

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

**Кафедра «ТОЭ и ОЭ»**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Теоретические основы электротехники», часть I  
для студентов энергетических специальностей**

**Бишкек 2018 г.**

«Рассмотрено»  
и одобрено на заседании  
кафедры «ТОЭ и ОЭ»  
пр. №5 от 29.01.2018г.

«Рекомендовано»  
к изданию методической комиссией  
энергетического факультета  
пр.№7 от 19.03.2018 г.

Составители: к.т.н., доцент Э.Б. Исакеева, к.т.н., доцент Асанова С.М.  
к.т.н. Арфан Аль Хакам, ст.препод Самсалиева Р.Ж.

УДК 621.311

Теоретические основы электротехники: Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «ТОЭ», часть I для студентов энергетических специальностей КТУ им. И. Раззакова, Бишкек, 2018. –55 с.

Излагается методика выполнения лабораторных работ, даны схемы установок, краткие теоретические сведения по физическим процессам, наблюдаемым в электрических цепях, глоссарий.

Предназначены для студентов дневной и дистанционной форм обучения.

Рецензент к.т.н., доцент Сатаркулов К.А.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр
Правила техники безопасности и правила работы в лабораториях кафедры.....	4
Порядок выполнения лабораторных работ.....	5
<b>Лабораторная работа 1.</b> Исследование активного 2-х полюсника и линии электропередачи постоянного тока.....	6
<b>Лабораторная работа 2.</b> Опытная проверка законов Кирхгофа и Ома...	10
<b>Лабораторная работа 3.</b> Принцип наложения. Потенциальная диаграмма.....	14
<b>Лабораторная работа 4.</b> Пассивный двухполюсник в цепи синусоидального тока и простейшие векторные диаграммы.....	18
<b>Лабораторная работа 5.</b> Исследование неразветвленных цепей переменного тока. Резонанс напряжений.....	26
<b>Лабораторная работа 6.</b> Исследование разветвленной электрической цепи синусоидального тока. Резонанс токов.....	31
<b>Лабораторная работа 7.</b> Электрические цепи со взаимной индуктивностью. Воздушный трансформатор.....	35
<b>Глоссарий</b> .....	41

## ***ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ***

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.

2. Напряжения источников, используемые в лаборатории, являются опасными для жизни, поэтому при работе в лаборатории необходимо быть предельно собранным, внимательным и строго выполнять правила работы на универсальных лабораторных стендах.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в том, что все элементы стенда не находятся под напряжением, а рабочее место освобождено от посторонних предметов.

4. Сборку электрической цепи рекомендуется производить в следующей последовательности: в первую очередь следует собирать токовые цепи, а затем - цепи напряжения. Рекомендуется избегать излишнего перекрещивания проводов на рабочем столе и соединений нескольких проводов в одной точке.

5. Прежде чем включить источник питания, необходимо его регулятор вывести в нулевое положение, а на регулируемых элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивностей) установить заданные значения параметров.

6. Включение цепи под напряжение можно производить только с разрешения руководителя работ (преподавателя или лаборанта) после проверки правильности ее сборки.

7. Любые изменения в структуре цепи можно производить только при отключенном источнике питания. Повторное включение цепи под напряжение производится с разрешения руководителя работ.

8. При выполнении экспериментальной части работы нельзя прикасаться к открытым токоведущим элементам цепи, а также к трубам и радиаторам отопительной системы.

9. После завершения экспериментальных исследований результаты работы должны быть предъявлены руководителю для их проверки и утверждения.

10. Запрещается выполнение лабораторных работ при отсутствии преподавателя или лаборанта.

11. При обнаружении на рабочем месте неисправностей, способных вызвать поражение электрическим током, или порчу оборудования, следует немедленно отключить источник питания и поставить в известность преподавателя или лаборанта.

12. При несчастном случае следует немедленно отключить источник питания, поставить в известность руководителя работ и принять меры по оказанию первой медицинской помощи пострадавшему.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Выполнение лабораторной работы предполагается в два этапа.

**Первый этап (подготовительный)** выполняется заранее во время, предусмотренное для самостоятельной работы. На этом этапе студент обязан:

- 1) уяснить цель и содержание работы;
- 2) изучить теоретический материал по учебнику или конспекту;
- 3) оформить расчетную часть отчета по работе, а именно, заполнить титульный лист, зарисовать схемы цепей и таблицы.

Без подготовленного отчета по расчетной части студент не допускается к выполнению экспериментальной части работы.

**Второй этап работы (экспериментальная часть и анализ результатов)** выполняется непосредственно на рабочем месте в учебной лаборатории во время занятий по расписанию. Получив разрешение от руководителя работ на выполнение экспериментальной части, бригада студентов (2-3 человека) выполняет сборку исследуемой цепи и проводит в ней измерения физических величин согласно заданию. Результаты измерений обрабатываются и вносятся в соответствующие таблицы. При проведении экспериментов следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в электроустановках.

По окончании экспериментальных исследований проводится анализ результатов работы, экспериментальные результаты сопоставляются с расчетными, в письменной форме делается заключение по работе.

Полностью оформленный отчет по работе в конце текущего занятия предъявляется преподавателю для проверки и получения зачета по работе. При защите отчета студенту могут быть заданы контрольные вопросы по теоретической или экспериментальной части работы.

**Отчет по лабораторной работе оформляется** на отдельных листах или в отдельной тетради и должен содержать следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (эквивалентные схемы и параметры их элементов);
- 4) основные формулы и уравнения, применяемые в расчетах;
- 5) таблицы результатов расчетов и измерений;
- 6) предусмотренные заданием графические и векторные диаграммы;
- 7) выводы по работе.

Лабораторные работы по ТОЭ выполняются на универсальных стендах фронтальным методом, при котором вся группа студентов (до 30 человек) выполняет одно и то же задание. Наличие на стендах регулируемых элементов позволяет задавать каждой бригаде студентов (2-3 человека) свой индивидуальный вариант исходных данных к каждой работе.

Оборудование универсального стенда позволяет проводить комплексные исследования различных по структуре и параметрам электрических цепей и обеспечивает материальную базу для выполнения всех лабораторных работ по теоретическим основам электротехники.

## Лабораторная работа № 1

### Исследование активного 2-х полюсника и линии электропередачи постоянного тока.

#### 1. Цель работы

Исследование линии передачи постоянного тока с нагрузкой в конце линии. В результате выполнения работы студент должен изучить режимы работы электрической цепи, уметь рассчитать потерю напряжения и мощность потерь энергии в линии, КПД линии.

#### 2. Основные теоретические положения

При передаче электрической энергии постоянного тока от источника к

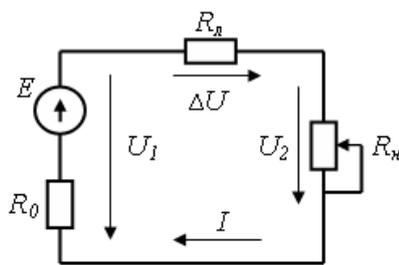


Рис. 1

приемнику по проводам достаточно большой протяженности происходит потеря напряжения на сопротивлении линии передачи. В схеме замещения на рис. 1 сопротивление  $R_l$  имитирует сопротивление проводов линии передачи,  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

Потеря напряжения равна

$$\Delta U = U_1 - U_2 = R_l I, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения в начале и в конце линии.

Мощность определяется формулой

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta UI = I^2 R_l, \quad (2)$$

где  $P_1$  – мощность источника или мощность в начале линии, которая равна

$$P_1 = U_1 I = (R_l + R_n) I^2, \quad (3)$$

$P_2$  – мощность потребления энергии нагрузкой или мощность в конце линии

$$P_2 = U_2 I = R I^2 = \frac{R U_1^2}{(R_l + R_n)^2} \quad (4)$$

$$\text{КПД} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_n I}{(R_l + R_n) I} = \frac{R_n}{R_l + R_n} \quad (5)$$

Чтобы повысить КПД линии передачи, нужно уменьшить мощность потерь энергии на линии. При условии постоянства мощности источника  $P_1$ , найдем из (3) ток в цепи и подставим в (2).

$$\Delta P = R_l I^2 = \frac{P_1^2 R_l}{U_1^2} \quad (6)$$

Очевидно, что для уменьшения величины  $\Delta P$  напряжение  $U_1$  в начале линии нужно увеличить. Поэтому при передаче электрической энергии на большие расстояния по линии электропередачи напряжение в начале линии должно быть повышено.

Режимы работы электрической цепи (рис.1) будут определять сопротивление нагрузки  $R_n$ . В режиме холостого хода тока в цепи нет, т.к.  $R \rightarrow \infty$  (цепь разомкнута), а в режиме короткого замыкания  $R=0$ . При согласованном режиме мощность потребления энергии приемником  $P_2$  должна быть максимальной. Это происходит при определенном согласовании параметров цепи.

Для определения величины сопротивления  $R_n$ , при котором мощность  $P_2$  будет максимальной, нужно выражение (4) продифференцировать по  $R_n$  и приравнять к нулю.

$$\frac{dP_2}{dR} = \frac{U_1^2}{(R_l + R_n)^2} - \frac{2U_1^2 R}{(R_l + R_n)^3} = \frac{U_1^2 (R_l + R_n - 2R_n)}{(R_l + R_n)^3} = \frac{U_1^2 (R_l - R_n)}{(R_l + R_n)^3}$$

Полученное выражение равно нулю, если  $R_l - R_n = 0$ , откуда

$$R_l = R_n \quad (7)$$

Таким образом, мощность потребления энергии приемником будет максимальной, когда сопротивление нагрузки  $R_n$  равно сопротивлению линии  $R_l$

$$P_2 = P_{2\max} = \frac{U_1^2}{4R} \quad (8)$$

При согласованном режиме мощность потерь равна

$$\Delta P = \Delta UI = \frac{U_1 I}{2} = \frac{P_1}{2} \quad (9)$$

а КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_n I}{(R_l + R_n) I} = \frac{R_n}{R_l + R_n} = \frac{R}{2R} = 0,5 \quad (10)$$

С энергетической точки зрения согласованный режим является нерациональным ( $\eta = 0,5$ ), но он находит применение там, где важно получить максимальную мощность, а низкий КПД имеет второстепенное значение из-за малых абсолютных значений мощности. Например, в некоторых радиотехнических устройствах, в автоматике и измерительной технике.

Характер зависимостей  $U_1, U_2, \Delta U, P_1, P_2, \eta$  от тока  $I$  представлен на рисунке 2.

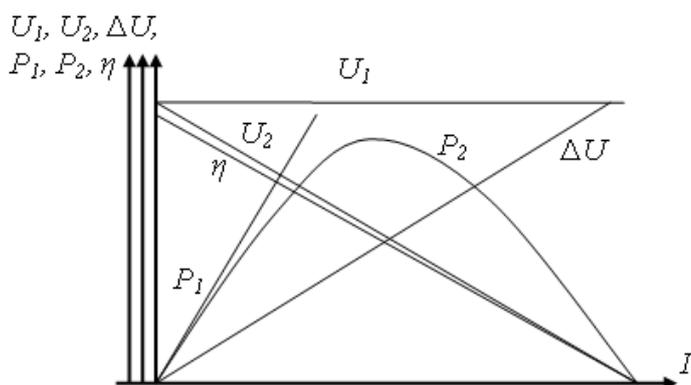


Рис. 2.

Напряжение, подаваемое на двухполюсник, т.е. напряжение в начале линии остается неизменным ( $U_1 = \text{const}$ ) при любом значении сопротивления нагрузки. При холостом ходе, когда  $R \rightarrow \infty$ , ток в линии равен нулю, потери напряжения  $\Delta U$  и мощности  $\Delta P$  также равны нулю, а КПД линии

$\eta = \frac{U_2}{U_1} = 1$ . При включении нагрузки  $R_n$  ток в линии будет зависеть от величины  $R_n$

$$I = \frac{U}{R_l + R_n}.$$

С уменьшением сопротивления  $R_n$  ток в линии будет увеличиваться, напряжение в конце линии  $U_2$  и КПД  $\eta$  уменьшаться, а мощность энергии, потребляемой нагрузкой будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, достигая своего наибольшего значения  $P_{2 \max}$  при согласованном режиме.

При коротком замыкании нагрузки, когда сопротивление равно нулю  $R=0$ , ток в линии достигает максимального значения  $I_{к.з} = \frac{U_1}{R_l}$ , тогда напряжение на зажимах нагрузки  $U_2$ , мощность  $P_2$  и КПД  $\eta$  будут равны нулю.

### 3. Описание лабораторной работы

Элементы электрической цепи и измерительные приборы для исследования линии передачи постоянного тока расположены на панели универсального стенда.

Питание цепи осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения 12В, который рассчитан на максимальный ток нагрузки 200mA.

Резистор  $R_1$ , используемый в работе, состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений. Первое, которое будет имитировать сопротивление линии передачи  $R_l$  – нерегулируемое, а второе, которое будет служить нагрузкой в конце линии передачи  $R_n$  – регулируемое сопротивление.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис.3)
2. Изменяя сопротивление нагрузки  $R_n$  от бесконечности до нуля, сделать 7-8 измерений напряжения  $U_1$  – в начале линии,  $U_2$  – в конце ее и тока  $I$ .
3. Рассчитать при какой нагрузке будет согласованный режим.
4. По полученным данным построить в масштабе зависимости  $U_1(I)$ ,  $U_2(I)$ ,  $P_1(I)$ ,  $P_2(I)$ ,  $\Delta U(I)$ ,  $\eta(I)$ .

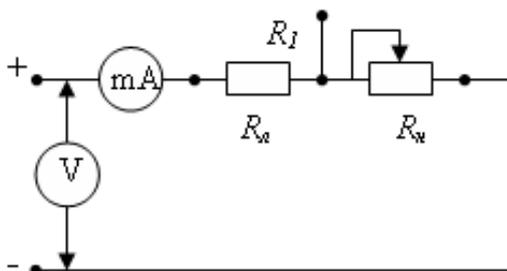


Рис. 3.

№	измерено			вычислено					
	$U_1$	$U_2$	$I$	$\Delta U$	$P_1$	$P_2$	$\Delta P$	$R_n$	$\eta$
	В	В	А	В	Вт	Вт	Вт	Ом	%

#### 5. Содержание отчета

В отчете приводится рабочая схема, заполненная таблица, графики, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

#### 6. Контрольные вопросы

1. Как уменьшить мощность потерь в проводах линии передачи постоянного тока при неизменной мощности источника?
2. Как увеличить КПД линии передачи?

3. Какой режим работы электротехнического устройства называется номинальным?
4. Какой режим работы электрической цепи называется согласованным?
5. Дать определение 2-х полюсника?
6. Начертить схему активного и пассивного 2-х полюсников, объяснить.
7. Сформулировать условие передачи по линии максимальной мощности и записать это условие.
8. Что называется электрическим током, в каких единицах он измеряется?
9. Что называется электрическим напряжением, в чем оно измеряется?
10. Что называется потенциалом, в каких единицах он измеряется?
11. Что называется падением напряжения, в чем оно измеряется?
12. Что такое положительное направление тока, напряжения и источника?  
Поясните свой ответ примером.

## **Лабораторная работа № 2**

### **Опытная проверка законов Кирхгофа и Ома.**

#### ***1. Цель работы***

Экспериментальная проверка законов Ома и Кирхгофа. Исследование соотношений между токами и напряжениями в простейших цепях постоянного тока.

#### ***2. Основные теоретические положения.***

Электрической цепью называют совокупность электрических устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии, электромагнитные процессы в которых описываются с помощью понятий об электрическом токе, напряжении и ЭДС.

Схемой электрической цепи называют графическое изображение электрической цепи, содержащее условное обозначение ее элементов и показывающее соединения этих элементов.

Для упрощения анализа процессов в реальной электрической цепи ее обычно представляют в виде математической модели, состоящей из идеальных элементов. Идеальный элемент отличается от реального тем, что обладает одним свойством, т.е. одним параметром.

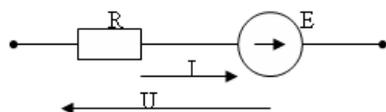


Рис.1.

Участок цепи, заключенный между двумя узлами, с последовательным соединением электрических элементов вдоль которого в любой

момент времени ток имеет одно и тоже значение, называют *ветвью*, а место соединения трех и более ветвей – *узлом*. Любой замкнутый путь, проходящий по участкам электрической цепи, называют *контуром*.

По закону Ома для участка цепи (рис.1) величина тока определяется выражением (1)

$$I = \frac{U + E}{R} \quad (1)$$

*Первый закон Кирхгофа:*  $\sum_k I_k = 0$ , алгебраическая сумма токов

ветвей, сходящихся в любом узле электрической схемы, равна нулю (рис.2). Этот закон является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в любом узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать. Принято, токи,

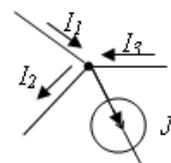


Рис.2

направленные к узлу записывать со знаком «+», а токи, направленные от узла, со знаком «-» (2). Число независимых уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа, на одно уравнение меньше числа узлов, т.е.  $(U-1)$ , где  $U$ - количество

узлов электрической схемы замещения.

$$I_1 - I_2 + I_3 - J = 0 \quad (2)$$

*Второй закон Кирхгофа:*  $\sum_k E_k = \sum_k I_k R_k$ ,

алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на

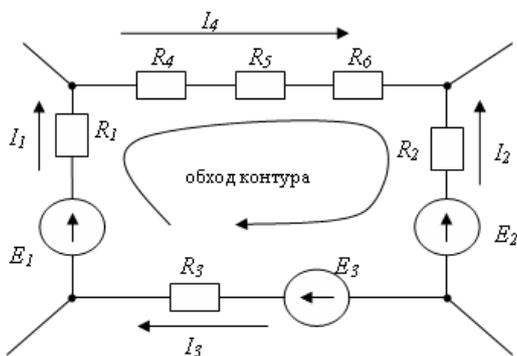


Рис.3

элементах вдоль этого же контура (рис. 3). Этот закон является следствием закона сохранения энергии, в силу которого изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Принято, что ЭДС и падения напряжения на элементах контура совпадающие с направлением обхода контура, записываются со знаком «+», если не совпадают, наоборот, со знаком «-».

Число независимых уравнений равно числу независимых контуров, т.е.  $(B - B_J - Y + I)$ , где  $B$ - число ветвей электрической схемы,  $B_J$  – число ветвей с источниками тока,  $Y$ - количество узлов электрической схемы.

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot (R_4 + R_5 + R_6) - I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 \quad (3)$$

Направление обхода контура выбирается произвольно. Условно положительные направления неизвестных токов указываются так же произвольно.

### 3. Описание лабораторной работы

Элементы электрической цепи и измерительные приборы для исследования законов Кирхгофа и Ома расположены на панели универсального стенда. Питание цепи осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения 12В, который рассчитан на максимальный ток нагрузки 200мА.

В работе используются переменные резисторы  $R_1, R_2, R_3$ , каждый из которых состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений -  $R_l$  и  $R_n$  и группы соединенных друг с другом штепсельных гнезд, применяемых в качестве узлов электрической цепи.

### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис.4.)
2. Измерить напряжения на элементах и ток в цепи

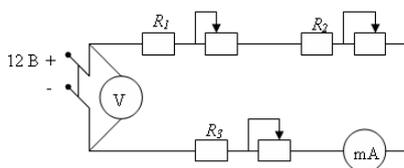


Рис. 4

№	измерено					вычислено				
	$I$	$U$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{экв}$	$P_{экв}$
	А	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт

3. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 5)

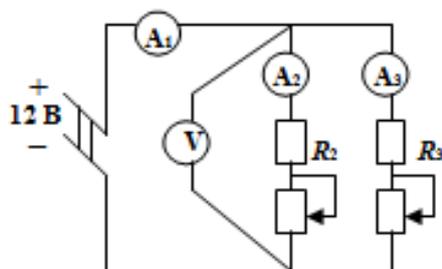


Рис. 5

№	измерено				вычислено					
	$U$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$R_2$	$R_3$	$R_{экв}$	$G_{экв}$	$P_{экв}$	
	В	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Сим	Вт	

4. Измерить напряжение и токи в цепи.

5. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 6)

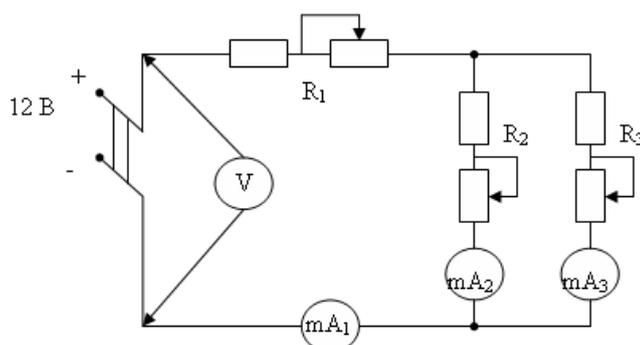


Рис. 6

№	измерено							вычислено						
	$U$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{экв}$	$G_{экв}$	$P_{экв}$	
	В	В	В	В	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Сим	Вт	

6. Измерить падения напряжений на элементах и токи в цепи при любых значениях сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$ .

7. По результатам измерений проверить законы Ома и Кирхгофа.

8. Вычислить токи по законам Кирхгофа при заданных сопротивлениях. Результаты расчета сравнить с экспериментом.

### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся рабочие схемы, заполненные таблицы, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Что называется электрической цепью, контуром, узлом, ветвью электрической цепи? Какие контуры называются взаимно независимыми?
2. Что значит «рассчитать» электрическую цепь?
3. Сколько всего уравнений нужно составить по законам Кирхгофа для расчета электрической схемы?
4. По каким формулам можно определить мощность, потребляемую резистором?
5. Как распределяются напряжение и мощность между последовательно соединенными резисторами?
6. Каково распределение токов в параллельных ветвях?
7. Как рассчитать проводимости ветвей и эквивалентную проводимость при параллельном соединении резисторов?
8. Как определить эквивалентное сопротивление при трех параллельно соединенных резисторах?
9. Как влияет число параллельных ветвей нагрузки на ток  $I$  в неразветвленной части цепи?
10. В какой из двух параллельных ветвей будет больший ток?

## **Лабораторная работа № 3**

### **Принцип наложения. Потенциальная диаграмма.**

#### **1. Цель работы**

Экспериментальная проверка одного из методов расчета разветвленных линейных цепей постоянного тока с несколькими источниками - принципа наложения. Построение потенциальной диаграммы и нахождение с ее помощью напряжения между двумя заданными точками исследуемой цепи.

#### **2. Основные теоретические положения.**

Из линейности уравнений, получаемых на основании законов Кирхгофа для линейных цепей, следует справедливость так называемого «принципа

суперпозиции». Применительно к электрическим цепям этот принцип заключается в том, что воздействие нескольких источников на какой-либо элемент цепи можно рассматривать как результат воздействия на этот элемент каждой из источников ЭДС или тока в отдельности, независимо от других.

Сущность этого метода состоит в том, что в сложной схеме с несколькими источниками последовательно рассчитываются частичные токи от каждого источника в отдельности. Расчет электрической цепи по методу наложения сводится к расчету нескольких электрических цепей с одним источником, потому что по принципу суперпозиции токи, протекающие в цепи при наличии нескольких источников, можно представить как алгебраическую сумму токов, вызываемых каждой из источников в отдельности и называемых частичными токами. Т.е. принцип наложения позволяет рассчитать сложную задачу на ряд более простых, в каждой из которых в рассматриваемой сложной цепи действует только одна ЭДС или один источник тока, а все остальные источники энергии предполагаются отсутствующими. При этом все другие источники ЭДС должны быть замкнуты накоротко с сохранением в ветвях их внутренних сопротивлений, а все другие источники тока должны быть разомкнуты, но в соответствующих ветвях должны быть сохранены их внутренние проводимости. Очевидно, что расчетов будет столько, сколько источников имеется в исследуемой цепи. А действительные токи в каждой ветви находят как алгебраическую сумму частичных токов, протекающих в этих ветвях. Принцип наложения выполняется только для тех физических величин, которые описываются линейными алгебраическими уравнениями, например, для токов и напряжений в линейных цепях.

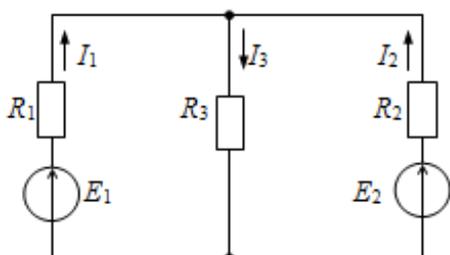


Рис. 1

**Пример.** Задана схема (рис.1) цепи и параметры ее элементов:  $E_1 = 12$  В;  $E_2 = 9$  В;  $R_1 = R_2 = R_3 = 2$  Ом. Требуется определить токи в ветвях схемы методом наложения.

На рис. 2а представлена схема цепи для определения частичных токов от источника ЭДС  $E_1$ , а на рис. 2б – от источника ЭДС  $E_2$ .

ЭДС  $E_1$ , а на рис. 2б – от источника ЭДС  $E_2$ .

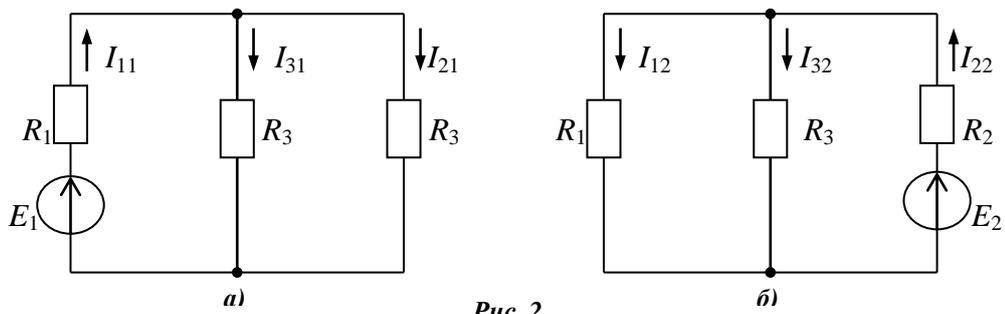


Рис. 2

Частичные токи в схеме рис. 2а от  $E_1$ :

$$R_{11} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 2 + \frac{2 + 2}{2} = 3 \text{ Ом}; \quad I_{11} = E_1/R_{11} = 12/3 = 4 \text{ А}; \quad I_{21} = I_{31} = 2 \text{ А}.$$

Частичные токи в схеме рис. 2б от  $E_2$ :

$$R_{22} = R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 2 + \frac{2 + 2}{2} = 3 \text{ Ом}; \quad I_{22} = E_2/R_{22} = 9/3 = 3 \text{ А}; \quad I_{12} = I_{32} = 1,5 \text{ А}.$$

Действительные токи как алгебраические суммы частичных токов:

$$I_1 = I_{11} - I_{12} = 4 - 1,5 = 2,5 \text{ А}$$

$$I_2 = -I_{21} + I_{22} = -2 + 3 = 1 \text{ А}$$

$$I_3 = I_{31} + I_{32} = 2 + 1,5 = 3,5 \text{ А}$$

### 3. Описание лабораторной работы

Элементы электрической цепи и измерительные приборы для проверки метода наложения расположены на панели универсального стенда. Работа выполняется на панели постоянного тока, три миллиамперметра с положительными и отрицательными значениями, что позволяет визуально определять направление тока в измеряемой ветви. Для измерения напряжения используется вольтметр В7-26. Набор регулируемых резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , каждый из которых состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений -  $R_l$  и  $R_n$  и группы соединенных друг с другом штепсельных гнезд, применяемых в качестве узлов электрической цепи. Источники энергии  $E_1$  и  $E_2$  находятся на боковой стойке стенда и подключаются поочередно к коммутирующим переключателям  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  рабочей панели.

### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис.3)

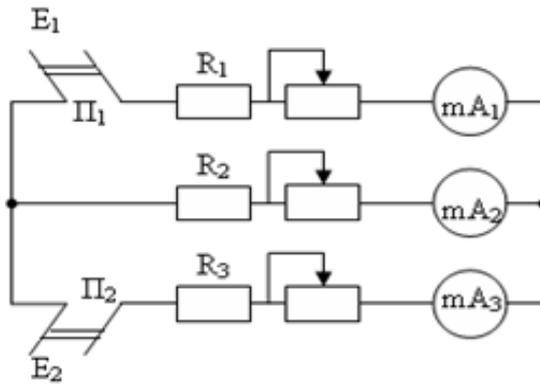


Рис.3.

2. Провести три эксперимента:

Первый эксперимент, при $E_1=0$ .					Второй эксперимент, при $E_2=0$ .					Третий эксперимент, при двух включенных ЭДС					
$U'$	$U_{ab}'$	$I_1'$	$I_2'$	$I_3'$	$U''$	$U_{ab}''$	$I_1''$	$I_2''$	$I_3''$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
В	В	А	А	А	В	В	А	А	А	В	В	В	А	А	А

3. Составить уравнение для проверки принципа наложения, провести расчеты и проверить с экспериментальными данными.
4. Построить потенциальную диаграмму по экспериментальным данным и по результатам расчета пункта 2 при питании от двух источников ЭДС, измерив для этого потенциалы всех точек относительно той точки, потенциал которой принят равным нулю. Сопротивления подсчитать по измеренным потенциалам и токам.

### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся схемы исследуемых электрических цепей с указанием условно-положительных направлений токов ветвей, заполненные таблицы, расчет действительных токов исходной электрической цепи с двумя источниками, потенциальная диаграмма, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

### 6. Контрольные вопросы

1. Каким способом можно измерить или определить величину сопротивления?
2. Как выполняется расчет электрической цепи методом наложения?
3. В чем заключается сущность принципа наложения?

4. Применим ли принцип наложения для определения мощности в линейных электрических цепях?
5. В каких случаях для расчета тока удобно воспользоваться теоремой об эквивалентном генераторе?
6. Какой источник называется источником ЭДС?
7. Приведите примеры независимых и зависимых источников.
8. Какой источник называется источником тока?
9. Что такое потенциальная диаграмма?
10. Дать определение частичных токов
11. Какие частичные токи считаются положительными, а какие отрицательными при расчете реальных токов?

## **Лабораторная работа № 4**

### **Пассивный двухполюсник в цепи синусоидального тока и простейшие векторные диаграммы.**

#### ***1. Цель работы***

Исследование режимов в последовательной цепи при различных сочетаниях пассивных элементов изменении частоты источника питания. Определение величины и характера сопротивлений приемников по данным измерений и построение векторных диаграмм.

#### ***2. Основные теоретические положения.***

Фундаментальную роль в современной электротехнике играют гармонические, т.е. синусоидальные или косинусоидальные колебания. Переменным током называется ток, изменяющийся во времени. Мгновенное значение синусоидального тока определяется выражением

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где  $I_m$  – амплитуда тока (максимальное значение), А;

$(\omega t + \psi_i)$  - полная фаза (фазовый угол, фаза), рад;  $t$  - время, с;  $\psi_i$  - начальная фаза

В электрических цепях переменного тока необходимо указывать положительные направления и для ЭДС, и для тока, и для напряжений (рис.1)

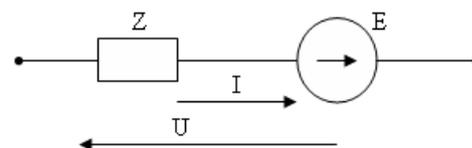


Рис.1

Мгновенные значения ЭДС, тока и напряжения выражаются следующими формулами:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

Кривые мгновенных значений напряжений можно наблюдать с помощью осциллографа (рис.2).

При совместном рассмотрении двух синусоидальных сигналов одной частоты разность их фаз, равную разности их начальных фаз, часто называют сдвигом фаз и обозначают  $\varphi$  (рис. 3)

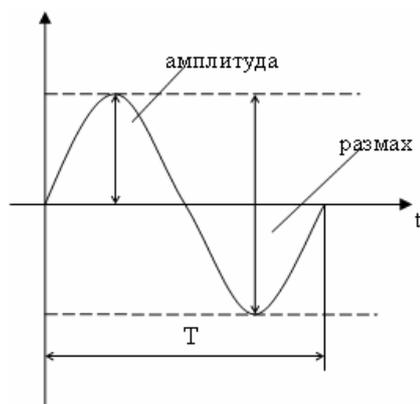


Рис.2

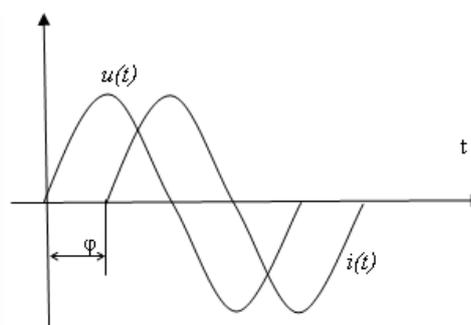


Рис.3

Так разность фаз напряжения  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  и тока  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  равна  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ : если  $\varphi = 0$ , то говорят, что напряжение и ток совпадают по фазе; если  $\varphi = \pm\pi$ , то они противоположны по фазе; если  $\varphi = \pm\pi/2$ , то они находятся в квадратуре.

Разность фаз двух колебаний не зависит от начала отсчета, так как изменения последнего приводит к изменению значений начальных фаз обоих колебаний на одну и ту же величину: если  $\varphi > 0$ , то ток  $i(t)$  отстает от напряжения  $u(t)$  по фазе на угол  $\varphi$ ; если  $\varphi < 0$ , то ток  $i(t)$  опережает напряжение  $u(t)$  по фазе на угол  $|\varphi|$ .

Электрическое состояние цепей синусоидального тока, так же как и цепей постоянного тока, описываются уравнениями Кирхгофа, однако вычисления

становятся более громоздкими, так как уравнения содержат тригонометрические функции. Для упрощения решения уравнений в электротехнике широко используется математический аппарат комплексных чисел.

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Ze^{j\varphi} = R + jX ,$$

где  $\dot{U}$  - комплексное значение напряжения, В;  $\dot{I}$  - комплексный ток, А;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \geq 0$  - полное сопротивление, Ом;

$R$ - активное сопротивление, Ом;  $X$ - реактивное сопротивление, Ом.

Комплексное число может быть записано в двух формах – алгебраической и показательной.

Любое комплексное число, записанное в алгебраической форме  $\underline{A}=a+jb$ , имеет вещественную  $a$  и мнимую  $jb$  составляющие, а число, записанное в показательной форме  $\underline{A}=Ae^{j\varphi}$ , - модуль  $A$  и аргумент  $\varphi$ .

Выбор той или иной формы в каждом конкретном случае диктует удобством осуществления нужной математической операции с комплексными числами: при суммировании удобна алгебраическая форма, при умножении и делении – показательная.

### **Сопротивление в цепи синусоидального тока.**

*Резистивный элемент*, характеризуемый активным сопротивлением, представляет собой идеализированный элемент, в котором происходит только необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии в другой вид энергии.

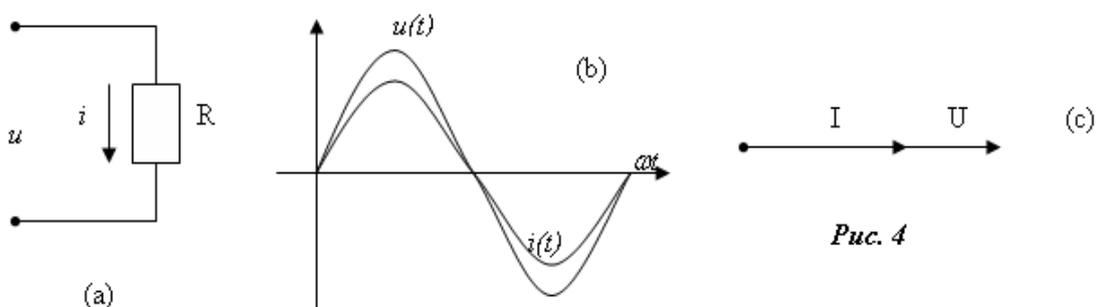


Рис. 4

Если синусоидальное напряжение  $u(t) = U_m \sin \omega t$  подвести к сопротивлению  $R$  (рис. 4,а), то выражение для тока определяется из закона Ома для мгновенных

значений  $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$ . Следовательно, напряжение и ток, проходящий через сопротивление  $R$ , имеют одинаковую начальную частоту, или, как говорят, совпадают по фазе: они одновременно достигают своих максимальных значений и соответственно одновременно проходят через нуль (рис. 4, б). Векторная диаграмма представлена на рисунке 4(с). Т.е. форма напряжения на резистивном сопротивлении точно повторяет форму тока.

Мгновенная мощность, поступающая в резистивное сопротивление изменяется с удвоенной частотой и колеблется в пределах от 0 до  $2UI$ ,

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

### **Индуктивность в цепи синусоидального тока.**

*Индуктивные элементы* представляют собой идеализированные элементы, аналогичные по свойствам индуктивной катушке, в которой возбуждается магнитное поле, характеризуемое магнитным потоком  $\Phi$  и соответствующим ему потокосцеплением  $\psi$ . В индуктивном элементе происходит запасание энергии магнитного поля.

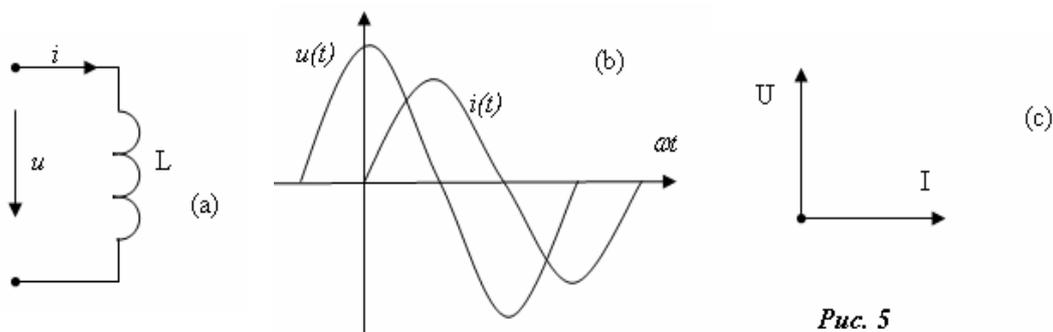


Рис. 5

Пусть через индуктивность  $L$  (рис. 5,а) проходит ток  $i(t) = I_m \sin \omega t$ . Напряжения на индуктивности опережает ток на угол  $90^\circ$ ,

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{mL} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Следовательно, в данном случае угол сдвига фаз между напряжением и током составляет  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$ . Из рисунка и выражения следует, что начальная фаза напряжения на  $90^\circ$  больше начальной фазы тока, т.е ток отстает по фазе от напряжения четверть периода. Временная и векторная диаграммы приведены на

рис. 5(б,с) . Амплитуда, так же как и действующие значения напряжения и тока, связаны соотношениями  $U_L = \omega L \cdot I = I \cdot X_L$ . Величину  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$  – связывающую амплитуды напряжения и тока называют реактивно-индуктивным сопротивлением катушки индуктивности.

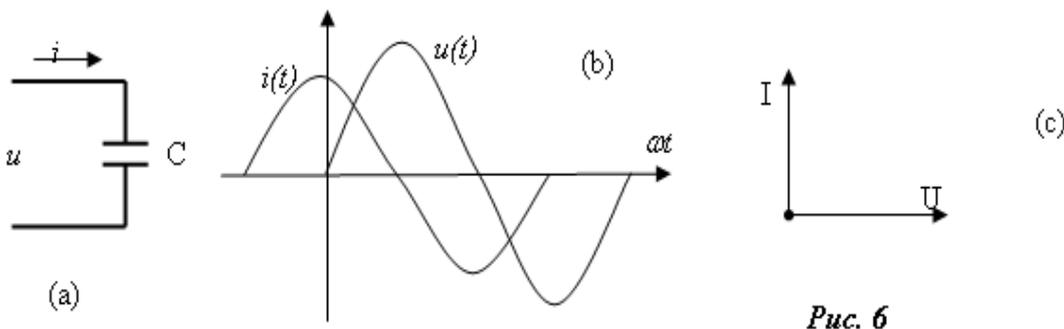
Мгновенная мощность, поступающая в индуктивность:

$$p = u_L \cdot i = U_{Lm} I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t ,$$

она колеблется по синусоидальному закону с угловой частотой  $2\omega$ , имея амплитуду  $UI$ . Таким образом, в цепи с индуктивностью происходит колебание энергии между источником и индуктивностью, причем активная мощность цепи равна нулю.

### **Емкость в цепи синусоидального тока.**

*Емкостной элемент* представляет собой идеализированный конденсатор, в котором накапливается энергия электрического поля. Конденсатор при низких частотах, когда можно пренебречь потерями в диэлектрике и пластинах, можно рассматривать как емкостной элемент, характеризуемый одним параметром – емкостью  $C = \frac{q}{u_C}$  (рис. 6, а).



**Рис. 6**

При напряжении на емкости  $u(t) = U_m \sin \omega t$ , тогда

$$i_C = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_{mC} \sin(\omega t + 90^\circ) .$$

Последнее выражение показывает, что ток  $i$  опережает приложенное напряжение  $u$  на угол  $\pi/2$ .

Здесь  $\omega C U_m = I_{mC}$  или  $I = \frac{U}{X_C}$ , где  $X_C$  – реактивно-емкостное сопротивление.

Из рисунка и выражения следует, что начальная фаза тока на  $90^\circ$  больше начальной фазы напряжения, т.е. вектор тока опережает по фазе вектор напряжения на четверть периода. Временная и векторная диаграммы приведены на рисунке 6 (b,c).

Мгновенная мощность, поступающая в емкость:

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t ,$$

колеблется синусоидально с угловой частотой  $2\omega$ , имея амплитуду равную  $UI$ .

### 3. Описание лабораторной работы

На стенде находятся: генератор сигналов специальной формы Г6-15, миллиамперметр, вольтметр универсальный В7-26.

В качестве приемников энергии в данной работе применяются: резистор с сопротивлением  $R$ ; пассивный двухполюсник с параметрами  $R_C, C$ ; катушка индуктивности с параметрами  $R_L, L$ . Кроме указанных элементов, на панели имеется катушка индуктивности  $L$ , переключение числа витков которой осуществляется тумблерами, а также батарея конденсаторов  $C$ , емкость которой изменяется ступенями с помощью тумблеров.

### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, состоящую из двух последовательно соединенных приемников: резистора  $R$  и катушки индуктивности ( $R_L, L$ ) по схеме (рис. 7). Для такой схемы записать в таблицу 1 показание приборов. Определить параметры катушки индуктивности приемника по известным трем напряжениям  $U_\Gamma, U_R$  и  $U_K$ , так называемым *методом трех вольтметров*.

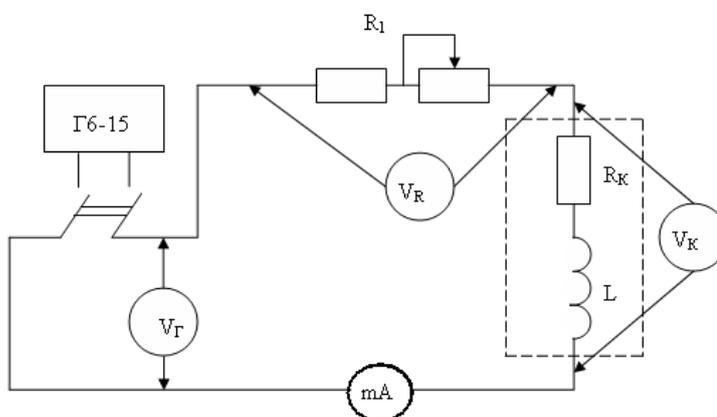


Рис. 7

Таблица 1

измерено					вычислено				
$U_{\Gamma}$	$U_R$	$U_K$	$I$	$f$	$R_I$	$R_K$	$X_L$	$L$	$Z$
В	В	В	А	Гц	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом

Таблица 2

цепь R-L	измерено			вычислено			
	$f$	$U_K$	$I$	$R_K$	$X_L$	$L$	$Z$
	Гц	В	А	Ом	Ом	Гн	Ом

2. Для той же цепи (рис.7) для определения параметров катушки индуктивности ( $R_L$ ,  $L$ ) на основании измерений, выполненных вольтметром и миллиамперметром при фиксированных частотах генератора. Записать показания приборов в таблицу 2. Определить параметры приемника так называемым методом двух частот.

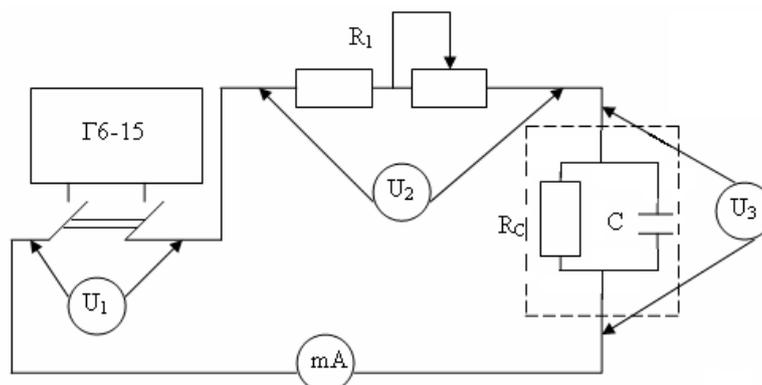


Рис. 8

Таблица 3

измерено					вычислено				
$U_1$	$U_2$	$U_3$	$I$	$f$	$R_I$	$R_C$	$X_C$	$C$	$Z$
В	В	В	А	Гц	Ом	Ом	Ом	Ф	Ом

Таблица 4.

цепь R-C	измерено			вычислено			
	$f$	$U_C$	$I$	$R_C$	$X_C$	$C$	$Z$
	Гц	В	А	Ом	Ом	Ф	Ом

3. Собрать электрическую цепь (рис.8), состоящую из двух последовательно соединенных приемников: резистора  $R$  и пассивного двухполюсника с параметрами  $(R_C, C)$ . Для такой схемы записать в таблицу 3 показание приборов. Определить параметры приемника по известным трем напряжениям  $U_G, U_R$  и  $U_C$ , так называемым *методом трех вольтметров*.

4. Для той же цепи (рис.8) для определения параметров конденсатора  $(R_C, C)$  на основании измерений, выполненных вольтметром и миллиамперметром при фиксированных частотах генератора. Записать показания приборов в таблицу 4. Определить параметры приемника так называемым *методом двух частот*.

5. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений.

6. Сравнить результаты экспериментального определения параметров катушки и несовершенного конденсатора двумя способами. Объяснить возможные расхождения окончательных результатов.

### **5. Содержание отчета**

В отчете приводятся схемы исследуемых электрических цепей, заполненные таблицы, расчет параметров катушки и несовершенного конденсатора, векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

### **6. Контрольные вопросы**

1. Какие колебания называются гармоническими?
2. Что называется переменным током, амплитудой, фазой, угловой частотой?  
Нарисуйте кривую гармонического сигнала.
3. Как связаны частота, угловая частота и период гармонических сигналов?
4. Докажите, что при гармоническом воздействии с частотой  $\omega$  индуктивное сопротивление равно  $X = \omega L$ , а емкостное  $X = 1/\omega C$ .
5. Покажите, каким образом складывают, вычитают, умножают, делят комплексные числа.

6. Покажите алгебраическую, показательную и тригонометрическую формы комплексного числа.
7. Дать определение электрической емкости
8. От чего зависит емкость плоского конденсатора?
9. Как определить энергию электрического поля конденсатора?

## **Лабораторная работа № 5**

### **Исследование неразветвленных цепей переменного тока.**

#### **Резонанс напряжений.**

##### *1. Цель работы*

Изучение резонансных свойств и частотных характеристик последовательного контура с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью, приобретение навыков по настройке цепи и по производству измерений, освоение методики и практики вычислений и построения векторных диаграмм по данным измерений.

##### *2. Основные теоретические положения.*

*Колебательные контуры* – это широко распространенные радиотехнические устройства, его используют в радиоприемниках для настройки на частоту желаемой радиостанции, в радиопередатчиках для излучения радиосигнала в пространство, в генераторах, где они включаются в цепь усилительного элемента – транзистора или электронной лампы, в резонансных усилителях, электрических фильтрах, корректорах – т.е. везде, где есть электрические колебания, а контур должен откликаться на них.

Наличие в колебательных контурах резонансных явлений делает их незаменимым при проектировании многих радиотехнических устройств.

Режим, при котором в цепи с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов напряжение на входе совпадает по фазе с током, называют резонансом напряжений.

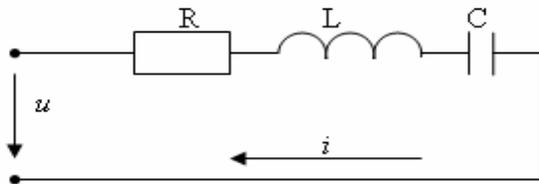


Рис. 1

Условием резонанса напряжений является равенство нулю мнимой части уравнения полного сопротивления (рис. 1).

$$Z = R + jX_L - jX_C, \quad \text{т.е.} \quad X_L - X_C = 0$$

Из равенства  $X_L = X_C$  или  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , где  $\omega = 2\pi \cdot f$ , можно определить частоту резонанса  $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  или  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Следовательно, режим резонанса может быть достигнут при изменении  $L$ ,  $C$  или  $\omega$ .

Значение сопротивления каждого из реактивных элементов на резонансной частоте называют характеристическим  $\rho = 2\pi \cdot f_p L = \frac{1}{2\pi \cdot f_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

В случае гармонического воздействия модуль входного сопротивления

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Аргумент этого сопротивления, равный по величине разности фаз приложенного напряжения и тока в контуре, определяется как

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Для мгновенных значений напряжений можно записать в соответствии с рис. 1

$$u = u_R + u_L + u_C.$$

Тогда 
$$u = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Здесь 
$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Напряжения в рассматриваемой цепи так же связаны соотношением

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2},$$

тогда амплитуда тока в контуре

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

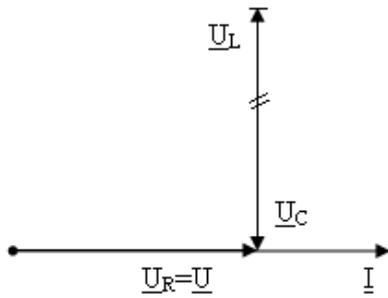


Рис. 2

В режиме резонанса ток в цепи приобретает максимальное значение и становится равным  $I_p = \frac{U}{R}$  и совпадает по фазе с приложенным напряжением. Векторная диаграмма для режима резонанса приведена на рис.2. При этом напряжение на конденсаторе  $U_{CP}$  и катушке  $U_{LP}$

$$U_{CP} = U_{LP} = I_p \omega_p L = \frac{I_p}{\omega_p C} \text{ и превышают напряжение на зажимах цепи, если } \frac{1}{\omega_p C} > R$$

и  $\omega_p L > R$ . Когда резистивное сопротивление  $R$  контура равно нулю (идеальный контур без потерь), рассеивание энергии в контуре (превращение ее в тепло при нагревании током резистора) не происходит, в контуре осуществляется только обмен электрической энергией, запасаемой конденсатором, и магнитной энергией, запасаемой катушкой. При наличии резистивного сопротивления такие потери неизбежны, и чем больше значение  $R$ , тем больше эти потери. Однако важным является не само значение резистивного сопротивления  $R$ , а его соотношение с сопротивлением любого реактивного элемента на резонансной частоте, т.е. с характеристическим сопротивлением  $\rho$ . Это соотношение измеряется величиной

$$\frac{\omega_p L}{R} = \frac{1/\omega_p C}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R} = Q \text{ называется добротностью контура. Величина}$$

добротности показывает, во сколько раз падение напряжения на индуктивности или емкости превышает напряжение, приложенное к цепи. Чем меньше резистивное сопротивление контура, тем больше его добротность при заданных значениях элементов  $L$  и  $C$ . Добротность и резонансная частота контура, нагруженного на резистивное сопротивление, могут существенно отличаться от добротности и резонансной частоты ненагруженного контура. С помощью добротности можно оценивать избирательность контура – способность контура ослаблять напряжение на различных частотах в неодинаковое число раз. На избирательность контура оказывает влияние значения его элементов. Чем выше избирательность контура, тем круче идет кривая соответствующей частотной

зависимости и больше добротность. Контур с высокой избирательностью ослабляет гармонические колебания с частотами, отстоящими от резонансной в большее число раз, чем контур с низкой избирательностью.

Еще одной важной характеристикой контура является полоса пропускания – тот диапазон частот, в котором коэффициент передачи по напряжению уменьшается не более чем в  $\sqrt{2} = 1,71$  раз по сравнению с его максимальным значением и обозначается  $\Delta f$ . Очевидно, у контуров с большей добротностью полоса пропускания меньше, т.к.  $\Delta f = \frac{f_P}{Q}$ .

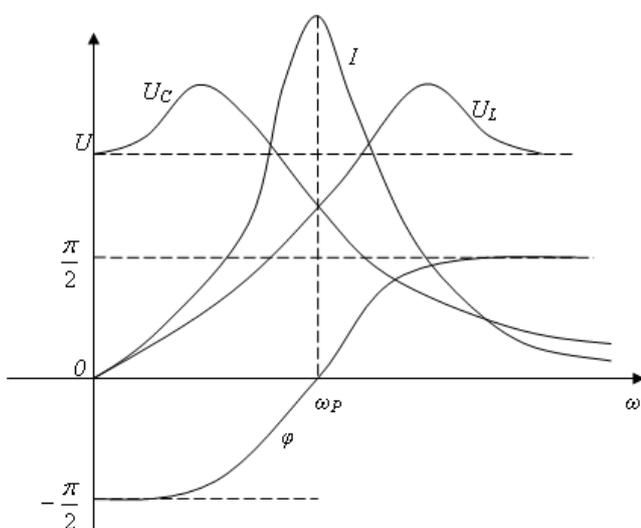


Рис.3

Резонансная частота, полоса пропускания и добротность контура являются именно теми параметрами, которые широко используют радиоинженеры.

Частотная характеристика показывает, как ведет себя контур на разных частотах. Для изучения резонанса напряжения наибольший интерес представляют частотные зависимости

$I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$  и  $U_C(\omega)$ , разность фаз приложенного напряжения и тока  $\varphi(\omega)$ . Такие кривые представлены на рисунке 3. Влияние параметров цепи на вид резонансной кривой  $I(\omega)$  можно учитывать, используя величины добротности  $Q$ .

### 3. Описание лабораторной работы

На стенде находятся: генератор сигналов специальной формы Г6-15, вольтметр универсальный В7-26, панель с элементами электрической схемы.

В качестве приемников энергии в данной работе применяются: резистор с сопротивлением  $R$ ; пассивный двухполюсник с параметрами  $R_C$ ,  $C$ ; катушка индуктивности с параметрами  $R_L$ ,  $L$ . Кроме указанных элементов, на панели имеется катушка индуктивности  $L$ , переключение числа витков которой

осуществляется тумблерами, а также батарея конденсаторов  $C$ , емкость которой изменяется ступенями с помощью тумблеров.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь согласно рис.4.

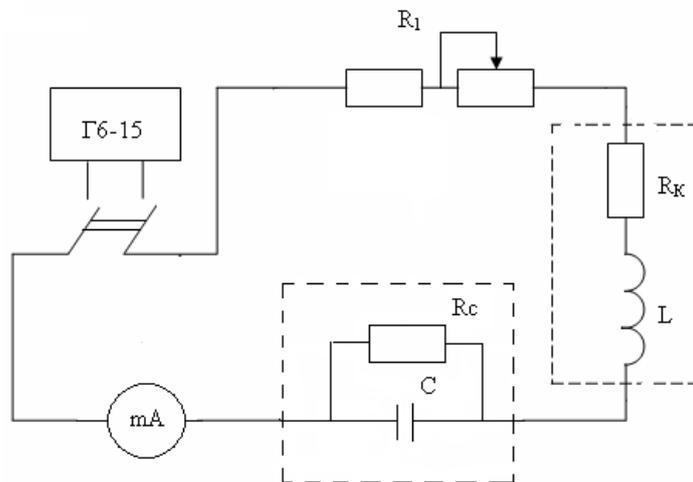


Рис. 4

№	измерено						вычислено									
	$U$	$U_K$	$U_C$	$U_R$	$I$	$f$	$b_C$	$C$	$X_L$	$L$	$R_K$	$R_I$	$Z_{э\text{кв}}$	$Z_K$	$Y_C$	$g_C$
	В	В	В	В	А	Гц	См	Ф	Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	Ом	См	См
$X_L = X_C$																
$X_L < X_C$																
$X_L > X_C$																

2. Изменением частоты генератора при фиксированных  $L$  и  $C$  добиться резонанса напряжений  $X_L = X_C$ , при этом ток  $I_P$  в цепи будет максимальным, а угол  $\varphi = 0$ , результаты свести в таблицу.

3. Изменяя частоту генератора, установить  $X_L < X_C$  и повторить замеры, результаты свести в таблицу.

4. Изменяя частоту генератора, установить  $X_L > X_C$  и повторить замеры, результаты свести в таблицу.

#### 5. Содержание отчета

В отчете приводится схема исследуемой электрической цепи, заполненная таблица, расчеты параметров катушки и несовершенного конденсатора, построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Какие необходимо сделать измерения для определения параметров катушки индуктивности и конденсатора в настоящей лабораторной работе?
2. Какие характерные признаки наступления резонанса напряжений можно определить по показаниям приборов?
3. Что следует понимать под термином «активная», «реактивная» составляющие тока и напряжения?
4. Как определяется знак угла сдвига фаз  $\varphi$ ?
5. Записать условия резонанса напряжений?
6. Какой вид имеют частотные характеристики индуктивного и емкостного сопротивления?
7. Объяснить явление резонанса напряжений?
8. Что представляет собой коэффициент мощности?
9. Чему равен коэффициент мощности при резонансе?

## **Лабораторная работа № 6**

### **Исследование разветвленной электрической цепи синусоидального тока .**

#### **Резонанс токов.**

##### **1. Цель работы**

Исследование параллельного соединения двухполюсников. Изучение резонансных явлений в параллельном колебательном контуре и построение частотных характеристик.

##### **2. Основные теоретические положения.**

Явление резонанса токов наблюдается в разветвленных цепях переменного тока, содержащих ветви с индуктивностью и емкостью (рис.1, а). Резонанс представляет собой такой режим цепи, при котором реактивная проводимость всей цепи равна нулю. На некоторой частоте, мы назвали ее резонансной и обозначили буквой  $f_p$ , реактивные проводимости ветвей  $b_L=1/x_L$  и  $b_C=1/x_C$

оказываются равными, так что общая реактивная проводимость  $b = b_C - b_L = 0$ . При заданной амплитуде напряжения на входе контура амплитуды токов в ветвях с реактивными элементами при резонансе резко увеличатся. Но эти токи находятся в противофазе друг с другом, и в сумме они скомпенсируют друг друга. Результирующий ток будет равен току в резисторе. Соответственно угол сдвига фаз между напряжением и общим током цепи равен нулю, и цепь потребляет только активную мощность (рис. 1, б).

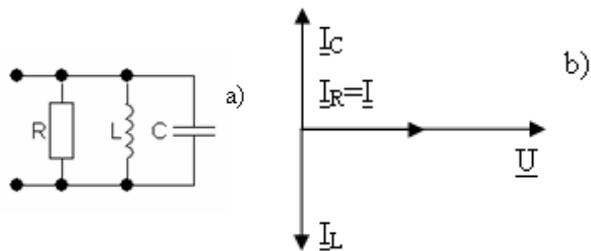


Рис. 1

Простейший параллельный колебательный контур для идеального случая рис.1 (контур без потерь). Комплексная проводимость параллельного контура

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C - j\frac{1}{\omega L} = g + jb_C - jb_L$$

$$jb_C - jb_L = 0 \rightarrow b_C = b_L \rightarrow \omega C = \frac{1}{\omega L} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad (1)$$

т.е. уравнение (1) совпадает с выражением для последовательного контура.

Частотная характеристика модуля входного сопротивления контура

приведена на рис. 2, из которого можно видеть, что сопротивление  $Z_K$  при резонансе становится максимальным. При резонансе токов, когда  $\omega = \omega_p$ , ток в неразветвленной части цепи достигает максимального значения  $I_0 = \frac{U}{Z_{K.P}} = d \frac{U}{\rho}$  и совпадает по фазе с

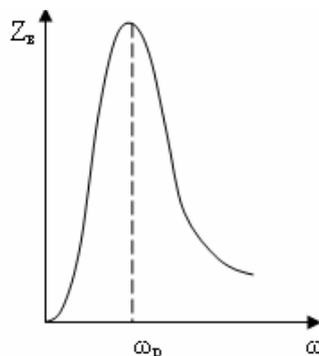


Рис.2

приложенным напряжением. При этом модули токов в

ветвях контура  $I_{10} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega_0 L)^2}} = \frac{U}{\rho}$ ,  $I_{20} = \frac{U}{\sqrt{\frac{1}{\omega_0^2 C^2}}} = \frac{U}{\rho}$ .

Таким образом, приближенно можно считать, что ток, потребляемый от источника при резонансе в  $Q$  раз меньше тока, протекающего в ветвях  $I_0 = \frac{I_{10}}{Q} = \frac{I_{20}}{Q}$ . На рисунке 3 приведены частотные характеристики токов в цепи.

Частотные характеристики проводимостей такого контура приведены на рис. 4.

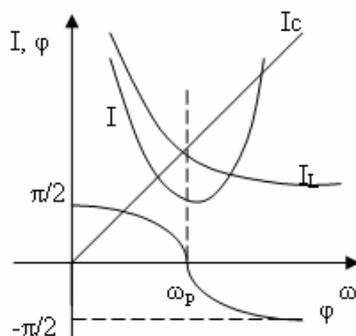


Рис.3

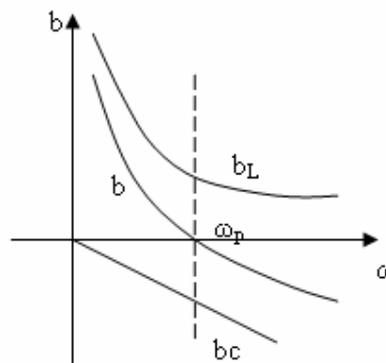


Рис.4

Параллельный колебательный контур является дуальным по отношению к последовательному колебательному контуру. Это означает, что можно воспользоваться всеми соотношениями, полученными для последовательного контура, предварительно заменив в них электрические величины и элементы на дуальные (напряжение на ток, ток на напряжение, сопротивление на проводимость и т.д.).

### 3. Описание лабораторной работы

Источником синусоидального напряжения служит генератор сигналов Г6-15. В качестве приемников энергии в работе применяются: резисторы с постоянным и переменным сопротивлением; конденсаторы с постоянной и переменной емкостью (магазин емкостей); катушка индуктивности с параметрами  $R_L, L$ , число витков которой можно менять с помощью тумблеров. Приборы для измерения токов и напряжения установлены на стенде.

### 4. Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по рис. 3.
2. Изменением частоты генератора при фиксированных  $L$  и  $C$  добиться резонанса тока  $b_L = b_C$ , при этом ток  $I_P$  в цепи будет минимальным, а угол  $\varphi = 0$ . Результаты свести в таблицу.

3. Изменяя частоту генератора, установить  $b_L < b_C$  и повторить замеры, результаты свести в таблицу.

4. Изменяя частоту генератора, установить  $b_L > b_C$  и повторить замеры, результаты свести в таблицу.

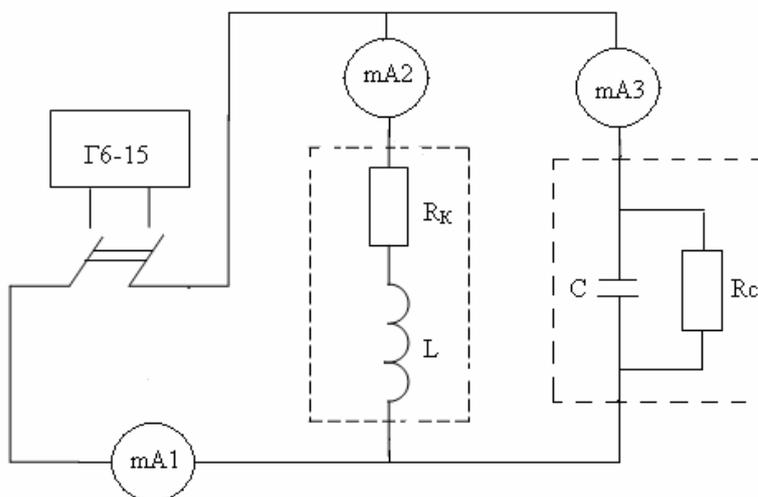


Рис. 3

	измерено					вычислено										
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U$	$f$	$L$	$R_k$	$C$	$g_C$	$X_k$	$Z_k$	$Y_c$	$Z_{экв}$	$b_c$	$\varphi$	
	А	А	А	В	Гц	Гн	Ом	Ф	См	Ом	Ом	См	Ом	См	г	
$b_L = b_C$																
$b_L < b_C$																
$b_L > b_C$																

### 5. Содержание отчета

В отчете приводится схема исследуемой электрической цепи, заполненная таблица, расчеты параметров катушки и несовершенного конденсатора, построенные в масштабе зависимости  $I_1=f(\omega)$ ,  $I_2=f(\omega)$ ,  $I_3=f(\omega)$ ,  $Z=f(\omega)$ , векторные диаграммы токов, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

### 6. Контрольные вопросы

1. Как вычислить комплекс полной проводимости?
2. Как экспериментально, пользуясь приборами амперметром и вольтметром определить проводимость?
3. При каком условии цепь носит индуктивный характер?
4. Какой режим работы носит название резонанса токов?

5. При каких условиях в двухполюснике с параллельным соединением ветвей возникает резонанс?
6. Как можно судить о наступлении резонанса тока в цепи?
7. Дайте определение добротности контура  $Q$  и затухания  $d$ . Что характеризует каждая из этих величин?
8. Какой вид имеют частотные характеристики индуктивной и емкостной проводимостей?
9. Как влияет затухание на форму резонансной кривой  $I(\omega)$ ?
10. Почему резонанс в параллельном контуре называется резонансом токов?
11. Запишите условие резонанса токов для сколь угодно сложного контура?

## **Лабораторная работа № 7**

### **Электрические цепи со взаимной индуктивностью.**

#### **Воздушный трансформатор.**

##### ***1. Цель работы***

Исследование влияния взаимной индукции на соотношение между токами и напряжениями индуктивно-связанных катушек при последовательном и параллельном включении, расчет индуктивно связанных катушек при согласном и встречном включении.

##### ***2. Основные теоретические положения.***

В электротехнических устройствах индуктивные элементы часто располагают в непосредственной близости друг от друга. При этом магнитные потоки каждого из элементов частично или полностью сцеплены с витками другого элемента. Элементы, между которыми существует электромагнитная связь из-за наличия взаимной индукции между ними, называются индуктивно-связанными. Количественно индуктивную связь катушек оценивают *взаимной индуктивностью*  $M$ , под которой понимают отношение общих потокосцеплений от потоков взаимной индукции  $\Phi_{M1}$ ,  $\Phi_{M2}$  к создающим их токам:

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{M2}}{i_2}, \quad M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{M1}}{i_1} \quad (1)$$

Можно сказать, что для линейной среды  $M_{12}=M_{21}$ . Отношение взаимной индуктивности двух катушек к среднему геометрическому из их индуктивностей называется коэффициентом связи катушек

$$K_K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2)$$

Две индуктивно связанные катушки, к каким бы ветвям или цепям они не принадлежали, могут быть включены двумя способами: *согласно* или *встречно*.

$$e_{\text{согл}} = e_L + e_M = -L \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$e_{\text{встр}} = e_L - e_M = -L \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Учитывая, что ЭДС взаимной индукции на участке цепи может складываться с ЭДС самоиндукции или вычитаться из нее, можно взаимную индуктивность  $M$  рассматривать как величину положительную или отрицательную. При согласном включении  $M > 0$ , т.е. потоки само- и взаимоиндукции складываются. При встречном включении  $M < 0$ , т.е. потоки само- и взаимоиндукции вычитаются.

Рассмотрим последовательное и параллельное соединение индуктивно-связанных катушек с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  и потерями  $R_1$  и  $R_2$ , находящихся под действием гармонического напряжения:  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ .

### **Последовательное соединение индуктивно связанных катушек.**

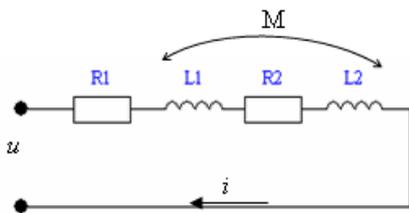


Рис. 1

Напишем второй закон Кирхгофа для рассматриваемого контура (рис.1)

$$u = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Запишем это уравнение в комплексной форме.

$$U = R_1 I + j\omega L_1 I \pm j\omega M I + R_2 I + j\omega L_2 I \pm j\omega M I \quad (6)$$

Комплексное сопротивление цепи при согласном включении больше, чем при встречном. Этим можно воспользоваться для определения опытным путем одноименных зажимов индуктивно связанных элементов цепи.

$$Z = R_1 + j\omega L_1 \pm j\omega M + R_2 + j\omega L_2 \pm j\omega M = R_1 + R_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 \pm 2\omega M) \quad (7)$$

Если индуктивность одного из элементов меньше взаимной индуктивности, то при встречном включении наблюдается своеобразный «емкостной» эффект.

Из выражения (6) вытекает следующий способ нахождения взаимной индуктивности  $M$ : если через  $X_{\text{согл}}$  обозначить индуктивное сопротивление цепи при согласном включении катушек, а через  $X_{\text{встр}}$  – то же, при встречном включении, т.е. положить

$$X_{\text{согл}} = \omega L_1 + j\omega L_2 + 2j\omega M; \quad X_{\text{встр}} = \omega L_1 + j\omega L_2 - 2j\omega M \quad (8)$$

то в результате вычитания второго равенства из первого получим

$$M = \frac{X_{\text{встр}} - X_{\text{согл}}}{4\omega} \quad (9)$$

Одноименные зажимы при последовательном соединении двух катушек можно определить по величине тока в цепи, если поменять местами зажимы одной из катушек. В случае согласного включения показание амперметра будет меньшим.

### ***Трансформатор без стального сердечника, воздушный трансформатор.***

Трансформатором называется статическое устройство, предназначенное для преобразования значений переменных напряжений и токов. Простейший трансформатор состоит из двух индуктивно связанных катушек с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$ , расположенных на общем сердечнике. Катушка, к которой подключается источник, называется первичной, а к которой подключают нагрузку – вторичной. Сердечник может быть выполнен из ферромагнитного или неферромагнитного материала.

Примером трансформатора последнего типа является воздушный трансформатор, находящий широкое применение в технике связи, измерительных приборах, различных радиотехнических устройствах. Схема простейшего воздушного трансформатора представлена на рис. 2.

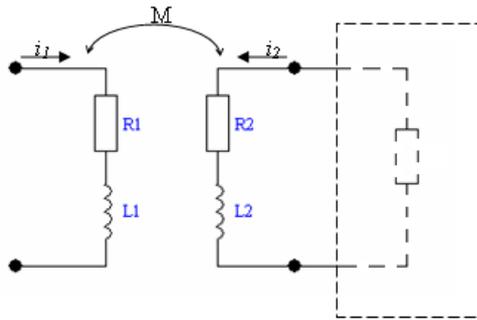


Рис. 2

Составим уравнение трансформатора, при выбранных положительных направлениях токов катушки включены согласно.

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепей имеем

$$U_1 = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad (10)$$

$$0 = R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 + U_2 \quad (11)$$

При холостом ходе трансформатора ( $I_2=0$ ;  $Z_H=\infty$ ) легко определить взаимную индуктивность катушек измерив ток холостого хода в первичной обмотке  $I_1$  и напряжение холостого хода на вторичной обмотке  $U_2$ .

Из уравнения (11) получим

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1} .$$

### 3. Описание лабораторной работы

На стенде находятся: генератор синусоидального напряжения Г6-15, переменный резистор  $R$ , индуктивные катушки  $L_1$  и  $L_2$ , которые можно соединять последовательно и по схеме воздушного трансформатора.

### 4. Порядок выполнения работы

1. Определить параметры  $R_k$  и  $L_k$  первой и второй катушек по опытным данным, собрав для этой цели схему (рис.5).
2. Показания приборов записать при двух разных частотах. Данные измерений первой и второй катушек занести в таблицу 1.
3. Собрать цепь по схеме, приведенной на рис. 6. Подключить ее к генератору. Записать показания приборов для случая согласного и встречного включения катушек. Данные измерений занести в таблицу 2.

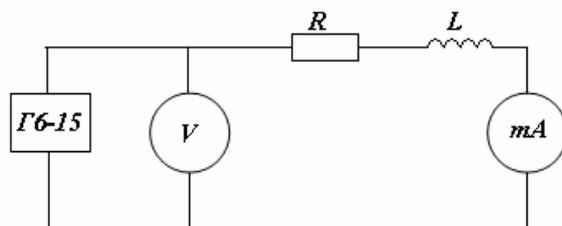


Рис. 5

Таблица 1

режим работы	измерено			вычислено							
	$f$	$U$	$I$	$Z_{к1}$	$R_{к1}$	$X_{к1}$	$L_1$	$Z_{к2}$	$R_{к2}$	$X_{к2}$	$L_2$
	Гц	В	А	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	Гн
катушка 1											
катушка 2											

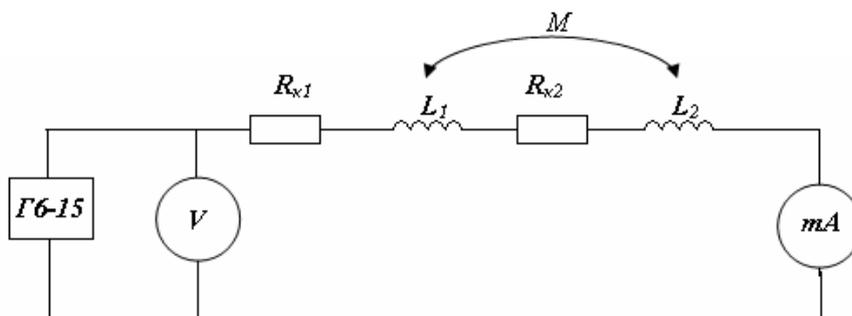


Рис. 6

Таблица 2

режим работы	измерено			вычислено				
	$f$	$U$	$I$	$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$M$	$Kc$
	Гц	В	А	Ом	Ом	Ом	Гн	-
согласное включение катушек								
встречное включение катушек								

4. Определить коэффициент взаимной индукции  $M$  и по результатам измерений пункта 2, построить в масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек.
5. Собрать цепь по схеме (рис. 7). Результаты измерений записать в табл. 3.
6. Определить коэффициент взаимной индукции  $M$  из опыта холостого хода.
7. Подключить сопротивление нагрузки  $R$  и для любых двух произвольных значений в таблицу 3 занести показания приборов.

8. По результатам построить в масштабе векторную диаграмму воздушного трансформатора.

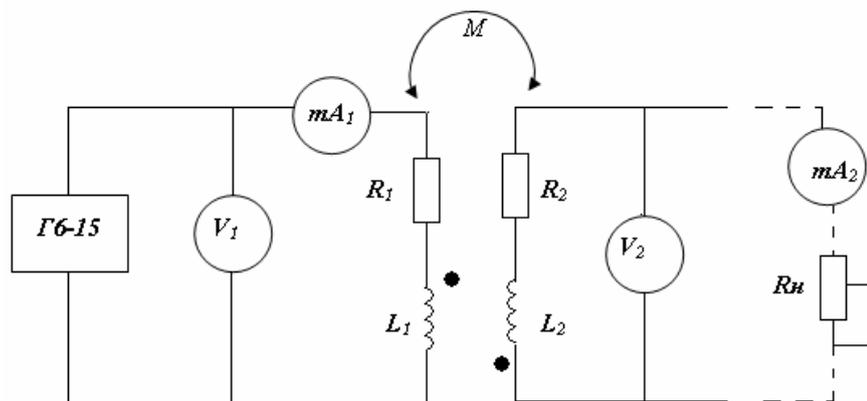


Рис. 7

Таблица 3

режим работы	измерено					вычислено	
	$f$	$U_1$	$I_1$	$U_2$	$I_2$	$M$	$K_c$
	Гц	В	А	В	А	Гц	-
холостой ход							
активная нагрузка							

### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся схемы исследуемой электрической цепи, заполненные таблицы, расчеты параметров катушки, построенные в масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек, а также векторную диаграмму воздушного трансформатора, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

### 6. Контрольные вопросы

1. Как опытным путем определить  $M$  и  $K_c$  индуктивно связанных катушек?
2. Что такое коэффициент связи? Может ли он быть больше единицы?
3. Что такое согласное и встречное включение индуктивно связанных катушек? Какие зажимы этих катушек называются одноименными?
4. Как по величине тока при последовательном включении индуктивно связанных катушек определить характер включения?
5. Как опытным путем определить  $M$  воздушного трансформатора?
6. Что понимается под взаимной индуктивностью двух катушек?

7. Что понимают под понятием «сопротивление связи»?
8. Для каких технических целей используют воздушные трансформаторы?
9. Записать формулу ЭДС самоиндукции.
10. Что такое индуктивность, от каких факторов она зависит?
11. В чем состоит разница между согласным и встречным включением?
12. Как определить энергию магнитного поля катушки индуктивности?

## ***ГЛОССАРИЙ***

### **А**

**Активная мощность** – мощность, соответствующая электрической энергии, преобразуемой двухполюсником в неэлектрические виды при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

**Активная проводимость** – вещественная часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

**Активное напряжение** – составляющая входного напряжения двухполюсника, совпадающая по фазе с током и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном токе.

**Активное сопротивление** – вещественная часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

**Активный ток** – составляющая входного тока двухполюсника, совпадающая по фазе с напряжением и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном напряжении.

### **В**

**Вебер-амперная характеристика** – зависимость потокосцепления участка электрической цепи от протекающего по нему тока.

**Векторная диаграмма** – совокупность векторов, изображающая синусоидальные токи, напряжения и ЭДС, действующие в электрической цепи.

**Ветвь электрической цепи** – связная совокупность элементов электрической цепи, образующих путь для протекания тока между двумя узлами.

**Вихревые токи (токи Фуко)** – электрический ток, возникающий под действием ЭДС индукции в проводящей среде, находящейся в изменяющемся магнитном потоке, и замыкающийся по concentрическим контурам, охватывающим магнитные линии.

**Внешняя характеристика источника электрической энергии** – зависимость напряжения на выходе источника от тока в нагрузке.

**Внешняя характеристика трансформатора** – зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от величины тока нагрузки.

**Вольт-амперная характеристика** – зависимость напряжения на участке электрической цепи от протекающего по нему тока.

**Вольт-кулонова характеристика** – зависимость напряжения на участке электрической цепи от величины заряда на его концах.

**Вращающееся магнитное поле** – магнитное поле, ось которого проходящая через центры полюсов вращается в пространстве.

**Вторичная обмотка трансформатора** – обмотка, к которой подключается нагрузка трансформатора.

## Д

**Двухполюсник** – часть электрической цепи, подключённая к ней двумя проводами (в двух точках).

**Действующее (эффективное, среднеквадратичное) значение синусоидальной величины** – значение эквивалентное по количеству тепла, выделяющемуся в цепи постоянного тока при тех же условиях.

**Дифференциальное (динамическое) сопротивление** – отношение приращения падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к приращению протекающего по нему тока вблизи некоторой точки вольт-амперной характеристики.

**Добротность катушки индуктивности** – отношение индуктивного сопротивления катушки к её активному сопротивлению.

**Добротность конденсатора** – отношение ёмкостного сопротивления конденсатора к его активному сопротивлению.

## **Ё, Е**

**Ёмкостное сопротивление** – параметр ёмкостного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

**Ёмкостный элемент** – идеальный элемент электрической цепи (идеальный конденсатор), обладающий только электрической ёмкостью.

**Ёмкость (электрическая ёмкость)** – параметр, характеризующий способность конденсатора формировать электрическое поле с определённым запасом энергии и численно равный отношению величины заряда, накапливаемого конденсатором к величине напряжения на его электродах.

**Естественный заземлитель** – используемые для заземления металлические конструкции и коммуникации зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй.

## **З**

**Заземление** – преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

**Заземляющее устройство (заземлитель)** – совокупность соединённых между собой металлических проводников, находящихся в соприкосновении с землёй.

**Закон полного тока** – линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, равен полному электрическому току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

**Законы коммутации** – следствия закона сохранения энергии, отражающие непрерывность тока в индуктивном элементе и напряжения на ёмкостном элементе при коммутации.

**Зануление** – преднамеренное электрическое соединение токопроводящих частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземлённой нейтралью генератора или трансформатора.

## **И**

**Идеальный ключ** – элемент электрической цепи, имеющий два состояния, в которых он обладает нулевым и бесконечно большим активным сопротивлением, и мгновенно меняющий состояние в заданный момент времени.

**Измерительные трансформаторы** – трансформаторы напряжения и тока, включаемые между прибором и измерительной цепью для обеспечения безопасности измерений и приведения измеряемых величин к уровню доступному измерению стандартными приборами.

**Индуктивное сопротивление** – параметр индуктивного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

**Индуктивность** – параметр, определяющий энергию магнитного поля участка электрической цепи и численно равный отношению величины потокосцепления этого участка к величине протекающего по нему тока

**Индуктивный элемент** – идеальный элемент электрической цепи (идеальная катушка), обладающий только индуктивностью.

**Источник тока** – источник электрической энергии, формирующий в подключённой к нему электрической цепи ток, не зависящий от величины и направления падения напряжения.

**Источник ЭДС (источник напряжения)** – источник электрической энергии, формирующий в точках подключения к нему электрической цепи разность потенциалов, не зависящую от величины и направления протекания тока.

**Источник электрической энергии** – преобразователь неэлектрических видов энергии (механической, химической, тепловой и др.) в электрическую.

## К

**Катушка** – группа последовательно соединённых витков, уложенных в одни и те же пазы, и имеющая помимо изоляции отдельных витков общую изоляцию от стенок паза.

**Катушка индуктивности** – элемент электрической цепи (физический объект), предназначенный для формирования магнитного поля с заданными свойствами.

**Коммутация** – мгновенное изменение схемы соединения или параметров элементов электрической цепи.

**Комплексная амплитуда** – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным амплитуде синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

**Комплексная проводимость** – параметр электрической цепи, обратный комплексному сопротивлению и определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двухполюсника.

**Комплексное действующее значение (комплексное значение)** – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным действующему значению синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

**Комплексное сопротивление** – параметр электрической цепи, определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двухполюсника.

**Комплексный (символический) метод расчёта** – основной метод расчёта электрических цепей переменного тока, заключающийся в замене синусоидальных величин и параметров цепи комплексными числами (символами величин), в результате чего расчёт сводится к решению алгебраических уравнений.

**Конденсатор** – элемент электрической цепи (физический объект), в электрическом поле которого происходит накопление энергии.

**Контур электрической цепи** – замкнутый путь вдоль ветвей электрической цепи.

**Коэрцитивная сила** – напряжённость магнитного поля, необходимая для снижения до нуля остаточной индукции.

**Коэффициент трансформации (приведения)** – отношение числа витков первичной обмотки трансформатора к числу витков вторичной обмотки, определяющее отношение номинальных напряжений первичной и вторичной обмоток.

**Круговая диаграмма** – окружность, представляющая собой геометрическое место точек концов векторов активного и реактивного напряжения (тока) двухполюсника при всех возможных вариациях его параметров и постоянном входном напряжении (токе).

## Л

**Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР)** – вид автотрансформатора с плавным регулированием выходного напряжения.

**Линейная катушка индуктивности** – катушка, обладающая линейной вебер-амперной характеристикой

**Линейные напряжения** – напряжения между линейными проводами трёхфазной цепи.

**Линейные токи** – токи в линейных проводах трёхфазной цепи.

**Линейный источник электрической энергии** – источник, обладающий линейной внешней характеристикой

**Линейный провод** – проводник, соединяющий источник с нагрузкой в трёхфазной цепи.

**Линейный резистор** – резистор, обладающий линейной вольт-амперной характеристикой

## М

**Магнитная индукция** – векторная величина, определяющая силу, действующую на движущуюся заряжённую частицу со стороны магнитного поля.

**Магнитная цепь** – совокупность технических устройств и объектов, возбуждающих магнитные поля и формирующих пути для их распространения,

электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

**Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции)** – скалярная величина, определяющая магнитную индукцию в области пространства ограниченной замкнутым контуром и равная потоку вектора магнитной индукции через поверхность этого контура.

**Магнитодвижущая сила** – линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, охватывающему полный электрический ток, создающий это поле.

**Магнитомягкие (магнитотвёрдые) материалы** – ферромагнитные материалы с малой (большой) коэрцитивной силой.

**Магнитопровод** – конструкция из ферромагнитного материала, предназначенная для усиления и формирования магнитного потока.

## **Н**

**Намагничивающий ток** – часть тока первичной обмотки, расходуемая на возбуждение магнитного потока и на компенсацию тепловых потерь в магнитопроводе.

**Напряжение на заземляющем устройстве** – напряжение, вызванное током замыкания на землю и распределённое вокруг точки ввода тока в заземляющее устройство.

**Напряжение прикосновения** – напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю при одновременном прикосновении к ним человека.

**Напряжение шага** – напряжение между двумя точками на земле, находящимися на расстоянии одного метра, вызванное растеканием тока замыкания на землю.

**Напряжённость магнитного поля** – векторная величина, определяющая свойства системы возбуждения магнитного поля и численно равная разности векторов индукции и намагниченности среды.

**Начальные условия переходного процесса** – токи в индуктивных элементах и напряжения на ёмкостных элементах цепи непосредственно перед коммутацией.

**Нейтральная (нулевая) точка (нейтраль)** – узел в соединении звездой источников или приёмников трёхфазной цепи.

**Нейтральная линия (геометрическая нейтраль)** – геометрическая ось симметрии между главными полюсами машины постоянного тока.

**Нейтральный (нулевой) провод** – проводник, соединяющий нейтральные (нулевые) точки источников и приемников в трёхфазной цепи.

**Нелинейная электрическая цепь** – электрическая цепь, содержащая, по крайней мере, один нелинейный элемент.

**Нелинейные элементы электрической цепи** – элементы электрической цепи, параметры которых зависят от протекающего по ним тока или от приложенного к ним напряжения, т.е. элементы с нелинейной вольт-амперной, вебер-амперной или кулон-вольтной характеристикой.

**Несвязанная трёхфазная система** – трёхфазная цепь, не имеющая электрической (гальванической) связи между фазами.

**Номинальное напряжение вторичной обмотки** – напряжение на вторичной обмотке при отключённой нагрузке трансформатора.

**Номинальное напряжение первичной обмотки** – расчётное напряжение на первичной обмотке трансформатора.

**Номинальный режим работы электрической цепи** – режим, при котором элементы электрической цепи работают в условиях соответствующих данным их проектирования

## **О**

**Обратная задача расчёта магнитной цепи** – определение магнитных потоков в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитодвижущих силах.

**Опыт короткого замыкания** – искусственно созданный режим короткого замыкания при напряжении питания пониженном до значения, при котором ток первичной обмотки равен номинальному, проводимый с целью определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

**Опыт холостого хода** – искусственно созданный режим холостого хода для определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

**Основной магнитный поток трансформатора** – магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, пронизывающий обе обмотки.

**Остаточная индукция** – индукция в ферромагнитном материале после уменьшения до нуля напряжённости магнитного поля.

## II

**Пассивные элементы электрической цепи** – элементы, не производящие электрическую энергию (резистор, катушка индуктивности, конденсатор).

**Пассивный двухполюсник** – двухполюсник, не содержащий источников электрической энергии.

**Первичная обмотка трансформатора** – обмотка, подключаемая к источнику электрической энергии.

**Переменные потери в трансформаторе** – тепловые потери энергии в трансформаторе зависящие от его нагрузки и равные потерям в обмотках.

**Переходные процессы** – электромагнитные процессы в электрической цепи, возникающие при изменении её состояния и обусловленные перераспределением и преобразованием энергии.

**Повышающий (понижающий) трансформатор** – трансформатор, у которого номинальное напряжение вторичной обмотки больше (меньше) номинального напряжения первичной обмотки.

**Полная (кажущаяся) мощность** – условная величина, вводимая для удобства в систему оценок мощности и численно равная предельно возможной активной мощности при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

**Полная проводимость** – модуль комплексной проводимости, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

**Полное сопротивление** – модуль комплексного сопротивления, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

**Порядок чередования фаз** – последовательность, в которой фазные ЭДС проходят через одинаковые состояния, например, через нулевые значения.

**Постоянные потери в трансформаторе** – тепловые потери энергии в трансформаторе не зависящие от его нагрузки и равные потерям в магнитопроводе.

**Потери в «меди»** – тепловые потери в проводе обмотки электромагнитного устройства, вызванные протеканием электрического тока.

**Потери в «стали»** – сумма тепловых потерь электрической энергии в материале магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов.

**Потери от вихревых токов** – тепловые потери электрической энергии, вызванные протеканием вихревых токов в материале магнитопровода.

**Потери от гистерезиса** – тепловые потери электрической энергии, связанные с перемагничиванием материала магнитопровода и пропорциональные площади петли гистерезиса.

**Потокоцепление** – сумма магнитных потоков, сцеплённых с витками катушки.

**Приведение параметров обмотки** – математическая операция замены реальных значений параметров элементов схемы замещения, тока, напряжений и ЭДС одной из обмоток расчётными эквивалентами, соответствующими числу витков другой обмотки, при условии сохранения мощности элементов схемы. Приведение параметров производится для замены магнитной связи обмоток эквивалентной электрической связью.

**Приёмник электрической энергии** – преобразователь электрической энергии в другие виды энергии (механическую, химическую, тепловую и др.).

**Принцип суперпозиции** – реакция электрической цепи на суммарное воздействие равно сумме реакций на элементарные воздействия.

**Принципиальная электрическая схема** – изображение электротехнических устройств, образующих электрическую цепь, и их связей с помощью условных обозначений.

**Проводимость** – величина обратная сопротивлению.

**Прямая задача расчёта магнитной цепи** – определение магнитодвижущих сил в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитных потоков.

## **Р**

**Реактивная мощность** – мощность, соответствующая электрической энергии, участвующей в периодическом обмене между двухполюсником и внешней цепью при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

**Реактивная проводимость** – мнимая часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

**Реактивное напряжение** – составляющая входного напряжения двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного тока на  $90^\circ$  и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном токе.

**Реактивное сопротивление** – мнимая часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

**Реактивный ток** – составляющая входного тока двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного напряжения на  $90^\circ$  и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном напряжении.

**Реальный источник** – источник электрической энергии, обладающий внутренними потерями.

**Режим короткого замыкания** – аварийный режим работы трансформатора при замкнутых между собой выводах вторичной обмотки.

**Режим холостого хода** – режим работы трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

**Режим холостого хода электрической цепи** – режим работы источника электрической энергии с отключённой нагрузкой.

**Резистивный элемент** – идеальный элемент электрической цепи (идеальный резистор), обладающий только сопротивлением.

**Резистор** – элемент электрической цепи (физический объект), в котором происходит необратимое преобразование электрической энергии в тепловую и основным параметром которого является электрическое сопротивление.

**Резонанс** – режим пассивного двухполюсника, содержащего индуктивные и ёмкостные элементы, при котором его входное реактивное сопротивление равно нулю.

**Резонанс напряжений** – явление резонанса в последовательном контуре, при котором напряжения на реактивных элементах компенсируют друг друга.

**Резонанс токов** – явление резонанса в параллельном контуре, при котором реактивные токи в ветвях компенсируют друг друга.

**С**

**Связанная трёхфазная система** – трёхфазная цепь, в которой источники электрической энергии электрически соединены между собой и приёмники (нагрузка) соединены между собой.

**Симметричная нагрузка** – приёмник (нагрузка) с одинаковыми комплексными фазными сопротивлениями.

**Синусоидальный ток** – электрический ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону.

**Согласованный режим работы электрической цепи** – режим, при котором источник электрической энергии отдаёт в нагрузку максимально возможную мощность.

**Сопротивление** – параметр, характеризующий способность резистора осуществлять преобразование энергии и численно равный отношению величины напряжения на резисторе к величине протекающего по нему тока.

**Среднее значение синусоидальной величины** – среднее значение синусоидальной величины за положительный полупериод.

**Статическое сопротивление** – отношение падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к протекающему по нему току.

**Схема замещения магнитной цепи** – схема, в которой с помощью условных обозначений, принятых в электрических цепях, изображена взаимосвязь магнитодвижущих сил и магнитных потоков в магнитной цепи.

**Схема замещения электрической цепи** – условное изображение параметров устройств и объектов электрической цепи, принимаемых в расчёт при анализе электромагнитных процессов.

## **Т**

**Ток замыкания на землю** – ток, стекающий в землю через место замыкания.

**Топология** – раздел математики, изучающий топологические свойства фигур, т.е. свойства фигур, не изменяющиеся при взаимно однозначных непрерывных отображениях.

**Трансформатор напряжения** – статическое (не имеющее движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одного переменного синусоидального напряжения в другое той же частоты.

**Трёхпроводная трёхфазная система** – трёхфазная цепь без нейтрального (нулевого) провода.

**Трёхфазная цепь** – совокупность трёх пар источников электрической энергии и приёмников, причём амплитуды и частоты ЭДС источников одинаковы, а начальные фазы смещены относительно друг друга на  $120^\circ$ .

**Трёхфазный трансформатор** – трансформатор с фазными обмотками, расположенными на общем магнитопроводе, в результате чего между фазами сети кроме электрической существует также магнитная связь.

## **У**

**Узел электрической цепи** – соединение трёх и более ветвей.

## **Ф**

**Фаза трёхфазной цепи** – часть трёхфазной цепи, включающая источник электрической энергии и подключённый к нему приёмник (нагрузку).

**Фазное сопротивление** – сопротивление фазы приёмника (нагрузки).

**Фазные ЭДС, напряжения и токи** – ЭДС, напряжения и токи в фазах трёх-фазной цепи.

**Феррорезонанс** – резонанс в электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником.

**Феррорезонансный стабилизатор напряжения (тока)** – устройство для поддержания постоянным значения напряжения (тока) в электрической цепи, использующее для этого вольт-амперную характеристику феррорезонансного контура.

## **Ц, Ч**

**Цикл (петля) гистерезиса** – зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля при её симметричном циклическом изменении, имеющая форму замкнутой кривой (петли).

**Четырёхпроводная трёхфазная система** – трёхфазная цепь с нейтральным (нулевым) проводом.

## **Э**

**Эквивалентные синусоиды** – синусоидальные величины тока и напряжения, действующие значения и активная мощность которых равны действующим значениям и активной мощности несинусоидальных периодических величин на входе двухполюсника.

**Электрическая сеть с глухозаземлённой нейтралью** – сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора непосредственно присоединена к заземляющему устройству.

**Электрическая сеть с изолированной нейтралью** – сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора не присоединена к заземляющему устройству.

**Электрическая цепь** – совокупность технических устройств и объектов, по которым протекает электрический ток, и электромагнитные процессы в которых могут быть описаны понятиями электродвижущей силы, тока и напряжения.

**Электрический ток** – направленное движение электрических зарядов.

**Электрический фильтр** – устройство, предназначенное для усиления или подавления в электрической цепи токов или напряжений определённой частоты или диапазона частот.

**Электрическое напряжение (падение напряжения, напряжение)** – работа, необходимая для перемещения зарядов на некотором участке электрической цепи и численно равная энергии, отдаваемой единичным зарядом на этом участке.

**Электродвижущая сила** – сила, действующая на электрические заряды и вызывающая их движение и численно равная энергии, получаемой единичным зарядом на участке действия этой силы.

## **Я**

**Явление гистерезиса** – зависимость значения магнитной индукции при данной напряжённости магнитного поля от её предшествующих значений.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. Л.: Энергоиздат, 1981.
2. Теоретические основы электротехники. Т1. Под ред. П.А.Ионкина. М.: Высшая школа, 1976.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Ч.1. -М.: Высшая школа, 1994.
4. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники (курс лекций) . Санкт-Петербург, 2004.
5. Раздаточный материал лекций.