

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра электротехники  
и авиационного электрооборудования

В.А. Гатовский, С.И. Гавриленков

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению лабораторных работ

Часть I

*для студентов  
направлений 25.03.02 и 25.05.05  
всех форм обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2025

УДК 621.3  
ББК 6П2.12  
Г23

Рецензент:

*Халютин С.П.* – д-р техн. наук, профессор

**Гатовский В.А.**

Г23

Электротехника [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ. Часть I / В.А. Гатовский, С.И. Гавриленков. – М.: ИД Академии Жуковского, 2025. – 32 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Электротехника» для обучающихся по направлениям подготовки 25.03.02 и 25.05.05 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 12.05.2025 г. и методических советов: по направлению 25.03.02 – 27.05.2025 г., по направлению 25.05.05 – 27.05.2025 г.

**УДК 621.3  
ББК 6П2.12**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 27.06.2025 г.

Формат 60х84/16 Печ. л. 2 Усл. печ. л. 1,86

Заказ № 2010/0522-УМП12 Тираж 25 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского

125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А

Тел.: (499) 755-55-43

E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический  
университет гражданской авиации, 2025

## Работа № 1. ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Получение навыков сборки простых электрических цепей, включения в электрическую цепь измерительных приборов. Научиться измерять токи и напряжения, убедиться в соблюдении законов Ома и Кирхгофа в линейной электрической цепи.

### 2. Пояснения к работе

Электрическая цепь, состоящая из элементов, вольтамперные характеристики которых являются прямыми линиями, называется линейной электрической цепью, а элементы, из которых состоит цепь, - линейными элементами.

Соединение в электрической цепи, при котором через все элементы протекает один и тот же ток, называется последовательным соединением. Эквивалентное сопротивление  $R_3$  последовательной цепи постоянного тока равно сумме сопротивлений отдельных участков:  $R_3 = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

Напряжение на отдельном участке в соответствии с законом Ома пропорционально сопротивлению этого участка:  $U_1 = I \cdot R_1$ ;  $U_2 = I \cdot R_2$

**Закон Ома формулируется так: сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению в проводнике и обратно пропорциональна сопротивлению этого проводника.**

Пояснения к закону:

- Чем выше напряжение в проводнике, тем выше будет и сила тока в этом проводнике.

- Чем выше сопротивление проводника, тем меньше будет сила тока в нем.

Напряжение  $U$  на входе последовательной цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа равно сумме напряжений на отдельных участках:  $U = U_1 + U_2$ .

**Второй закон Кирхгофа** гласит, что алгебраическая сумма разностей потенциалов точек, рассматриваемых последовательно вдоль направления обхода контура любой электрической цепи или ее схемы замещения, тождественно равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n \Delta\varphi_k = 0$$

Или, в любом контуре электрической цепи или ее схемы замещения алгебраическая сумма падения напряжений равна алгебраической сумме ЭДС.

$$\sum_{j=1}^n E_j = \sum_{i=1}^n U_i$$

Параллельное соединение проводников — это способ соединения, при котором проводники подключены к одним и тем же узлам, и напряжение на них одинаково.

При параллельном соединении двух или нескольких элементов напряжение на них одно и то же, так как выводы этих элементов подключены к одним и тем же узлам. Токи в отдельных элементах определяются по закону Ома:  $I_1 = U/R_1$ ;  $I_2 = U/R_2$

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток  $I$  в неразветвленной части цепи равен сумме токов всех параллельных ветвей:  $I = I_1 + I_2$ .

**Первый закон Кирхгофа гласит, что сумма всех токов в любом узле электрической цепи равна 0, или сумма токов, втекающих в узел, равна сумме всех токов, вытекающих из узла.**

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Проводимость параллельного соединения равна сумме проводимостей отдельных участков:

$$G_3 = G_3 + G_3 + \dots + G_n \text{ или } \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Тогда для нахождения эквивалентного сопротивления параллельного соединения, состоящего из двух элементов необходимо:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Баланс мощностей это выражение закона сохранения энергии, в электрической цепи. Определение баланса мощностей звучит так: сумма мощностей, потребляемых приемниками, равна сумме мощностей, отдаваемых источниками. То есть, если источник ЭДС в цепи отдает 100 Вт, то приемники в этой цепи потребляют ровно такую же мощность.

$$\sum_{k=1}^n E_k \cdot I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot R_k$$

### 3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Собрать линейную электрическую цепь с последовательным соединением резисторов (рис. 1).

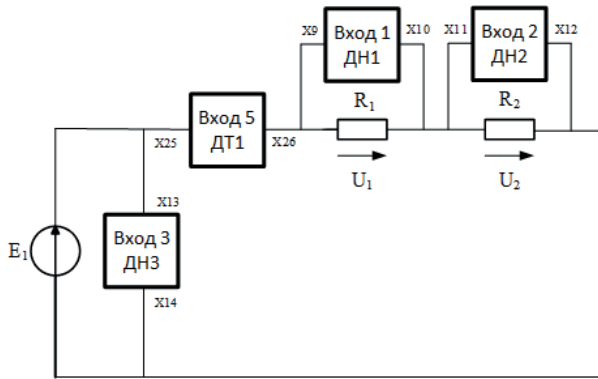


Рис.1

Для измерения тока  $I_1$  использовать вход 5 модуля ввода-вывода (гнезда X25, X26). Для измерения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  использовать входы 1, 2, 3 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10, X11 и X12, X13 и X14, соответственно).

Представить схему для проверки преподавателю.

Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания, который выключается только в конце лабораторной работы) и модуля «Ввод-вывод».

Включить модуль ввода-вывода

Загрузить программу автоматического управления Delta Profi.

В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню **«Работы»**.

Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел **«Электрические цепи (мини)»**.

В появившемся списке работ выбрать **«Работа 1-2. Простейшие линейные электрические цепи постоянного тока»** и открыть вкладку **«С последовательным соединением резисторов»**. На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

3.2. На модуле питания включить источник постоянного напряжения (SA1). Измерить ток в цепи, величину напряжения  $U$  на входе цепи и напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания (SA1).

Таблица 1

№	Последовательное соединение						Параллельное соединение					
	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$U_3$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U = U_1 + U_2$ , В	$I_1$ , мА	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$I = I_1 + I_2$ , мА
1	150	330										
2												

3.3. Заменить резисторы  $R_1$  и  $R_2$  Ом на резисторы, заданные преподавателем, и повторить п.3.2. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп» или командой главного меню «Управление – Стоп» или горячей клавишей F6.

3.4. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резисторов (рис. 2). Для измерения тока использовать входы 5, 6, 7 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26, X27 и X28, X29 и X30, соответственно). Для измерения напряжения  $U$  использовать вход 1 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10). Представить схему для проверки преподавателю.

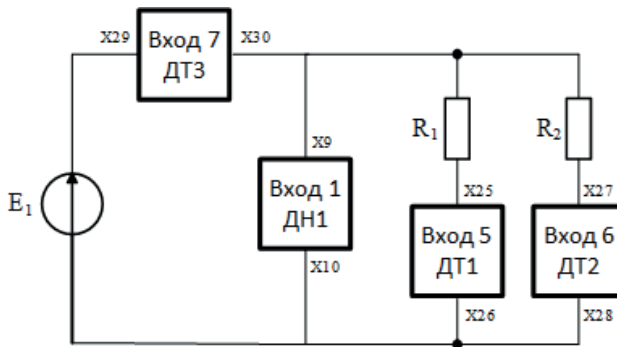


Рис.2

3.5. Загрузить программу автоматического управления Delta Profi. В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «Работы». Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел «Электрические цепи и основы электроники».

В появившемся списке работ выбрать «Работа 1-2. Простейшие линейные электрические цепи постоянного тока» и открыть вкладку «С

**параллельным соединением резисторов». На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.**

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

3.6. На модуле питания включить источник постоянного напряжения (SA1). Измерить напряжения и токи на всех участках цепи. Результаты занести в табл. 1. Выключить источник постоянного напряжения (SA1).

3.7. Заменить резистор  $R_1$  и  $R_2$  на резисторы, заданные преподавателем и повторить п.3.6. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп» меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

3.8. Проверить выполнение баланса мощностей.

3.9. Сделать выводы о выполнении законов Кирхгофа и Ома в линейной электрической цепи постоянного тока.

3.10. Объяснить, используя законы Ома и Кирхгофа, изменение режима работы цепи и отдельных потребителей при изменении величины резистора  $R_2$ .

3.11. Собрать линейную цепь со смешанным соединением резисторов (рис.3).

Для измерения тока использовать входы 5, 6, 7 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26, X27 и X28, X29 и X30, соответственно). Для измерения напряжений на отдельных участках цепи использовать вход 1 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10).

Представить схему для проверки преподавателю.

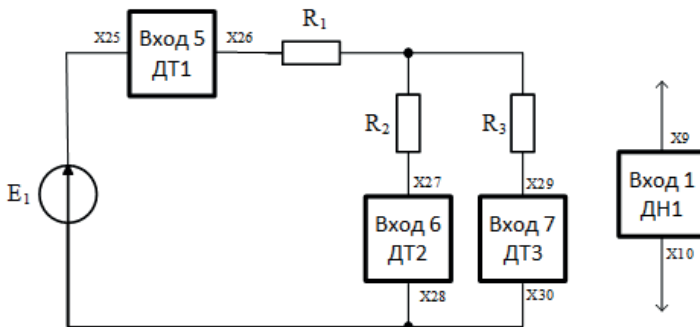


Рис.3

3.12. Загрузить программу автоматического управления Delta Profi. В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «Работы».

Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел **«Электрические цепи (мини)»**.

В появившемся списке работ выбрать **«Работа 1-2. Простейшие линейные электрические цепи постоянного тока»** и открыть вкладку **«Со смешанным соединением резисторов»**. На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

Запустить программу в работу, нажатием кнопки **«Пуск»** или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

3.13. Включить питание и измерить напряжения и токи на всех участках цепи. Результаты занести в табл. 2. Выключить источник постоянного напряжения.

Таблица 2

Смешанное соединение резисторов											
№	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	U, В	U1, В	U23, В	Uэ=U1+U2 3, В	I1, мА	I2, мА	I3, мА	I=I2+I3 , мА
1	68	150	330								
2	68	?	?								

3.14. Заменить резисторы R2 и R3 на резисторы, заданные преподавателем, и повторить п.3.13.

Остановить программу, нажатием кнопки **«Стоп»** или командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

3.15. Объяснить, используя законы Ома и Кирхгофа, изменение режима работы исследуемой цепи и отдельных потребителей при изменении величины резистора R3.

3.16. Используя мультиметр в режиме измерения сопротивления, измерить значения сопротивлений R1, R2, R3. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

Резистор	Измерено мультиметром	Вычислено
R1, Ом		
R2, Ом		
R3, Ом		

В конце лабораторной работы выключить стенд (автоматический выключатель QF модуля питания).



3.17. По результатам измерений (п. 3.13) вычислить значения сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Результаты расчетов занести в табл. 3.

3.18. Проверить выполнение баланса мощностей.

3.19. Сделать выводы о выполнении законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной электрической цепи постоянного тока.

#### **4. Содержание отчета**

1. Написать наименование и цель работы.
2. Нарисовать все схемы и таблицы с полученными экспериментальными и расчетными данными.
3. Вычислить общее сопротивление для каждой схемы для своего варианта (последовательное, параллельное и смешанное соединение).
4. Проверить выполнение баланса мощностей.
5. Написать вывод по работе.

#### **5. Контрольные вопросы.**

1. Что такое «линейный элемент» в электрической цепи.
2. Как формулируются закон Ома и законы Кирхгофа?
3. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность и сопротивление?
4. Как определить величину эквивалентного сопротивления при последовательном соединении резисторов?
5. Как определить величину эквивалентного сопротивления при параллельном соединении резисторов?
6. В чем заключается баланс мощностей в цепи постоянного тока?

### **Работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ.**

#### **1. Цель работы**

Экспериментальная проверка результатов аналитического расчета линейной электрической цепи с двумя источниками электропитания.

#### **2. Пояснения к работе**

Анализ любой электрической цепи может быть проведен методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Если электрическая цепь состоит только из параллельных ветвей, то есть имеет два узла (рис. 1), то её анализ целесообразно проводить методом узлового напряжения, применение которого является менее трудоемким и позволяет избежать решения системы уравнений. Метод узлового напряжения рекомендуется использовать и в тех случаях, когда сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно- и параллельно- соединенные резисторы эквивалентными,

используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду или звезды в треугольник.

Применение данного метода состоит из двух этапов. На первом этапе определяется величина узлового напряжения  $U_{ba}$  (рис. 2.):

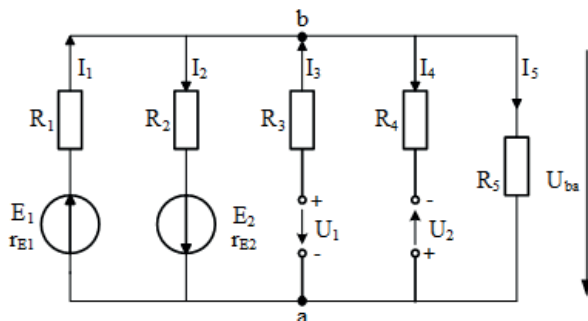


Рис.1

Со знаком «+» берутся ЭДС, направленные между точками  $a$  и  $b$  встречно напряжению  $U_{ba}$ , и напряжения ветвей, направленные согласно с  $U_{ba}$ .

При анализе электрических цепей методом узлового напряжения рекомендуется выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения.

$$U_{ba} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + U_1 g_3 - U_2 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}$$

где  $g_1 \dots g_5$  – проводимости соответствующих ветвей цепи.

После определения величины напряжения  $U_{ba}$  находят значения токов в ветвях, составляя уравнения по второму закону Кирхгофа. При этом каждый контур должен включать в свой состав ветвь с искомым током и узловое напряжение. Например, уравнение по второму закону Кирхгофа для тока в первой ветви будет иметь вид:

$$E_1 = I_1 (r_1 + R_1) + U_{ba}$$

Откуда:

$$r_1 = \frac{E_1 - U_{ba}}{I_1} - R_1 \text{ или } I_1 = \frac{E_1 - U_{ba}}{r_1 + R_1} = (E_1 - U_{ba}) g_1$$

### 3. Порядок выполнения работы

3.1 Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 2. Для измерения токов использовать входы 5, 6, 7 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26, X27 и X28 соответственно). Для измерения напряжения использовать вход 1 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10). В качестве источников электропитания  $E_1$  и  $E_2$  использовать источники постоянного напряжения +15В и -15В соответственно. Предъявить цепь для проверки преподавателю.

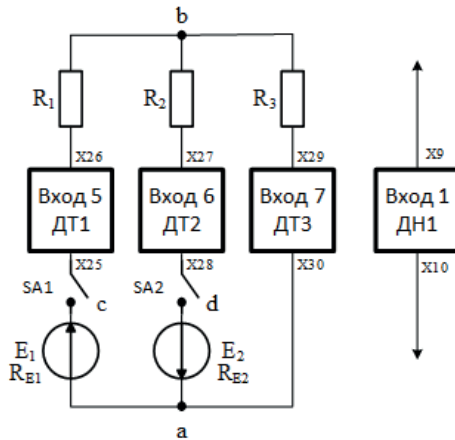


Рис.2

3.2 Загрузить программу автоматического управления Delta Profi.

В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «Работы». Одинарный щелчок левой кнопки мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел «Электрические цепи (мини)».

В появившемся списке работ выбрать «Работа 1-3. Линейная цепь постоянного тока с двумя источниками питания». На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

3.3 Включить электропитание стенда и при разомкнутых ключах SA1 и SA2 измерить ЭДС источников питания  $E_1$  и  $E_2$ . Результаты измерений занести в табл.1.

3.4. Замкнуть ключи SA1 и SA2. Измерить токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

$E_1$ , В	$E_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$\varphi_b$ , В	$\varphi_c$ , В	$\varphi_d$ , В

3.4. Полагая потенциал точки «а» равным нулю ( $\varphi_a = 0$ ), измерить потенциалы точек «а» «b» «с» и «d» ( $\varphi_b$ ,  $\varphi_c$ ,  $\varphi_d$ ). Результаты измерений занести в табл. 1.

Выключить электропитание стенда. Остановить программу нажатием кнопки «Стоп» или командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

3.6. По результатам измерений записать напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на зажимах источников электропитания при замкнутых ключах SA1 и SA2;

Вычислить: внутренние сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  источников электропитания на основе измеренного тока;

Сопротивления  $R_1$ ,  $R_1$  и  $R_3$  ветвей цепи (с учетом внутренних сопротивлений измерительных приборов).

Результаты вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

$U_1$	$U_2$	$U_{ba}$	$r_1$	$r_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$

3.7. Используя метод узлового напряжения, рассчитать величину узлового напряжения  $U_{ba}$  и токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результаты вычислений занести в табл. 2. Сравнить расчетные значения токов с их экспериментальными значениями.

3.8. Для внешнего контура построить потенциальную диаграмму. Для этого принять потенциал одной из точек равным 0. Определить потенциалы всех точек схемы, обойдя её контур по направлению тока, по правилу: Потенциал в каждой точке определяется потенциалом предыдущей точки плюс ЭДС источника, работающего в режиме генератора, минус ЭДС источника, работающего в режиме потребителя, и минус падение напряжения на сопротивлении между точками цепи.

#### 4. Содержание отчета

1. Написать наименование и цель работы.
2. Нарисовать схемы эксперимента и таблицы с результатами измерений и вычислений.
3. Нарисовать потенциальную диаграмму для внешнего контура цепи.
4. Написать вывод по работе.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Какие методы анализа цепей постоянного тока могут быть использованы для анализа исследуемой цепи?
2. Сколько уравнений по законам Кирхгофа необходимо записать для исследуемой цепи для её расчета? Сколько из них надо записать по второму закону Кирхгофа?
3. В каких случаях целесообразно применять метод узлового напряжения?
4. В чем состоит основное достоинство метода узлового напряжения?
5. Как в исследуемой цепи при использовании метода узлового напряжения определить токи в ветвях? Запишите эти соотношения.
6. Что такое «внешняя характеристика» источника питания? Запишите уравнение внешней характеристики.
7. Что такое «потенциальная диаграмма»?

## Работа № 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Приобретение навыков определения параметров элементов в цепях переменного тока по результатам измерений, включения в цепь вольтметра и амперметра, измерения тока и напряжения, применения закона Ома в цепи переменного тока.

### 2. Пояснения к работе

При расчете цепей переменного тока, в отличие от цепей постоянного тока, необходимо учитывать не один, а три простейших пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостной, которые характеризуются соответственно параметрами: активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  (индуктивным сопротивлением  $X_L = \omega L$ ) и емкостью  $C$  (емкостным сопротивлением  $X_C = 1/\omega C$ ), где  $\omega = 2\pi f$  – угловая (циклическая) частота.

В реальных электрических цепях не только специальные резисторы или реостаты обладают сопротивлением, но и практически любой элемент – проводники, катушки, конденсаторы, обмотки электромагнитов и прочее. Все они характеризуются тем, что при прохождении через них электрического тока происходит необратимое превращение электрической энергии в тепло. Так, согласно закону Джоуля-Ленца, если через резистор с сопротивлением  $r$  проходит ток  $i$ , за промежуток времени  $dt$  выделяется тепло в количестве  $dW = ri^2 \cdot dt$ .

Полученное тепловое выделение может быть как использовано по назначению, так и просто рассеяно в окружающей среде. В моделях электрических цепей это необратимое преобразование учитывается через включение эквивалентного сопротивления. Например, в электромагните электрическая энергия превращается в механическую (притяжение якоря), но при составлении эквивалентной схемы такой элемент заменяют на резистор, в котором выделяется такое же количество тепла. При анализе схемы уже не важно, чем на самом деле потребляется энергия электромагнитом или электроплиткой.

В цепях переменного тока термин «активное сопротивление» используется для обозначения сопротивления, которое из-за поверхностного эффекта оказывается выше, чем его значение при постоянном токе. Однако на низких частотах эта разница, как правило, не имеет большого значения.

Кроме того, напряжение, приложенное к активному сопротивлению, совпадает по фазе с током, то есть их максимальные значения и моменты перехода через ноль совпадают (рис.1). Если **мгновенное значение тока**

задаётся выражением  $i(t) = I_A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , то **мгновенное значение напряжения** будет иметь вид  $U_R(t) = U_A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , где  $\varphi_0$  – начальная фаза. В комплексном виде для тока  $\dot{I} = I_A e^{j\varphi}$ , для напряжения  $\dot{U} = U_A e^{j\varphi}$ .

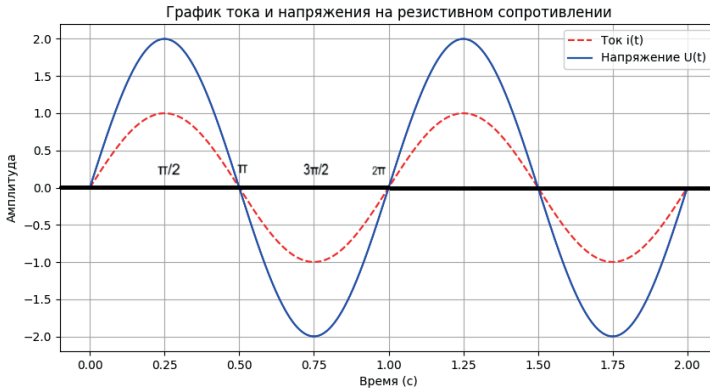


Рис.1

Индуктивность  $L$ , измеряемая в генри (Гн), характеризует свойство участка цепи или катушки накапливать энергию магнитного поля. В реальной цепи индуктивностью обладают не только индуктивные катушки как элементы цепи, предназначенные для использования их индуктивности, но и провода, и выводы конденсаторов, и реостаты. В целях упрощения обычно считают, что энергия магнитного поля сосредотачивается только в катушках.

При протекании переменного тока  $i(t)$  через катушку индуктивности, состоящей из  $w$  витков, возбуждается переменный магнитный поток  $\Phi(t)$ , который в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в ней же ЭДС самоиндукции  $e_L = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} = L \cdot di/dt$ . Следовательно, индуктивность в цепи переменного тока влияет на величину протекающего тока как сопротивление. Соответствующая расчетная величина называется индуктивным сопротивлением и обозначается  $X_L$  и измеряется так же, как и активное сопротивление - в Омах.

Чем выше частота переменного тока, тем больше ЭДС самоиндукции и тем больше индуктивное сопротивление  $X_L = \omega L = 2\pi fL$ .

В цепи постоянного тока в установившемся режиме индуктивность не влияет на режим работы цепи, так как ЭДС самоиндукции равна нулю.

Поскольку ЭДС самоиндукции возникает только при изменении тока, то и максимальные значения ЭДС наступают при максимальной скорости изменения тока в катушке, то есть при прохождении тока через нуль. Поэтому

на участке цепи с индуктивностью ЭДС самоиндукции по времени отстает от тока на четверть периода или на  $\pi/2$  электрических радиан(а). **Напряжение на индуктивности**, будучи противоположным ЭДС, наоборот, **опережает ток на четверть периода или на  $\pi/2$  электрических радиан(а)** (рис.2). Если по катушке проходит ток, мгновенное значение которого  $i(t) = i_A \sin(2\pi ft)$ , то мгновенное значение напряжения на индуктивности:

$$U_L(t) = U_A \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) = X_L I_A \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right)$$

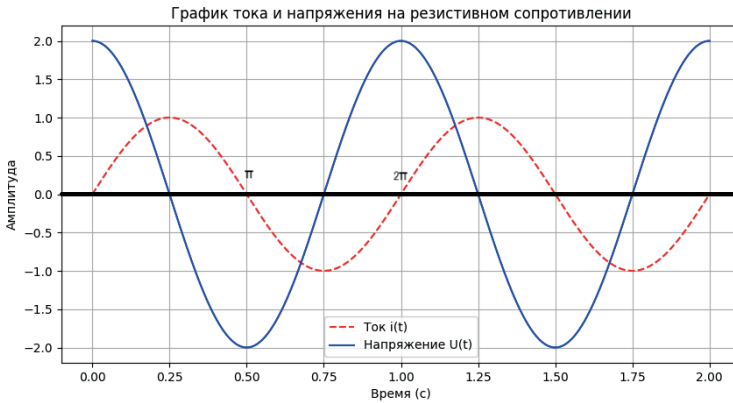


Рис.2

Когда напряжение, изменяясь синусоидально, достигает максимума, ток в это мгновение равен нулю. Если напряжение на зажимах элемента цепи опережает ток на  $\pi/2$  радиана, то говорят, что такой элемент представляет собой идеальную катушку индуктивности или чисто реактивное индуктивное сопротивление  $X_L$ . Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение магнитного поля в индуктивности и является линейной функцией частоты.

При включении в цепь переменного тока реальной катушки (рис. 3), обладающей кроме индуктивности  $L$  и некоторым значением активного сопротивления  $R$ , ток отстает по фазе от напряжения на некоторый угол  $\varphi < \pi/2$ , который легко определяется из треугольника сопротивлений (рис. 5):  $\tan \varphi = X_L/R$ . Для такого участка электрической цепи уравнение на основании второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$U = U_{RL} + U_{XL} = Ri + Ldi/dt$$

В напряжении, подведенном к реальной катушке, условно можно выделить две составляющих: падение напряжения  $U_{RL} = R_L i$  на активном

сопротивлении, обычно называемое активной составляющей приложенного напряжения, и напряжение на идеальной индуктивности  $U_{XL} = L di/dt$ , называемое реактивной составляющей приложенного напряжения. Энергия магнитного поля, запасаемая в катушке при возрастании тока,  $W = Li_L^2/2$ .

Фазовые соотношения между этими составляющими, приложенным напряжением и протекаемым током обычно иллюстрируются векторной диаграммой для их действующих значений (рис.4)

Из векторной диаграммы видно, что

$$U = \sqrt{U_{RL}^2 + U_{XL}^2} = \sqrt{I^2 R_L^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = I \cdot Z_L,$$

где  $Z_L = \frac{U_A}{I_A} = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$  - полное электрическое сопротивление реальной катушки. Из треугольника сопротивлений (рис. 5) следует, что  $R_L = Z_L \cos \varphi$ ,  $X_L = Z_L \sin \varphi$ ,  $\varphi = \arctg(\frac{X_L}{R_L})$

Закон Ома для цепи, по которой протекает переменный ток, записывается в виде  $I = U/Z$ .

Из рассмотренного следует важный вывод: **сопротивления в цепи переменного тока складываются в общем случае геометрически.** Например, если у катушки  $R_L = 3$  Ома и  $X_L = 4$  Ома, то  $Z_L = 5$  Ом.

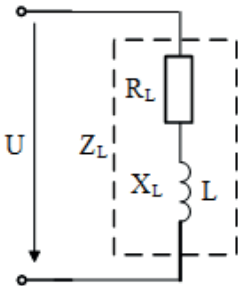


Рис.3

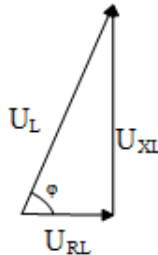


Рис.4

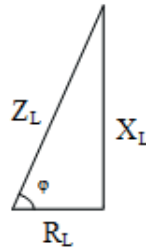


Рис.5

Емкость, измеряемая в фарадах (Ф), характеризует способность элемента электрической цепи или конденсатора накапливать энергию электрического поля. В реальной цепи емкость существует не только в конденсаторах, как элементах, предназначенных специально для использования их емкости, но и между проводниками, между витками катушек (межвитковая емкость), между проводом и землей или каркасом электротехнического устройства. Однако в схемах замещения принято, что емкостью обладают только конденсаторы.



В конденсаторе, точнее в диэлектрике, разделяющем пластины или проводники конденсатора, может существовать ток электрического смещения, в точности равный току проводимости в проводниках, присоединенных к обкладкам конденсатора:  $i = dq/dt$ , где  $q$  - заряд на обкладках конденсатора, измеряемый в кулонах и пропорциональный напряжению на конденсаторе  $U_c$ :

$$q = CU_c \text{ и при } C = \text{const } dq = CdU_c.$$

Тогда ток, проходящий через конденсатор,  $i = CdU_c/dt$ , а энергия электрического поля, запасаемая в конденсаторе при возрастании напряжения,  $W = CU_c^2/2$

Очевидно, что при постоянном напряжении  $dU_c/dt = 0$  и постоянный ток через конденсатор проходить не может.

При изменении напряжения на обкладках конденсатора через него протекает емкостной ток. Чем быстрее изменяется напряжение, тем больше емкостной ток. Если приложить к конденсатору переменное синусоидальное напряжение, то через конденсатор потечет переменный синусоидальный ток, сдвинутый по фазе на  $\pi/2$  по отношению к напряжению. Это происходит потому, что емкостной ток достигает максимального значения при максимальном изменении напряжения, т.е. при прохождении напряжения через нуль. **Ток при этом опережает напряжение по фазе на  $\pi/2$**  (рис.6).

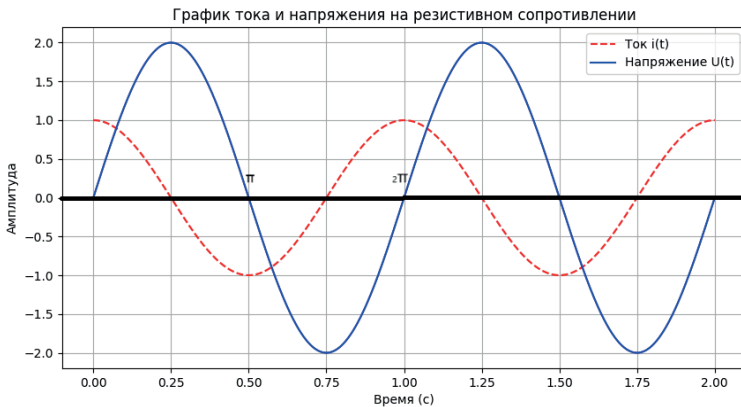


Рис.6

Если мгновенное значение тока, протекаемого через конденсатор  $i(t) = I_M \sin(2\pi ft)$ , то мгновенное значение напряжения на нем

$$U_c(t) = U_A \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right) = X_C I_A \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $X_C$  - реактивное емкостное сопротивление. Векторная диаграмма для участка электрической цепи, содержащей конденсатор, изображена на рис. 7.

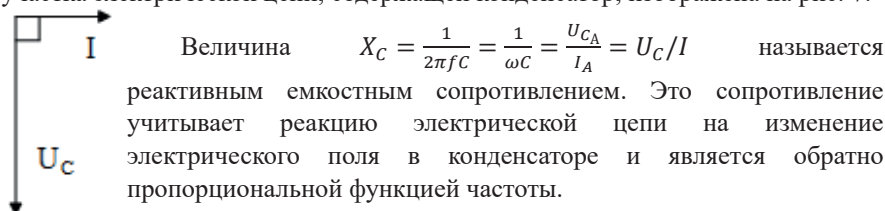


Рис.7 Закон Ома для участка электрической цепи с конденсатором  $I = U_C/X_C$ , где  $I$  - действующее значение тока, протекаемого через конденсатор,  $U_C$  - действующее значение напряжения на конденсаторе.

Электрическая цепь переменного тока характеризуется активной, реактивной и полной мощностью.

**Активная мощность  $P$** , измеряемая в ваттах (Вт), равна произведению действующего значения напряжения  $U$  на действующее значение ток  $I$  и на  $\cos\varphi$ , называемый **коэффициентом мощности**, или произведению квадрата действующего значения тока на активное сопротивление:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R$$

**Реактивная мощность  $Q$** , измеряемая в вольт-амперах реактивных (Вар), равна произведению действующего значения напряжения  $U$  на действующее значение тока  $I$  и на  $\sin\varphi$  или произведению квадрата действующего значения тока на реактивное сопротивление:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X$$

**Полная мощность  $S$** , измеряемая в вольт-амперах (ВА), равна произведению действующего значения тока  $I$  на действующее значение напряжения  $U$ :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Соотношения этих мощностей иллюстрируются треугольником мощностей (рис. 8).

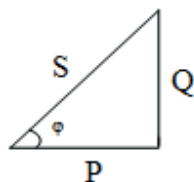


Рис.8

### 3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль ввода-вывода, Функциональный генератор, измеритель мощности, набор минимодулей, наборное поле).

3.2. Собрать электрическую цепь для исследования цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление  $R$  (рис. 9). Для измерения тока использовать вход 5 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26). Для



Запустить программу NI Max. Выбрать вкладку NI-DAQmx и открыть приложение Voltage\_Current (рис.10). Зарисовать осциллограммы напряжения и тока. На осциллограммах показать сдвиг по фазе между напряжением и током в данной цепи. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп».

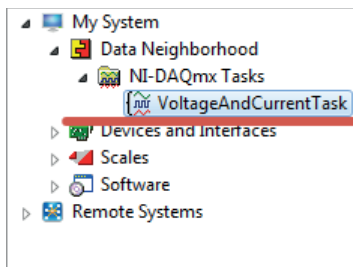


Рис.10

3.5. Собрать электрическую цепь для исследования цепи переменного тока, содержащей только реальную индуктивность (рис. 11). Представить схему для проверки преподавателю.

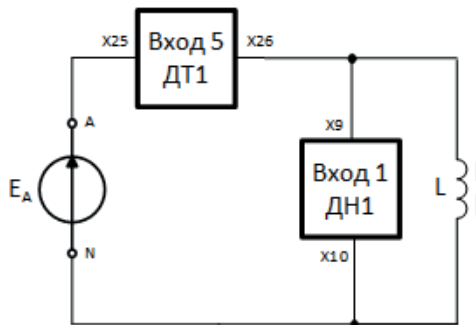


Рис.11

3.6. В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «работы». Одинарный щелчок левой кнопкой мыши меню, в котором надо выбрать раздел «Электрические цепи - мини». В появившемся списке работ выбрать «Работа 2-1. Простейшие цепи переменного тока». В появившемся списке выбрать «Цепь с индуктивностью»

На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

На модуле Функционального генератора включить источник переменного синусоидального напряжения до 10V и записать в табл. 1 показания виртуальных приборов.

Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп». Запустить программу NI Max (рис.9). Выбрать вкладку NI-DA Qmx и открыть программу Voltage\_Current. Зарисовать осциллограммы напряжения и тока. На осциллограммах показать сдвиг по фазе между напряжением и током в данной цепи. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп».

3.7. Собрать электрическую цепь для исследования цепи переменного тока, содержащей только конденсатор (рис. 12).

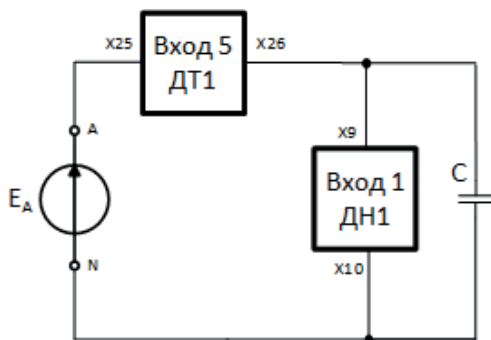


Рис.12

Представить схему для проверки преподавателю.

3.8. В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «Работы». Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел «Электрические цепи - мини». В появившемся списке работ выбрать «Работа 2-1. Простейшие цепи переменного тока». В появившемся списке выбрать «Цепь с емкостью». На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте. Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5. Записать в табл. 1 показания виртуальных приборов. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп».

Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп». Запустить программу NI Max (рис.9). Выбрать вкладку NI-DA Qmx и открыть программу Voltage\_Current. Зарисовать осциллограммы напряжения и тока. На осциллограммах показать сдвиг по фазе между напряжением и током в данной цепи. Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп».

В конце лабораторной работы выключить питание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания).

3.9. По результатам измерений рассчитать, используя закон Ома, полное сопротивление каждого потребителя, его активное и реактивное сопротивления. Результаты занести в табл. 1.

3.10. Учитывая частоту переменного напряжения  $f$ , определить величину индуктивности индуктивного потребителя  $L$  и емкости конденсатора.

#### **4. Содержание отчета**

1. Написать наименование и цель работы.
2. Нарисовать все схемы с осциллограммами под каждой и таблицы с полученными экспериментальными и расчетными данными.
3. Написать необходимые расчеты
4. Нарисовать треугольники сопротивлений для цепи с каждым элементом.
5. Написать вывод по работе

#### **5. Контрольные вопросы**

1. Что такое амплитудное и действующее значения напряжения/тока?
2. Что такое частота и период колебаний тока и как они соотносятся?
3. Что такое «полное» и «активное сопротивление»
4. Как ведёт себя катушка в цепи переменного тока и что такое «реактивное индуктивное сопротивление»? В чем отличие идеальной катушки от реальной?
5. Как ведёт себя конденсатор в цепи переменного тока и что такое «реактивное ёмкостное сопротивление»?

### **Работа № 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

#### **1. Цель работы**

Приобретение навыков сборки простых электрических цепей и измерения напряжений на отдельных участках цепи, изучение свойств цепей при последовательном соединении активных и реактивных элементов, знакомство с явлением резонанса напряжений, построение векторных диаграмм.

#### **2. Пояснения к работе**

Электрическая цепь синусоидального переменного тока с последовательным соединением резистора с активным сопротивлением  $R$ , реальной катушки индуктивности с полным сопротивлением  $Z_L$  ( $R_L + X_L$ ) и конденсатора с ёмкостным сопротивлением  $X_C$  (рис. 1) описывается уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на этих элементах:

$$U_R + U_L + U_C = U(t)$$

или в геометрической форме для векторов действующих значений этих напряжений

$$\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C = \bar{U}$$

Последнее соотношение говорит о том, что вектор действующего значения напряжения, приложенного к такой цепи, равен геометрической сумме векторов напряжений на отдельных её участках (рис. 2).

Из анализа векторной диаграммы для такой цепи следует, что величина входного напряжения  $U$

$$U = \sqrt{(U_R + U_{RL})^2 + (U_{XL} - U_C)^2} = \sqrt{(IR + IR_L)^2 - (IX_L - IX_C)^2} = I \sqrt{(R + R_L)^2 - (X_L - X_C)^2},$$

где  $U_{RL}$ ,  $U_L$  - соответственно активная и реактивная составляющие напряжения на катушке,  $R_L$ ,  $X_L$  - активное и реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивности. Следовательно, комплексное (полное) значение сопротивления в этой цепи на основании закона Ома можно определить как

$Z = U/I$  или  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  - полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки индуктивности и конденсатора (рис.3). Тогда активное сопротивление цепи определяем  $R = Z \cos(\varphi)$ , а реактивное  $X = Z \sin(\varphi)$

Угол сдвига фаз между входным синусоидальным напряжением  $\dot{U}$  и потребляемым такой цепью током  $\dot{I}$  определяется из треугольника напряжений (рис.2):

$$\varphi = \arctg((U_{XL} - U_C)/(U_R + U_{RL}))$$

Активное напряжение катушки  $U_{RL} = IR_L$ , а  $U_{XL} = \sqrt{U_L^2 - U_{RL}^2}$  - реактивное напряжение катушки.

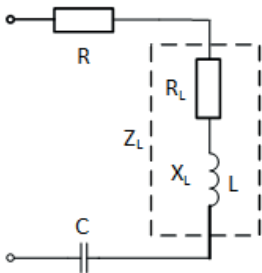


Рис.1

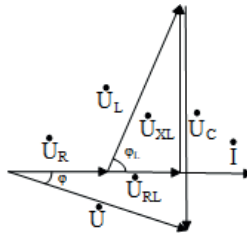


Рис.2

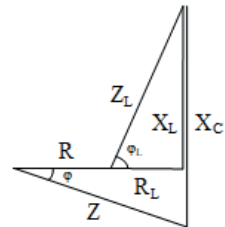


Рис.3

Если  $\omega L > 1/\omega C$  и угол  $\varphi > 0$ , вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и идеальной индуктивностью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-индуктивный характер.

Если  $\omega L < 1/\omega C$  и угол  $\varphi < 0$ , вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и емкостью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-емкостной характер.

Если в цепи **реактивные сопротивления равны** ( $X_L = X_C$  или  $\omega L = 1/\omega C$ ), то угол  $\varphi = 0$ .

При этом реактивная составляющая напряжения на индуктивности и напряжение на конденсаторе полностью себя компенсируют. Цепь ведет себя, как будто реактивные сопротивления в ней отсутствуют и ток достигает наибольшего значения, поскольку ток ограничивается только эквивалентным **активным** сопротивлением цепи  $R_3 = R + R_L$ .

Это означает, что в цепи имеет место резонанс, называемый в данном случае **резонансом напряжений**. Резонанс напряжений можно получить изменением частоты источника питания или изменением параметров реактивных элементов, например, подбором значения величины емкости, или индуктивности. Таким образом резонанс напряжений возникает, когда частота источника питания совпадает с резонансной частотой цепи.

Так как  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , то  $\omega^2 LC = 1$ , отсюда  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ , где  $\omega_0$  - **резонансная частота цепи**.

**Волновое сопротивление**  $\rho = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{L/C}$  - численно равно индуктивному или емкостному сопротивлению цепи на резонансной частоте.

**Добротность контура**  $Q = \frac{U_{Cp}}{U} = \frac{U_{Lp}}{U} = \frac{I\omega_0 L}{IR} = \frac{L}{R\sqrt{LC}}$  или  $\frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R}$  - отношение напряжения на зажимах реактивных элементов к входному напряжению цепи или отношение волнового сопротивления к активному сопротивлению контура, где

$U_{Cp}$  – напряжение на конденсаторе при резонансе,

$U_{Lp}$  – напряжение на катушке при резонансе

### 3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль ввода-вывода, набор минимодулей, наборное поле).

3.2. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением элементов, установив минимодули резистора, батареи конденсаторов и дросселя  $L_1$ , используемого в качестве индуктивного потребителя  $Z_L$  (рис. 4).



Подключить собранную цепь к функциональному генератору. Задать частоту  $f$  согласно своему варианту. Для измерения тока использовать вход 5 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26). Для измерения напряжений  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  и  $U$  использовать входы 1, 2, 3, 4 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10, X11 и X12, X13 и X14, X15 и X16, соответственно). Представить схему для проверки преподавателю.

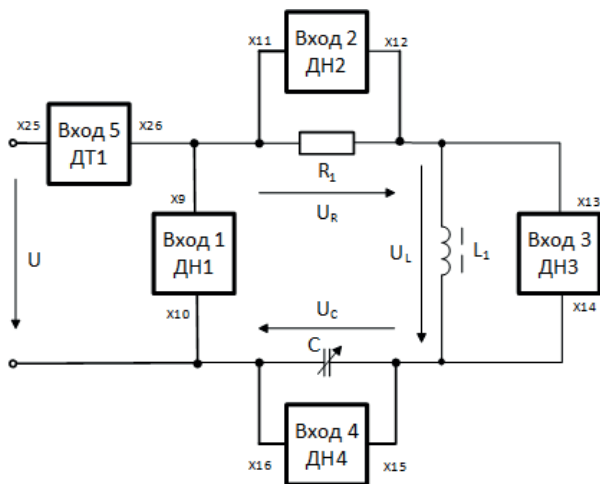


Рис.4

3.3. Загрузить программу автоматического управления Delta Profi. В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню «Работы».

Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел «Электрические цепи - мини».

В появившемся списке работ выбрать «Работа 2-2. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов». На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

3.4. Подсоединить параллельно конденсатору дополнительный проводник (исключив этим конденсатор из цепи). Предъявить схему для проверки.

3.5. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания, который выключается только в конце лабораторной работы) и модуля ввод-вывод.

На модуле функционального генератора включить режим переменного синусоидального напряжения в пределах до 10В.

Произвести измерения указанных в таблице величин в цепи с последовательным соединением резистора  $R$  и катушки  $Z_L$ . Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Схема	U(B)	I (мА)	Ur(B)	UL(B)	Uc(B)
а) $R, Z_L$					
б) $R, X_c$					
в) $R, Z_L, X_{c1}$					
г) $R, Z_L, X_{c2}$					
д) $R, Z_L, X_{c3}$					

А) с замкнутым конденсатором

Б) с замкнутой катушкой (значение конденсатора узнать у преподавателя)

В) с включённым конденсатором и катушкой добиться максимального тока в цепи (резонанс)

Г) значения с уменьшенной ёмкостью конденсатора относительно резонанса

Д) значения с увеличенной емкостью конденсатора относительно резонанса

Выключить функциональный генератор, убрать дополнительный проводник, подключенный к конденсатору. Подсоединить параллельно индуктивному потребителю дополнительный проводник (исключив этим его из цепи). Установить заданное преподавателем значение емкости батареи конденсаторов. Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.6. Включить функциональный генератор. Произвести измерения указанных в таблице величин для цепи с последовательным соединением резистора  $R$  и конденсатора  $X_C$ . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить функциональный генератор, убрать дополнительный проводник.

3.7. Включить функциональный генератор. Изменяя величину емкости батареи конденсаторов, добиться наибольшего показания амперметра, т.е. обеспечить состояние цепи близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.8. Уменьшая и увеличивая величину емкости батареи конденсаторов (от резонансного значения емкости) провести измерения указанных в таблице величин для двух состояний цепи. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить функциональный генератор.

3.9. Для цепи с последовательным соединением трех элементов ( $R, Z_L, C$ ) по результатам измерений рассчитать:

полную мощность цепи  $S = UI$ , активную мощность резистора  $P_R = U_R \cdot I$ , активную мощность катушки  $P_L = I^2 \cdot R_L$  (сопротивление катушки  $R_L$  измерить мультиметром) и всей цепи  $P = S \cos(\varphi)$ , реактивную мощность цепи  $Q = S \sin(\varphi)$ , коэффициент мощности цепи  $\cos \varphi$  и угол сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением на входе цепи и током, а также полное  $Z_3$ , активное  $R_3$  и реактивное  $X_3$  сопротивления всей цепи. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

$S$ (ВА)	$P_R$ (Вт)	$P_L$ (Вт)	$P$ (Вт)	$Q$ (ВАР)	$\cos \varphi$	$\varphi^\circ$	$Z_3$ (Ом)	$R_3$ (Ом)	$X_3$ (Ом)

### Методика расчета:

- Находим активную составляющую напряжения катушки:

$$U_{RL} = I \cdot R_L$$

- Находим реактивную составляющую напряжения катушки:

$$U_{XL} = \sqrt{U_L^2 - U_{RL}^2}$$

- Находим реактивную составляющую всей цепи:

$$U_X = U_{XL} - U_C$$

- Определяем угол  $\varphi^\circ$  всей цепи

$$\varphi = \arctg \left( \frac{U_X}{U_R + U_{RL}} \right)$$

- Определить полную мощность  $S$  и полное сопротивление  $Z$  всей цепи:

$$S = U \cdot I; Z = U/I$$

- Зная полную мощность  $S$ , полное сопротивление  $Z$  и угол  $\varphi$  цепи, определить активные и реактивные составляющие этих параметров.

- Найти значение для коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

3.10. По результатам измерений построить для исследованных цепей (схема в, г, д) в масштабе векторные диаграммы и сделать вывод о характере каждой исследованной цепи.

#### 4. Содержание отчета

1. Написать наименование и цель работы.
2. Нарисовать схему
3. Сделать необходимые расчеты и заполнить таблицы 1,2.
4. Построить для исследованных цепей векторные диаграммы напряжений (режимы в, г, д) в масштабе.
5. Написать вывод по работе

#### 5. Контрольные вопросы

1. Что такое активная, реактивная и полная мощности в цепи переменного тока?
2. Что такое коэффициент мощности?
3. Что такое «резонанс напряжений» и при каких условиях он возникает?
4. Каким образом можно получить резонанс напряжений?
5. Чему равно реактивное сопротивление цепи и реактивная мощность при резонансе?
6. В каком случае исследуемая цепь будет носить активно-индуктивный характер, и в каком – активно-ёмкостной?
7. От чего зависит угол сдвига фаз между напряжением и током на участке электрической цепи переменного тока?

### Работа №5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

#### 1. Цель работы

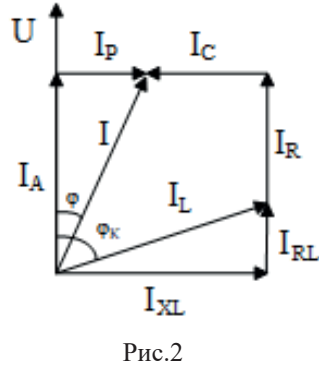
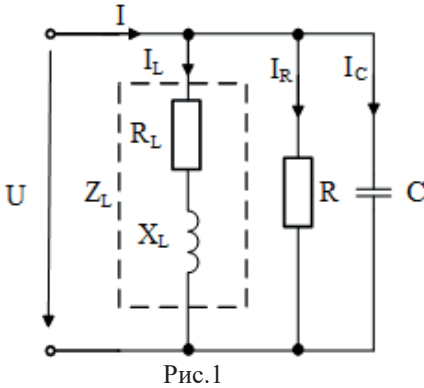
Ознакомиться с особенностями режимов работы цепи с параллельным соединением активных и реактивных элементов, явлением резонанса токов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

#### 2. Пояснения к работе

При параллельном соединении элементов получают разветвленную электрическую цепь (рис. 1). При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях зависят от величины приложенного напряжения и полного сопротивления каждой ветви.

При этом ток в ветви с резистором  $I_R$  совпадает по фазе с напряжением, ток в ветви с индуктивной катушкой  $I_L$  отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi$ , зависящий от активного ( $R_L$ ) и реактивного сопротивления ( $X_L$ ) реальной катушки индуктивности.

Ток реальной катушки включает в себя активную и реактивную составляющие  $I_L = \sqrt{I_{RL}^2 + I_{XL}^2}$ . Косинус угла  $\varphi$  катушки можно определить как отношение активного сопротивления катушки к полному  $\cos \varphi = \frac{R_K}{Z_K}$ .



Ток в ветви с конденсатором  $I_C$  опережает напряжение на  $90^\circ$ . В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток  $I$ , потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей:

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C$$

Геометрическое построение для определения величины и фазы общего тока представлено на рис. 2, где обозначено:

$I_{RL}, I_A$  - активные составляющие тока в ветви с индуктивной катушкой и общего тока;

$I_{XL}, I_P$  - реактивные составляющие тока в ветви с индуктивной катушкой и общего тока.

Под активной составляющей тока понимают составляющую тока, совпадающую по фазе с приложенным напряжением. Под реактивной составляющей тока - составляющую, расположенную под  $90^\circ$  к приложенному напряжению. Следует помнить, что активная и реактивная составляющие тока - это условные величины, не имеющие физического смысла в последовательной схеме замещения, но удобные для расчетов.

Из векторной диаграммы следует, что  $I_A = I_R + I_{RL}$ ,  $I_P = I_{XL} - I_C$ .

Следовательно, величина общего тока  $I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2}$ . Из этой формулы так же можно выразить активный ток:  $I_A = \sqrt{I^2 - I_P^2}$ .

Угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_P}{I_A} = (I_{XL} - I_C) / (I_R + I_{RL})$$

Данная векторная диаграмма (рис.2) построена в предположении, что емкостной ток  $I_C$  меньше реактивной индуктивной составляющей тока  $I_{XL}$  в катушке. Поэтому общий ток отстает по фазе от напряжения. Такая цепь носит

активно-индуктивный характер. Если бы емкостной ток  $I_C$  был больше реактивной индуктивной составляющей тока  $I_{XL}$  в катушке, то ток, потребляемый цепью из сети опережал по фазе приложенное напряжение и цепь носила бы активно-емкостной характер.

При равенстве реактивной и индуктивной составляющей тока в катушке  $I_{XL}$  и емкостного тока  $I_C$  вектор общего тока совпадает по фазе с вектором приложенного напряжения, а его величина определяется только **активными** составляющими токов  $I_A = I_R + I_{RL}$ . Т.е. реактивные сопротивления равны  $X_L = X_C$ , а значит и равны проводимости, но находятся в противофазе. При этом в цепи наступает явление **резонанса токов**, так как цепь, содержащая реактивные элементы, ведет себя как цепь с чисто активной проводимостью. При резонансе токов токи в ветвях с реактивными элементами могут значительно превышать ток, потребляемый от источника питания, а общий ток в цепи уменьшится.

### 3. Порядок выполнения работы:

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль ввода-вывода, набор минимодулей).

3.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора R, индуктивного потребителя и батареи конденсаторов C (рис. 3).

Установить в заданную преподавателем позицию переключатель батареи конденсаторов C. В качестве индуктивного потребителя  $Z_K$  использовать дроссель  $L_L$ .

Для измерения тока использовать входы 5, 6, 7, 8 модуля ввода-вывода (гнезда X25 и X26, X27 и X28, X29 и X30, X31 и X32. соответственно). Для измерения напряжения  $U$  использовать вход 1 модуля ввода-вывода на пределе 30 В (гнезда X9 и X10). Предоставить схему для проверки преподавателю.

#### 3.3 Загрузить программу автоматического управления Delta Profi.

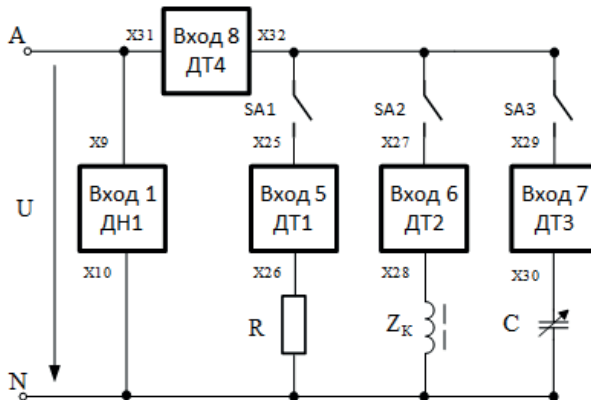


Рис.3

В левом верхнем углу в окне программы выбрать меню **«Работы»**. Одинарный щелчок левой кнопкой мыши приводит к появлению контекстного меню, в котором надо выбрать раздел **«Электрические цепи и основы электроники»**.

В появившемся списке работ выбрать **«Работа № 2-3. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов»**. На экране ПК отображается электрическая схема и набор виртуальных измерительных приборов, необходимых в данном эксперименте.

Запустить программу в работу, нажатием кнопки **«Пуск»** или командой главного меню **«Управление - Пуск»** или горячей клавишей **F5**.

3.4. Изучить работу электрической цепи при параллельном соединении потребителей.

Включить электропитание стенда (автоматический выключатель **QF** модуля питания, который выключается только в конце лабораторной работы) и модуля **ввод-вывод**.

На модуле **функционального генератора** включить режим переменного синусоидального напряжения в пределах до 10В (значение напряжения и частоты узнать у преподавателя).

Измерить на мультиметре активное сопротивление катушки индуктивности. Поочередно подключая тумблерами соответствующие ветви, измерить напряжение и токи во включенных ветвях, а также ток, потребляемый от источника питания (таблица 1 - схема 1,2,3). Подключить с помощью тумблеров все ветви и измерить напряжение и токи в ветвях, а также ток, потребляемый от источника питания (таблица 1 – схема 4). Блок конденсаторов переключить в положение 6. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.5. Исследовать влияние емкости  $C$ , включенной параллельно индуктивному потребителю  $Z_L$ , на коэффициент мощности цепи и величину тока  $I$ , потребляемого от источника питания. Для этого разомкнуть ветвь с резистором  $R$  и установить такое значение емкости батареи конденсаторов, при которой от источника потребляется минимальный ток (состояние, близкое к резонансу токов) (таблица 1 – схема 5). Измерить при этом токи в ветвях и ток, потребляемый из сети. Результаты занести в табл. 1

Изменить значение емкости конденсатора в сторону увеличения и уменьшения емкости и снова измерить токи и напряжение (таблица 1 – схема 5, 6). Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Схема		Измерено					Вычислено					
		U(B)	I (mA)	I <sub>R</sub> (mA)	I <sub>L</sub> (mA)	I <sub>C</sub> (mA)	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	$\varphi$ град	Z	X	R
1	R											
2	C											
3	Z <sub>K</sub>											
4	R, Z <sub>K</sub> , C											
5	Z <sub>K</sub> , C1											
6	Z <sub>K</sub> , C2											
7	Z <sub>K</sub> , C3											

Выключить модуль функционального генератора.

Остановить программу, нажатием кнопки **«Стоп»** или командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей **F6**.

В конце лабораторной работы выключить питание модуля **ввод-вывод** и стенда (автоматический выключатель **QF** модуля питания).

### 3.7. Сделать выводы

- о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга
- о влиянии конденсатора, подключенного параллельно индуктивному потребителю, на величину тока, потребляемого из сети и коэффициент мощности цепи;
- о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока;

## 4. Содержание отчета:

1. Написать наименование и цель работы.
2. Нарисовать схему
3. Сделать необходимые расчеты и заполнить таблицу.
5. Нарисовать векторную диаграмму токов для случаев схем 5,6 и 7.
6. Написать вывод по работе

## 5. Контрольные вопросы

1. Что такое «резонанс токов»? При каких условиях он возникает?
2. Как изменяется величина тока, потребляемого из сети и активная мощность цепи, если параллельно активно-индуктивному потребителю включить конденсатор?
3. Почему уменьшается ток, потребляемый из сети, при подключении параллельно индуктивной катушке конденсатора?
4. Как применяется 1-й закон Кирхгофа в цепях переменного тока?