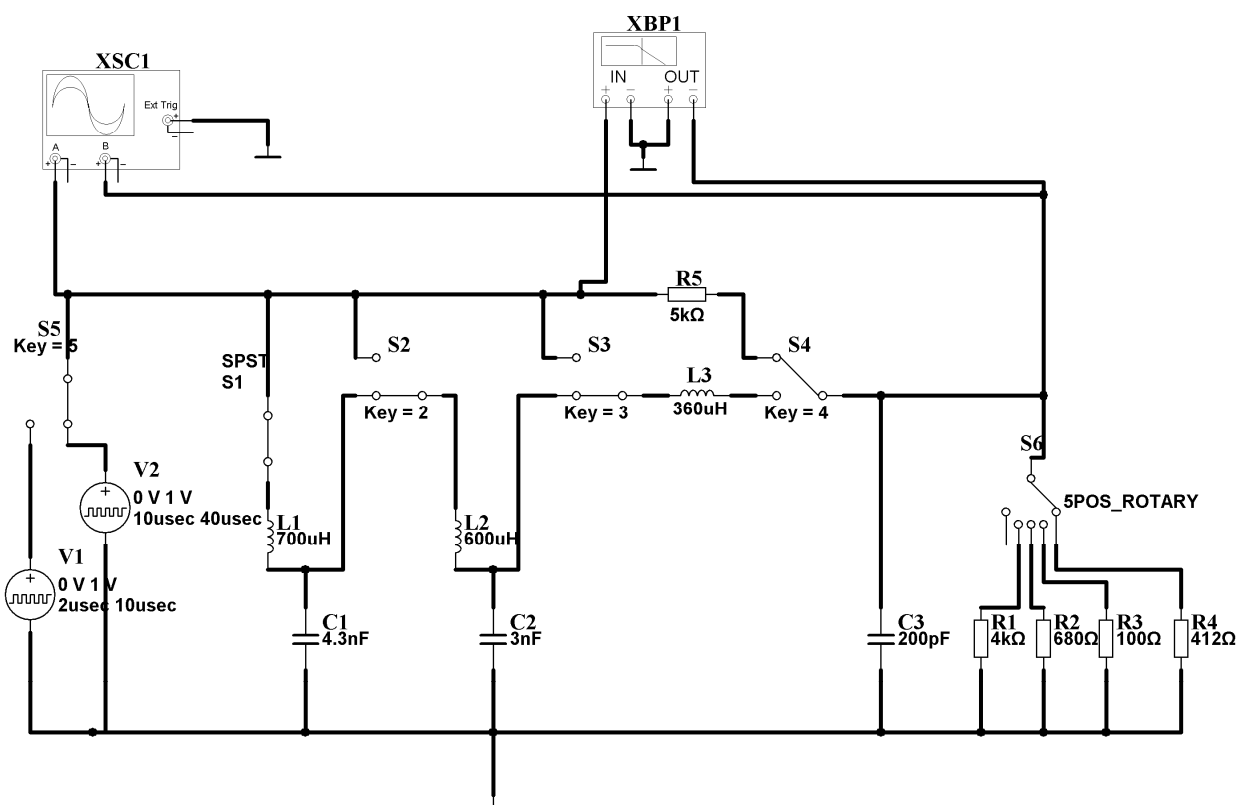


Рис. 10.3

Вычислите постоянную времени цепи  $\tau_c$  по формуле (10.1). Постройте качественно график переходной характеристики выходного сигнала и сравните его с экспериментально снятой переходной характеристикой.

### 10.2.2. Исследование искажений в цепи второго порядка.

Аналогично п. 10.2.1 исследуйте искажения и снимите осциллограммы напряжений при прохождении прямоугольного импульса длительностью  $t_{\text{и}} = 10$  мкс через цепь, схема которой показана на рис. 10.1, б ( $L = 360$  мкГн,  $C = 200$  пФ) для различных значений  $R$ : а)  $R_1 = 4$  кОм; б)  $R_2 = 0,67$  кОм; в)  $R_3 = 0,1$  кОм.

На основании (10.2) вычислите собственные частоты цепи в каждом из указанных случаев, запишите выражения для переходной характеристики цепи (постоянные интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  не вычисляйте).

### 10.2.3. Исследование искажений в цепи высокого порядка.

Соберите по указанию преподавателя схему четвертого или шестого порядка (рис. 10.2):  $L_1 = 700$  мкГн,  $L_2 = 600$  мкГн,  $L_3 = 360$  мкГн,  $C_1 = 4400$  пФ,  $C_2 = 3000$  пФ,  $C_3 = 200$  пФ,  $R = R_4 = 0,41$  кОм).

Снимите осциллограммы напряжений  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  при длительности сигналов прямоугольной формы на входе 10 мкс.

Затем, для заданной цепи откройте *Bode plotter* и снимите АЧХ и ФЧХ функции передачи цепи по напряжению  $|H_U(j\omega)| = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  в диапазоне частот от 20 кГц до 500 кГц. Опытные данные занесите в таблицу.

$f$ , кГц	$U_{\text{вх}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В	$ H_U(j\omega) $

Постройте график АЧХ и, используя (10.5) и (10.6), графики амплитудных спектров входных сигналов (вычисления проведите только для  $\omega = 0$  и  $\omega = 2\pi f = \pi / t_{\text{с}}^{\text{с}} \cdot$ ).

Определите полосу пропускания цепи  $\Delta f_{\text{пр}} = f_{\text{ср}}$  согласно (10.4) и ширину спектра  $\Delta f_{\text{сп}}$  согласно (10.6) для каждого из входных импульсов. Сопоставляя  $\Delta f_{\text{пр}}$  и  $\Delta f_{\text{сп}}$  согласно (10.7), оцените ожидаемую степень искажений.

## 10.3. Требования к отчету

Отчет должен содержать формулировку цели работы, все пункты экспериментального исследования и заключение. Необходимо привести название каждого пункта, схему исследуемой цепи, совмещенные по оси времени осциллограммы входного и выходного напряжений, требуемые расчеты и ответы на следующие вопросы по каждому пункту: 1. Какими аналитическими выражениями (в общем виде) описываются графики процессов? 2. Чем объясняются искажения проходящих через цепь сигналов? 3. Соответствуют ли расчетные данные экспериментальным и чем объяснить их различие?

В пп. 10.2.1, 10.2.2 рядом с осциллограммами необходимо изобразить диаграммы расположения собственных частот цепи, а в п. 10.2.3 рядом с каждой парой осциллограмм – совмещенные по оси частот диаграммы АЧХ и амплитудного спектра сигнала.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Основы теоретической электротехники: Учеб. пособие для вузов / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Беянин, -СПб.: Лань, 2009.
2. Полунатурное моделирование электрических цепей: Лабораторный практикум по ТОЭ / Под ред. Ю. А. Бычкова, А. П. Баркова, Э. П. Чернышева. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007
3. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Ю. А. Бычкова, В. М. Золотницкого, Е. Б. Соловьевой, Э. П. Чернышева. - СПб.: Питер, 2012.



## Содержание

Предисловие .....	3
Требования к оформлению отчетов.....	3
Работа № 1. Исследование характеристик источников питания и резистивных элементов электрических цепей .....	4
Работа № 2. Исследование линейных резистивных цепей .....	9
Работа № 3. Исследование свободных процессов в электрических цепях .....	14
Работа № 4. Исследование установившегося синусоидального режима в простых цепях .....	21
Работа № 5. Исследование резонансных явлений в простых электрических цепях .....	27
Работа № 6. Исследование частотных характеристик двухполюсников.....	38
Работа № 7. Исследование индуктивно связанных цепей .....	44
Работа № 8. Исследование трехфазных цепей .....	52
Работа № 9. Исследование установившихся периодических несинусоидальных режимов в линейных цепях .....	60
Работа № 10. Исследование искажений импульсных сигналов при прохождении их через линейные цепи .....	66
Список рекомендуемой литературы.....	72

Барков Анатолий Павлович  
Панкин Валерий Васильевич  
Соколов Валентин Николаевич  
Федоров Виктор Викторович