

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

Факультет энергетический

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

# **ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Методические указания к лабораторным работам по  
теоретическим основам электротехники,  
Часть 1

Павлодар  
Кереку  
2008

## Предисловие

Лабораторные занятия при изучении курса «Теоретические основы электротехники» являются одной из основных форм закрепления теоретических знаний, позволяющей студентам практически проверить справедливость теоретических положений при экспериментальном исследовании различных режимов в электрических цепях.

Учебный процесс в лаборатории можно разделить на три этапа: 1) подготовка к лабораторной работе, изучение теоретического материала, соответствующего данной теме; 2) проведение эксперимента, получение опытных данных; 3) анализ результатов эксперимента, выполнение расчетов и подготовка отчета по лабораторной работе.

Методические указания разработаны в соответствии с программой курса ТОЭ на основе плана учебного процесса в лаборатории и включает основные разделы 1 части курса (цепи постоянного и однофазного синусоидального тока, трехфазные цепи, четырехполюсники).

В приложении к методическим указаниям даны правила техники безопасности в лаборатории ТОЭ (приложение А), правила оформления отчета по лабораторной работе (приложение Б), преобразование комплексных чисел (приложение В).

## Лабораторная работа № 1

### 1.1 Снятие вольтамперных характеристик

Цель работы: изучение устройства лабораторного стенда "Уралочка" приобретение навыков работы на стендах путем проведения опытов по определению величины сопротивления.

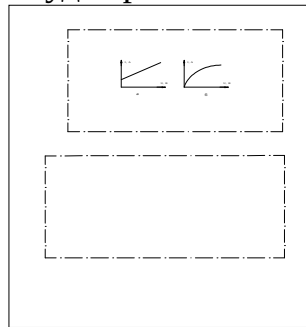
### 1.2 Краткие теоретические сведения

Вольтамперной характеристикой (ВАХ) называют зависимость тока, протекающего по сопротивлению, от напряжения на этом сопротивлении. ВАХ изображают графически: откладывая по оси абсцисс напряжение, а по оси ординат - ток.

Сопротивления, вольтамперные характеристики которых являются прямыми линиями, называют линейными сопротивлениями, а электрические цепи, содержащие только линейные сопротивления, называют линейными электрическими цепями.

Сопротивления, вольтамперные характеристики которых не являются прямыми линиями, называют нелинейными сопротивлениями, а электрические цепи с нелинейными сопротивлениями называют нелинейными электрическими цепями.

По ВАХ можно определять величину сопротивления путем деления величины напряжения на соответствующее значение тока на ВАХ. Если ВАХ прямая линия, то величина сопротивления одинакова для всей характеристики. В случае же нелинейной ВАХ, то для разных участков ВАХ сопротивление будет разным.



а - линейная; б - нелинейная

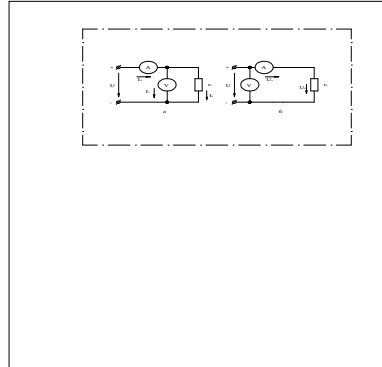
Рисунок 1.1 – Вольтамперные характеристики

Применяемые в электротехнике сопротивления можно условно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 до 100000 Ом) и большие (свыше 100000 Ом).

Наиболее простым косвенным методом измерения сопротивления резистора в цепи постоянного тока является измерение с помощью амперметра и вольтметра (для малых

сопротивлений - по схеме рисунка 1.2 а, для средних сопротивлений - по схеме рисунка 1.2б. Тогда искомое сопротивление  $r_x = \frac{U_V}{I_A}$ , где  $U_V$  и  $I_A$  - показания приборов.

Схемы измерения сопротивлений амперметром и вольтметром.



а) для измерения малых сопротивлений; б) для измерения больших сопротивлений.

Рисунок 1.2 – Схема измерения сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра

По схеме рисунка 1.2 а точное вычисление  $r_x$  будет по формуле:

$$r_x = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - (U_V / r_V)}$$

Однако, так как сопротивление вольтметра  $r_V$  значительно больше  $r_x$  ( $r_V > 100 r_x$ ), то ток  $I_A$ , измеренный амперметром, примерно равен току в сопротивлении  $r_x$ . Принимая  $I_A \gg I_V$ , сопротивление  $r_x$  можно вычислять по формуле (1.1):

$$r_x = \frac{U_V}{I_A}, \quad (1.1)$$

при этом ошибка измерения не превышает 1 %.

В схеме рисунка 1.2б сопротивление  $r_x$  более точно определяется по формуле (1.2):

$$r_x = \frac{U_x}{I_A} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V + I_A r_A}{I_A} \frac{U_V}{I_A} = r_A \quad (1.2)$$

так как сопротивление амперметра  $r_A$  значительно меньше  $r_x$  (

$r_x > 100 r_A$ ), то напряжение  $U_v$  близко к величине напряжения  $U_x$  на сопротивлении  $r_x$  можно вычислять по формуле 1.1.

Величину  $r_x$  можно измерять с помощью амперметра и ваттметра (рисунок 1.3 а) или с помощью вольтметра и ваттметра (рисунок 1.3 б).

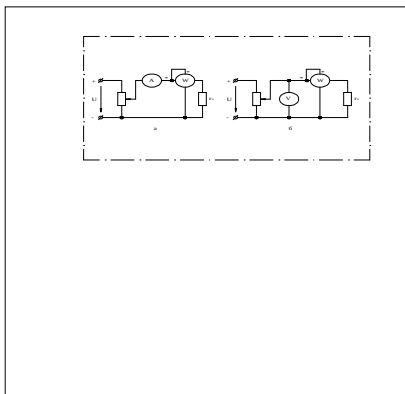


Рисунок 1.3

По схемам а и б (рисунок 1.3) сопротивление  $r_x$  вычисляется по формулам,

соответственно: по схеме а)

$$r_x = \frac{P_w}{I_A^2}, \quad (1.3)$$

по схеме б)  $r_x = \frac{U^2}{P_w}$  , (1.4)

Схема включения электродинамического ваттметра

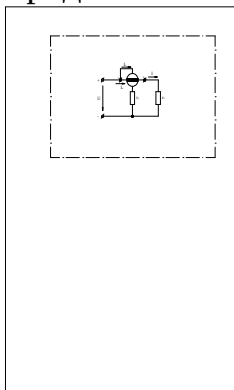


Рисунок 1.4

При объединении одноименных зажимов - токи в катушках имеют одинаковое направление (см. рисунок 1.4) и подвижная катушка отклонится в положительном направлении (вправо). Если же включить катушку Н наоборот, т.е. зажим, обозначенный звездочкой, присоединить не к точке 1, а к точке 2, то направление тока в катушке Н изменится на обратное и отклонение катушки П будет отрицательным (стрелка упрется в левый ограничительный упор). Имеются случаи, (в цепях переменного тока) когда отклонение стрелки прибора становится отрицательным при правильно собранна схеме. Чтобы можно было продолжать измерение мощности, не выключая прибор, на ней предусмотрен переключатель, изменяющий направление тока в подвижной катушке П. Два положения переключателя отмечены знаками "плюс" (+) и "минус" (-). Отсчет показаний ваттметра следует проводить с учетом этих знаков.

### **1.3 Задание**

1.3.1 Опытным путем определить данные для построения вольтамперной характеристики линейного и нелинейного сопротивлений.

1.3.2 Опытным путем определить величины мощности, тока. и напряжения в цепи с сопротивлением.

1.3.3 По опытным данным вычислить величину сопротивления в исследуемой цепи.

### **1.4 Указания по выполнению работы**

1.4.1 При выполнении п.1.3.1 раздела "Задание" собрать схему, показанную на рисунке 1.5. В качестве  $r_x$  использовать магазин сопротивлений. Величину  $r_x$  установить не менее 200 Ом, предел измерения тока - 0,1 А, а напряжение постоянного тока  $U_0$  - равным 30 В. Изменяя напряжение на входе схемы от 0 до 30 В, записать 5 пар показаний приборов в табл. 1.1. В качестве нелинейного сопротивления использовать сигнальную лампу, для этого в схеме вместо магазина сопротивлений необходимо подключить сигнальную лампу.

1.4.2 При выполнении п.1.3.2 раздела "Задание" собрать схему по рисунку 1.3 а. Величину  $r_x$  установить не менее 200 Ом, предел измерения тока - 0,1 А. При трех разных значениях тока, устанавливаемых путем изменения напряжения на входе схемы записать в табл. 1.2. показания приборов.

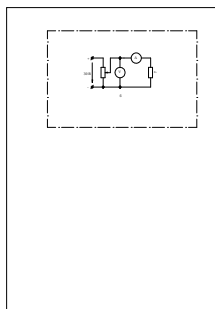


Рисунок 1.5

Таблица 1.1

	Резистор		Лампа	
	U, В	I, мА	U, В	I, мА
1				
2				
3				
4				
5				

Таблица 1.2

P, Вт			
I, мА			
U, В			
r, Ом			
примечание r – вычисленные значения			

Таблица 1.3

	Резистор			Лампа		
U, В						
I, мА						
r, Ом						

1.4.3 Собрать схему по рисунку 1.3 б. Величину  $r_x$  взять такой же как и в п. 2 настоящего раздела, предел измерения напряжения - 30 В. При трех разных значениях U записать, показания приборов в табл. 1.2.

1.4.4 По данным табл. 1.1 на одном рисунке построить вольтамперные характеристики резистора и лампы.

1.4.5 По вольтамперным характеристикам для трех точек вычислить величину сопротивления резистора и лампы. Результаты вычислений записать в табл. 1.3.

### Контрольные вопросы

1. Какие сопротивления называют линейными (нелинейными)?
2. Что называют вольтамперной характеристикой?
3. Каким образом можно по вольтамперной характеристике определить величину сопротивления?
4. Напишите формулы, по которым определяют величину сопротивления при известной мощности.

## Лабораторная работа № 2

### 2.1 Исследование линейной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: экспериментально убедиться в справедливости законов Ома и Кирхгофа и проверить основные соотношения цепей постоянного тока

### 2.2 Краткие теоретические сведения

Все современные методы расчета электрических цепей постоянного тока основаны законах Ома (1826г.) и Кирхгофа (1847г.).

Закон Ома устанавливает связь между током  $I$  и напряжением  $U$  на сопротивлении приемника (нагрузки).

$$I = U / r . \quad (2.1)$$

Для участка цепи с ЭДС (рисунок 2.1) закон Ома представляется следующим образом

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E}{r} . \quad (2.2)$$

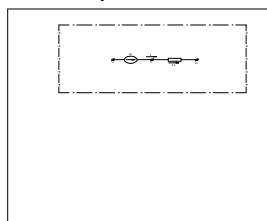


Рисунок 2.1

Потенциал точки с  $\varphi_c$  больше потенциала точки а  $\varphi_a$  на значение ЭДС  $E$ :

$$(2.3)$$



$$\varphi_c = \varphi_a + E.$$

Ток в электрической цепи всегда направлен от точки с более высоким потенциалом (С) к точке с более низким потенциалом (b), то есть  $\varphi_a > \varphi_b$ . Следовательно

$$\varphi_c = \varphi_b + rI. \quad (2.4)$$

или

$$U_r = rI = \varphi_c - \varphi_b.$$

Из (2.3) и (2.4) имеем  $\varphi_a + E = \varphi_b + rI$ , откуда следует формула (2.2).

При расчете разветвленных электрических цепей вводятся понятия: **узел**, **ветвь**, **контур**.

**Ветвь** электрической цепи (схемы) - это участок, состоящий только из последовательно включенных источников ЭДС и приемников (сопротивлений).

**Узел** цепи (схемы) - место соединения трех и более ветвей.

**Контур** цепи (схемы) - замкнутый участок цепи (схемы), образованный несколькими ветвями.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической схемы и формулируется так: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad (2.5)$$

В уравнении (2.5) одинаковые знаки должны быть взяты для токов, имеющих одинаковые положительные направления относительно рассматриваемого узла. При расчете цепи положительные направления токов выбираются произвольно.

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам цепи: в любом контуре алгебраическая сумма напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур, равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum rI = \sum E, \quad (2.6)$$

или

$$\sum U = \sum E.$$

В уравнении (2.6) положительные знаки принимают для токов и ЭДС, положительные направления которых совпадают с произвольно избранным обходе контура.

По первому закону Кирхгофа составляется  $n$  уравнений, равное числу узлов без единицы,

$$n = y - 1, \quad (2.7)$$

где  $y$  - число узлов в рассматриваемой схеме.

По второму закону Кирхгофа составляется  $m$  уравнений

$$m = b - b_i - n, \quad (2.8)$$

где  $b$  - число ветвей схемы;  $b_i$  - число ветвей с источниками тока.

Составим уравнения по законам Кирхгофа для расчета токов в схеме рисунка 2.2.

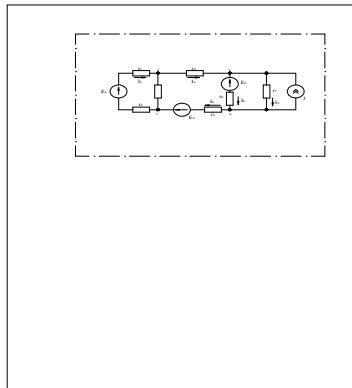


Рисунок 2.2

В схеме рисунка 2.2 число узлов равно 4, число ветвей - 7, то есть по первому закону Кирхгофа составляется 3 уравнения, по второму закону также - 3 уравнения.

$$\begin{aligned} \square I_1 - I_2 - I_3 &= 0; \\ \square J + I_3 - I_4 - I_5 &= 0; \\ \square I_4 + I_5 - J - I_6 &= 0; \\ \square (r_1 + r_2)I_1 + r_3I_2 &= E; \\ \square r_4I_3 + r_6I_4 + r_5I_6 - r_3I_2 &= E_3 - E_2; \\ \square r_7I_5 - r_6I_4 &= E_2. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Из системы уравнений (2.9) при известных ЭДС, токе источника тока сопротивлении схемы можно рассчитать токи в ветвях схемы.

Часто встречаются схемы, содержащие только два узла (рисунок 2.3)

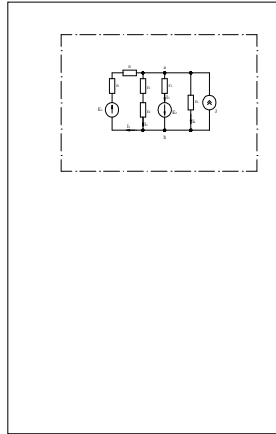


Рисунок 2.3

Для расчета таких схем применяется метод двух узлов, в котором за искомую величину принимают напряжение между двумя узлами  $U_{ab}$ , определяемое по формуле (2.10):

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + J - E_2 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}, \quad (2.10)$$

где  $g_i (i = 1 \div 4) = \frac{1}{R_i}$  — проводимость  $i$ -той ветви;  $R$ , — сопротивление соответствующей ветви (например,  $R_1 = r_1 + r_2$ ).

Токи в ветвях схемы рассчитываются по следующим формулам:

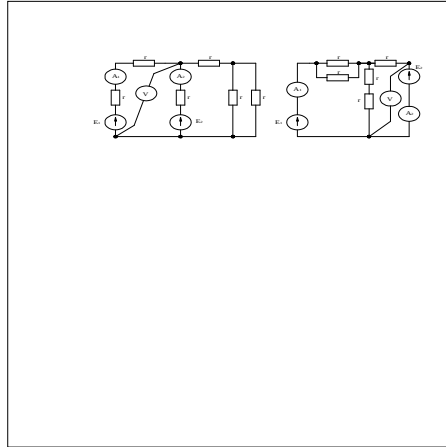
$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_1 + r_2}; \quad I_2 = \frac{U_{ab}}{r_3 + r_4}; \quad I_3 = \frac{E_2 + U_{ab}}{r_5}; \quad I_4 = \frac{U_{ab}}{r_6}.$$

### 2.3 Задание

2.3.1 Определить показания приборов в схеме рисунка 2.4. Параметры для расчета приведены в табл. 2.1.

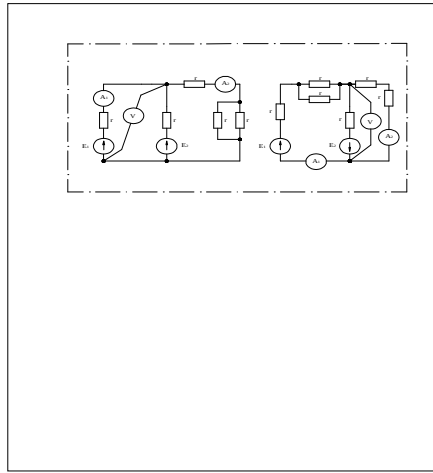
1.

2.



3.

4.



5.

6.

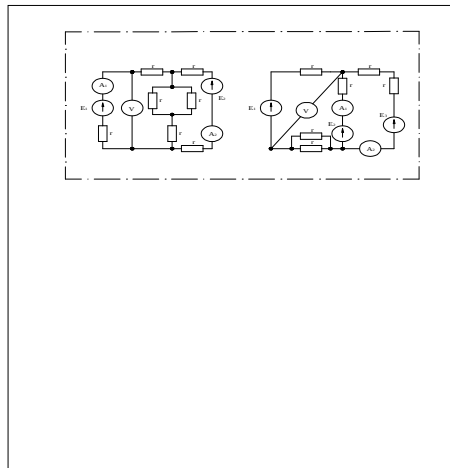


Рисунок 2.4

Таблица 2.1

Номер бригады	Номер схемы	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$r$ , Ом
1	1	50	20	-	10
2	2	30	60	-	5
3	3	100	50	40	20
4	4	100	200	-	25
5	5	75	150	-	30
6	6	40	50	80	40

Пункт 2.3.1 задания выполнить во внеаудиторное время при домашней подготовке к лабораторной работе.

2.3.2 Снять показания амперметров при трех различных значениях сопротивления  $r_3$  (рисунок 2.5).

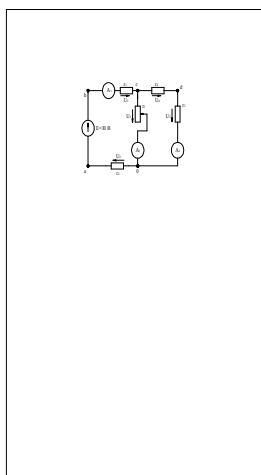


Рисунок 2.5

2.3.3 Измерить потенциалы указанных точек схемы а, б, с, d относительно точки 0, потенциал которой можно принять равным нулю, при тех же значениях  $r_3$ , что и в пункте 2.3.2.

2.3.4 Проверить выполнение первого и второго законов Кирхгофа по данным пунктов 2.3.2, 2.3.3.

2.3.5 Рассчитать сопротивления элементов схемы по данным пунктов 2,3.

2.3.6 Рассчитать баланс мощности схемы по данным пунктов 2.3.2,2.3.3 для одного значения сопротивления  $r_3$ .

2.3.7 Построить потенциальную диаграмму контура с ЭДС схемы рисунка 2.5 по данным пунктов 2.3.3, 2.3.5 для одного значения сопротивления  $r_3$ .

2.3.8 Рассчитать напряжение между двумя узлами со схемы рисунка 2.5 и сравнить данными пункта 2.3.3.

## 2.4 Указания по выполнению работы

2.4.1. При выполнении пункта 2.3.2 задания устанавливаются значения сопротивления  $r_3$  отличные от нуля и бесконечности.

2.4.2. При выполнении пункта 2.3.3 задания потенциалы точек записываются в табл. 2.21 учетом их полярности.

Результаты измерений и расчетов свести в табл.2.2

Таблица 2.2

	Измерено							Вычислено										
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E, B$	$r_1$	$r_2$	$r_4$	$r_5$		
	, А	, А	, А	, В	, В	, В $\varphi_d$ , В	, В	, В	, В	, В	, В		, О М	, Ом $r_3$ , Ом	, Ом	, Ом		
1																		
2																		
3																		

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Кирхгофа: покажите их применение для расчета цепей постоянного тока.

2. Как рассчитывается напряжение на участке цепи с ЭДС и резистором?

3. Как рассчитываются мощности источников и приемников?

4. Изложите метод построения потенциальной диаграммы.

## Лабораторная работа № 3

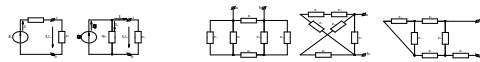
### 3.1 Разветвленная цепь постоянного тока с переменной нагрузкой

Цель работы: расчетным и опытным путем определить параметры и исследовать некоторые режимы активного линейного двухполюсника постоянного тока.

### 3.2 Краткие теоретические сведения

Разделение источников питания на источники э.д.с. и источники тока относительно. Если напряжение на выходе источника питания не изменяется с изменением сопротивления нагрузки  $r_n$ , то источник называют источником э.д.с. Практически это возможно, если внутреннее сопротивление источника питания  $r_{вн}$  намного меньше  $r_n$  №

На рис. 3.1 а показана простейшая электрическая цепь с источником э.д.с.



а

б

Рисунок 3.1

Для нее по второму закону Кирхгофа

$$E = I r_{\text{вн}} + I r_n = I r_{\text{вн}} + U_{12}. \quad (3.1)$$

откуда

$$U_{12} = E - I r_{\text{вн}} = E - \Delta U_{\text{вн}} \quad (3.2)$$

Здесь  $U_{12}$  напряжение на выходе источника э.д.с.

Из формулы (3.2) следует, что  $U_{12}$  меньше э.д.с. ( $E$ ) на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении  $\Delta U_{\text{вн}}$ . Если в схеме (рис. 3.1а)  $r_{\text{вн}} \ll r_n$ , то  $\Delta U_{\text{вн}} \ll U_{12}$ , а  $U_{12} \approx E$ . Идеальным называют источник, у которого  $r_{\text{вн}} = 0$ , тогда при любом токе в цепи  $U_{12} = E$ .

Если с изменением сопротивления нагрузки ток в источнике питания  $J$  не изменится, то его называют источником тока. Для схемы показанной на рис. 3.1 б это условие будет выполняться, если  $r_{\text{вн}} \gg r_n$ . Тот же результат будет при питании цепи по схеме, показанной на рис. 3.1 б, которую чаще используют в качестве цепи с источником тока. В этой схеме, если проводимость параллельной ветви равна нулю ( $q_{\text{вн}} = 0$ ), то ток  $I$  во внешней цепи всегда равен току  $J$  источника тока. В таком случае получаем идеальный источник тока. Источники э.д.с. и тока, показанные на рис. 3.1, эквивалентны один другому, если выполняется условие

$$E = \frac{J}{q_{\text{вн}}}, \quad \text{а} \quad q_{\text{вн}} = \frac{1}{r_{\text{вн}}}.$$

Для схемы на рис. 3.1 б

$$J = I + I_d, I = J - I_d = J - \frac{U_{12}}{r_{вн}}.$$

В сложных электрических цепях, содержащих несколько источников питания, ток в любой ветви представляет собой алгебраическую сумму частичных токов, создаваемых в данной ветви каждым конкретным источником питания. При этом с изменением величины э.д.с. (тока) у одного из источников питания, токи во всех ветвях электрической цепи будут изменяться пропорционально ей.

В любой электрической схеме всегда можно выделить мысленно ветвь, а всю остальную часть схемы изобразить прямоугольником. Если в двухполюснике содержатся источники питания, его называют активным (в прямоугольнике ставится буква А), если не содержится – пассивным. (П).

На рис. 3.2 а показана схема с активным двухполюсником, а на рис. 3.2 б активный двухполюсник заменен эквивалентным генератором.

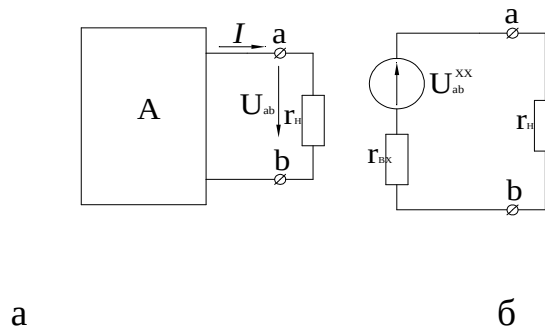


Рисунок 3.2

Для упрощения расчета двухполюсник заменяют эквивалентным генератором, э.д.с. которого равна напряжению х.х. на зажимах выделенной ветви  $U_{ab}^{xx}$ , а внутреннее сопротивление  $r_{вн}$  равно входному сопротивлению двухполюсника  $r_{вх}$ .

Для определения  $U_{ab}^{xx}$  и  $r_{вх}$  опытным путем выполняют опыты х.х. и к.з. для этого проводят следующие опыты:

- 1) в выделенной ветви с сопротивлением  $r_n$  размыкают ветвь с  $r_n$  ( $r_n = \infty$ ) и измеряют  $U_{ab} = U_{ab}^{xx}$ ;
- 2) в выделенной ветви замыкают сопротивление  $r_n$  накоротко ( $r_n = 0$ ) и измеряют ток  $I_{кз}$ , протекающего по этой ветви;
- 3) вычисляют  $r_{вх} = \frac{U_{ab}^{xx}}{I_{кз}}$ .



Мощность расходуемая в сопротивлении выделенной ветви (в сопротивлении нагрузки), будет максимальной, если  $r_{\text{ex}}$  будет равно  $r_n$  ветви – режим согласной нагрузки. Тогда по схеме (см. рис. 3.2б)

$$P_{\text{max}} = I^2 r_n = \left[ \frac{U_{ae}^{xx}}{r_n + r_{\text{ex}}} \right]^2 r_n.$$

При  $r_n = r_{\text{ex}}$  получим  $P_{\text{max}} = \frac{U_{ae}^{xx 2}}{4r_{\text{ex}}^2} r = \frac{U_{ae}^{xx 2}}{4r_{\text{ex}}}.$

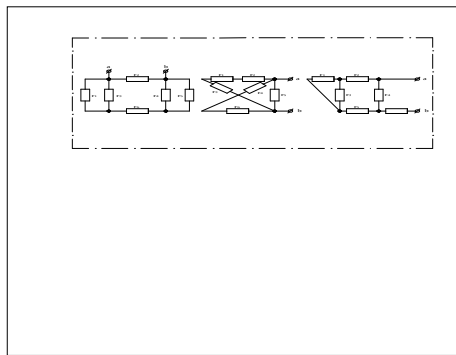
### 3.3 Задание

3.3.1 Найти общее сопротивление схемы относительно зажимов а-в (выполняется во внеаудиторное время).

1.

2.

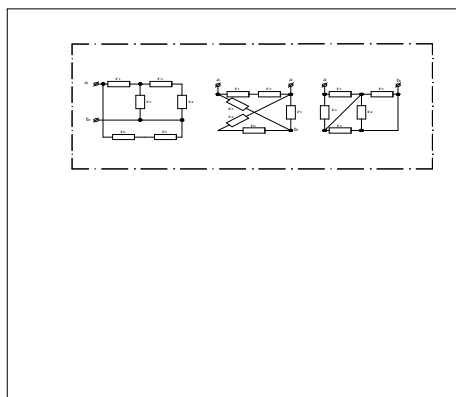
3.



4.

5.

6.



Номер группы	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	
	Ом					

ЭПП	1	10	8	10	4	10	5
	2	5	10	8	10	7	10
	3	5	3	3	4	4	6
	4	20	15	20	30	15	10
	5	4	5	3	2	6	6
	6	50	20	30	40	40	10
	7	20	100	80	20	40	30
	8	6	8	5	10	3	6
ЭФ	9	30	40	20	30	10	50
	10	8	3	2	5	4	6
	11	3	10	2	5	6	8
	12	4	6	10	5	10	5

Номер схемы соответствует номеру бригады.

3.3.2 Опытным путем, изменяя величину сопротивления  $r_2$  от нуля до максимума, определить токи в ветвях  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  схемы (рисунок 3.3) и напряжение на сопротивлении  $r_2$  при следующих режимах питания электрической цепи:

- от источника напряжения.

с целью построения графиков и определения параметров двухполосника.

3.3.3 Опытным путем определить токи в ветвях схемы и напряжение на сопротивлении  $r_3$  в следующих режимах:

при  $r_3 \neq 0$ ;

при  $r_3 = 0$ ;

при  $r_3 = \infty$ ;

для аналитического определения напряжения между точками 2, 3.

3.3.4 По полученным данным построить графические зависимости токов и напряжений.

### 3.4 Указания по выполнению работы

3.4.1 Собрать электрическую схему, показанную на рисунке 3.2.

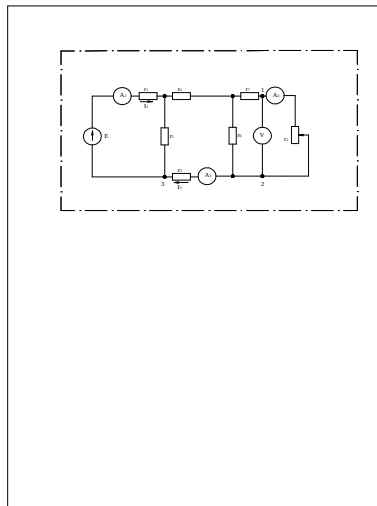


Рисунок 3.3

В качестве  $r_2$  используется ползунковый реостат.

Изменяя величину сопротивления  $r_2$  от нуля до максимума путем перемещений ползунка реостата, снять 4-5 одновременных показаний приборов.

Результаты измерений записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Режим работы	Показания приборов				Вычисленные данные		Примечание
	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$U_{12}$ , В	$r_2$ , Ом	$P_2$ , Вт	
$r_2 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_2 = \infty$							Цепь питается от источника Э.Д.С.
$r_3 \neq 0$ $r_3 = 0$							

$$r_3 = 0$$

3.4.2 Вольтметр подключить к сопротивлению  $r_3$  (точки 2, 3, см. рисунок 3.2). Измерить величины  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $U_3$ , при  $r_3 \neq 0$ ,  $r_3 = 0$ ,  $r_3 = \infty$ .

При оформлении результатов работы необходимо:

определить параметры активного двухполюсника  $r_{ax}$  и  $U_{xx} = E_{\mathcal{E}_2}$ ;

определить коэффициенты  $a$  и  $b$  в линейных уравнениях, описывающих зависимости  $I_1$  от  $I_3$  и  $I_1$  от  $I_2$ . Для этого следует подставить две пары значений указанных токов в уравнения, соответственно,

$$I_1 = a + bI_3, \quad I_1 = c + dI_2;$$

по данным опыта 1 в масштабе построить графические зависимости

$$U_{12}(I_2), \quad I_3(I_1), \quad I_2(r_2), \quad P_2(I_2), \quad \text{где } r_2 = U_{12}/I_2, \quad P_2 = U_{12}I_2 = I_2^2 r_2;$$

используя данные опыта 1, вычислить проводимости  $q_{12}$ ,  $q_{22}$  по формулам

$$q_{22} = I_2/U_{12}, \quad q_{12} = I_1/U_{12}$$

по формуле  $P_{2\max} = \frac{U_{xx}^2}{4r_{\text{вх}}}$  вычислить максимальное значение мощности и сравнить с мощностью на графической зависимости  $P_2(I_2)$ ;

аналитически определить напряжение между точками 2, 3 (см. рисунок 3.2) при разомкнутой ветви с  $r_3$  ( $r_3 = \infty$ ) и сравнить с данными опыта 2;

по данным опыта 3 определить параметры двухполюсника  $r_{\text{вх}}$  и  $U_{12,xx}$ , а также  $P_{2\max}$ .

### Меры безопасности

Различные переключения при выполнении опытов 1, 2, 3 необходимо производить **ПРИ ОТКЛЮЧЕННЫХ** источниках питания, после обязательной проверки преподавателем или лаборантом.

### Контрольные вопросы

1. Какие источники питания называют источниками тока и источниками э.д.с.?
2. Из каких частичных токов состоит ток в конкретной ветви в сложных электрических цепях?
3. В чем заключается принцип линейности электрических

цепей?

4. Сформулируйте понятие двухполюсника.
5. Каким образом можно определить входное сопротивление двухполюсника и напряжение холостого хода?

## Лабораторная работа № 4

### 4.1 Исследование неразветвленной цепи синусоидального тока

Цель работы: экспериментальное определение параметров цепи и исследование явления фазового резонанса при последовательном соединении  $r, L, C$  - элементов.

### 4.2 Краткие теоретические сведения

Рассмотрим неразветвленную электрическую цепь переменного тока с катушкой индуктивности и конденсатором (рис. 4.1)

Последовательное соединение  $r, L, C$  – элементов

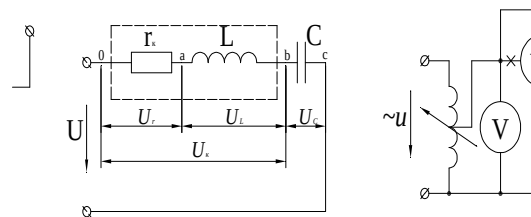


Рисунок 4.1

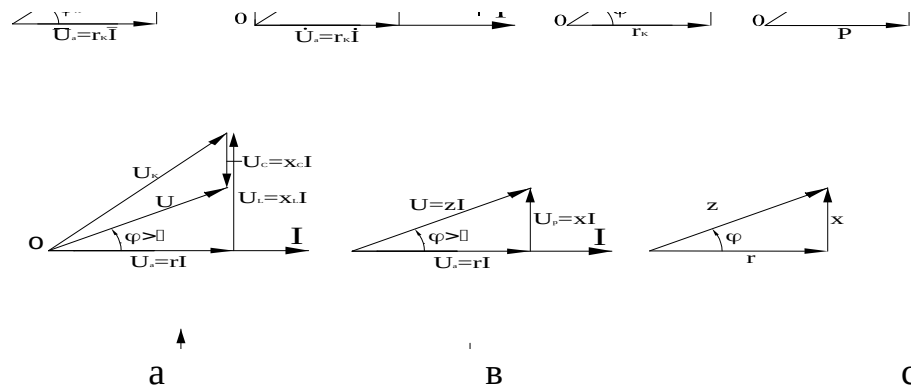
Согласно второму закону Кирхгофа  $\vec{U} = \vec{U}_r + \vec{U}_c$ .

Под действием приложенного напряжения в цепи возникает ток и создается падение напряжения

$$U_{ab} = U_r = Ir, \quad U_L = I x_L, \quad U_c = I x_c \quad (4.1)$$

Построим для данной цепи векторную диаграмму (рис. 1.2.2а), положив для определенности  $X_L > X_C$ . По горизонтальной оси отложим вектор тока  $I$  и совпадающий с ним по фазе вектор активного падения напряжения  $U_a$ . Вектор индуктивного падения напряжения  $U_L$  отложим из конца вектора  $U_a$  вверх под углом  $90^\circ$ ,

так как  $U_L$  опережает  $U_a$  и  $I$  на угол  $\pi/2$ . Емкостное падение напряжения  $U_C$  - отстает по фазе от тока  $I$  на угол  $90^\circ$  и, следовательно, направлено из конца вектора  $U_L$  противоположно индуктивному падению напряжения. Соединив точки 0 и С, получим отрезок ОС, который определит по величине и направлению приложенное к цепи напряжение  $U$ . Катет ас представляет собой разность падений напряжений – индуктивного  $U_L$  и емкостного  $U_C$ . Исходя из вышеизложенного, строим треугольник напряжений со сторонами  $U_a$ ,  $U_p = U_L - U_C$ ,  $U$  (рис. 4.2в).



а – векторная диаграмма, в – треугольник напряжений, с – треугольник сопротивлений при активно-индуктивной нагрузке ( $0 < \varphi < 90^\circ$ )

Рисунок 4.2

$U_a = U_r = rI = U \cos \varphi$  - активная составляющая напряжения, В;  
 $U_p = U_L - U_C = I x_L - I x_C = I (x_L - x_C) = I x = I \sin \varphi$  - реактивная составляющая бнапряжения, В,  
 где  $X = X_L - X_C$  - реактивная сопротивление, Ом.  
 Зная  $U_a$  и  $U_p$  по теореме Пифагора определим приложенное к цепи напряжение

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = I \sqrt{r^2 + x^2} \quad (4.2)$$

где  $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + x^2}$  - полное сопротивление цепи, Ом.

Ток в цепи по закону Ома

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} \quad (4.3)$$

Из (4.2) следует, что сократив на ток  $I$ , из треугольника напряжений получим подобный треугольник со сторонами  $r$ ,  $x$ ,  $z$ , т.е. треугольника напряжений получим подобный треугольник сопротивлений.

Угол сдвига фаз (рис. 4.2 с) между векторами напряжения и тока определяется так

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{U_p}{U_a}. \quad (4.4)$$

Из векторной диаграммы видно, что  $U_L$  и  $U_C$  находятся в противофазе, т.е. могут частично или полностью компенсировать друг друга. Поэтому в такой цепи могут появиться на обкладках конденсатора и на индуктивности напряжения, иногда во много раз превышающие внешнее напряжение. Итак, резонанс напряжений возникает в цепи с последовательным соединением индуктивности, конденсатора и резистора, когда выполняется условие равенства реактивных сопротивлений

$$X_L = X_C, \text{ т.е. } \omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ или } 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.5)$$

Из условия (4.5) следует что добиться резонанса можно изменением параметров  $L$ ,  $C$  или  $f$ .

Очевидно, общее реактивное сопротивление цепи при резонансе будет равно нулю  $X = X_L - X_C = 0$ , а полное сопротивление будет частично активным

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + x^2}, \quad \text{т.е. минимальным.} \quad (4.6)$$

Ток в цепи

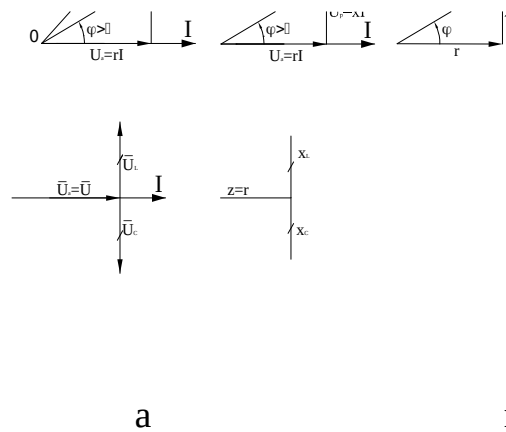
$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{r}. \quad (4.7)$$

при неизменном напряжении источника питания  $U$  достигает максимального значения и совпадает по фазе с приложенным напряжением, т.к.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = 0. \quad (4.8)$$

В этом случае реактивная мощность равна нулю и цепь потребляет от источника только активную мощность.

Так как при резонансе  $U_L = U_C$  и находятся в противофазе, то они компенсируют друг друга (резонанс напряжений). Треугольник напряжений  $U_a$ ,  $U_L - U_C$ ,  $U$  и треугольник сопротивлений  $r$ ,  $X = X_L - X_C$ ,  $z$  вырождаются в линию (рис.4.3 а, в).



а – векторная диаграмма напряжений, в – треугольник сопротивлений при резонансе ( $X_L = X_C$ )

Рисунок 4.3

При резонансе в исследуемой цепи выполняется условие

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{x_L}{r} = \frac{x_C}{r} = Q.$$

т.е. напряжение на каждом из реактивных элементов в  $Q$  раз превышает напряжение на входе цепи ( на резисторе). Величина  $Q$  называется добротностью контура.

Чем больше добротность, тем более острую форму имеют кривые тока и напряжений (рис. 4.4) в цепи.

Зависимости тока, напряжений на элементах цепи от емкости конденсатора



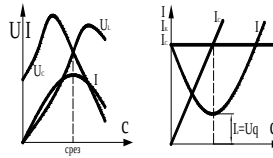


Рисунок 4.4

Другой важной характеристикой последовательного контура является резонансная частота  $\omega_0$ . Из условия  $X_L = X_C$  или  $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$  получается  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Условие резонанса в исследуемой цепи можно также записать в виде  $\omega_0^2 LC = 1$ . Так как исследования в лабораторной работе проводятся при частоте  $f = 50$  Гц и при фиксированном значении  $U$ , то резонансный режим в цепи достигается изменением емкости конденсатора.

Анализ цепи можно проводить и символическим методом. Закон Ома в комплексной форме

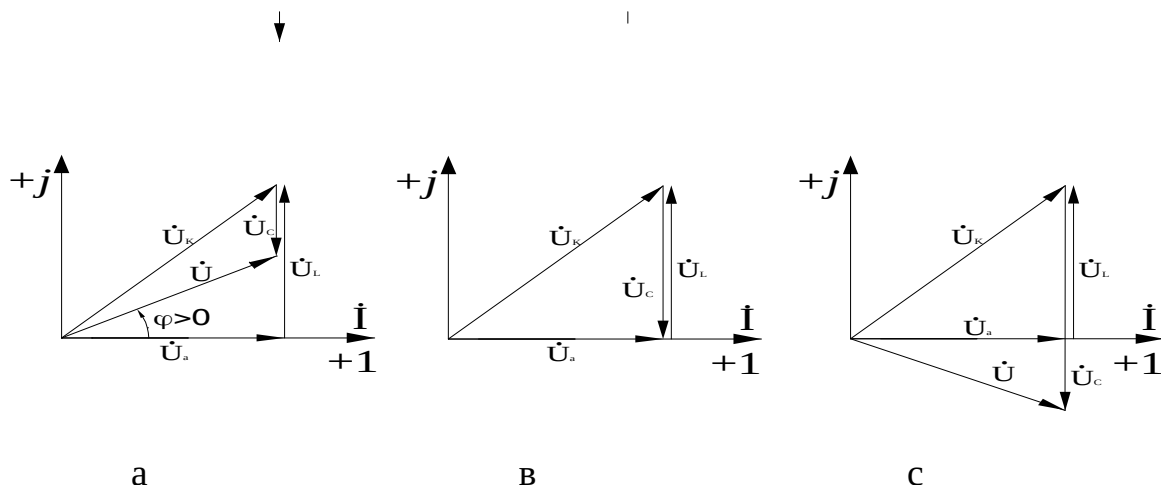
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{U e^{j\psi_u}}{z e^{j\psi_u}},$$

где  $z = r + jx_L - jx_C = r + jx = z e^{j\psi_u}$  - комплекс полного сопротивления цепи.

Для цепи  $r, L, C$  запишем уравнение по второму закону Кирхгофа

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C = r \dot{I} + jx_L \dot{I} + (-jx_C) \dot{I}.$$

Векторные диаграммы напряжений на комплексной плоскости



а – при активно-индуктивной нагрузке, в – при активной нагрузке (резонансе), с – при активно-емкостной нагрузке.

Рисунок 4.5

При последовательном соединении ток в цепи один. Совмещая вектор тока с действительной осью, строим векторную диаграмму напряжений. Сдвиг фаз от соотношения реактивных сопротивлений. Активное сопротивление  $r > 0$  всегда, а  $X > 0$  при  $X_L > X_C$  и  $X < 0$  при  $X_L < X_C$ .

На рис. 4.5 приведены векторные диаграммы:

- а) при  $X_L > X_C$  цепь носит активно-индуктивный характер и напряжение опережает ток на угол  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ;
- в) при  $X_L = X_C$  сопротивление цепи чисто активное (резонанс напряжений) напряжение совпадает по фазе с током  $\varphi = 0$ ;
- с) при  $X_L < X_C$  характер цепи активно-емкостной и напряжение отстает от тока на угол  $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ .

### 4.3 Задание

4.3.1 Для цепи с последовательным соединением  $r$ ,  $L$ ,  $C$  элементов (рисунок 4.6) рассчитать согласно данных таблицы 4.1 величины, указанные в этой же таблице для своего варианта. По результатам расчетов построить векторную диаграмму.

Пункт 4.3.1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе.

Таблица 4.1

	Дано					Определить								
	U, В	I, А	P, Вт	$U_k$ ' В	$U_c$ ' В	$Z$ , Ом	$z_k$ ' Ом	$r$ , Ом	$X_C$ ' Ом	$X_L$ ' Ом	$L$ ' Гн $U_a$ ' В	$U_L$ ' В	$\cos \varphi$	
1	50	1	40	90	50									
2	40	1	30	70	40									
3	30	1	25	77	60									
4	60	1	12	86	30									
5	45	1	30	82	45									
6	35	1	45	83	55									

4.3.2 Снять экспериментально зависимости  $I = f(C)$ ,  $U_k = f(C)$ ,  $U_c = f(C)$  для цепи последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости (см. указания по выполнению лабораторной работы).

4.3.3 Определить из графиков (п. 1) значение резонансной емкости.

4.3.4 Для трех состояний цепи:

резонанса  $C = C_{рез}$  ( $X_C = X_L$ );

после резонанса  $C > C_{рез}$  ( $X_C < X_L$ );

после резонанса  $C < C_{рез}$  ( $X_C > X_L$ ),

а) снять показания приборов и рассчитать параметры цепи;

б) рассчитать значение емкости конденсатора  $C_{рез}$ , при которой имеет место резонанс напряжений, сравнить результаты с п.3 задания;

в) построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и тока исследуемой цепи  $I$  для указанных выше трех режимов.

#### 4.4 Указания по выполнению работы

4.4.1 Собрать электрическую схему, изображенную на рисунке 4.6 – в первую очередь собирается токовая цепь: последовательная обмотка ваттметра, амперметр, катушка индуктивности, конденсатор переменной емкости (в качестве конденсатора переменной емкости в работе используется магазин конденсаторов). Конденсатор полагают идеальным ( $r_c = 0$ ), а катушку индуктивности - реальной, т.е. содержит активное и индуктивное сопротивления.

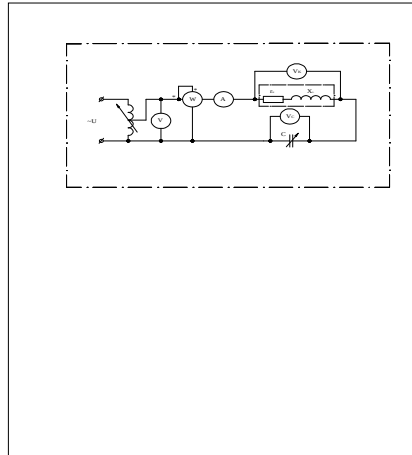


Рисунок 4.6 – Схема неразветвленной цепи с элементами  $r$ ,  $L$ ,  $C$ .

4.4.2 Установить автотрансформатором заданное преподавателем напряжение  $U$  на входных зажимах цепи и , поддерживая его постоянным, снять опытным путем зависимости  $I = f(C)$ ,  $U_C = f(C)$ ,  $U_L = f(C)$ . При экспериментальном снятии зависимостей величину подключаемой емкости изменять с помощью тумблеров с обязательным установлением  $C_{рез} (I = I_{max})$ . Результаты измерений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

$C$ , мкФ $C < C_{рез}$	$C < C_{рез}$	$C = C_{рез}$	$C > C_{рез}$	$C > C_{рез}$	
$U$ , В					
$I$ , А					
$U_C$ , В					
$U_L$ , В					

4.4.3 При заданном напряжении, изменяя с помощью тумблеров величину подключаемой к схеме емкости, добиться резонанса  $I = I_{max}$ , определив этим экспериментально и величину резонансной емкости  $C_{рез}$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.3.

Поддерживая неизменным входное напряжение  $U$ , снять показания приборов при  $C < C_{рез}$  и  $C > C_{рез}$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.3.

4.4.4 По данным измерений рассчитать величины, указанные в таблице 4.3., используя формулы напряжений.

Таблица 4.3

	Измерено						Вычислено						
	$U_1$ , В	$U_K$ , В	$U_C$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$C$ , мкФ	$z$ , Ом	$r$ , Ом	$X$ , Ом $Y$ , Ом	$g$ , Ом	$b$ , Ом	$\varphi$ , град	$Q$ , вар
1													
2													
3													

4.4.5 Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений для указанных выше трех режимов.

### Контрольные вопросы

1. Запишите выражение полного сопротивления цепи при последователе соединении  $r$ ,  $L$ ,  $C$  - элементов.
2. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
3. Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе?
4. Изменением каких параметров можно настроить цепь в резонанс?
2. Как по показаниям приборов определить, настроена ли в резонанс электрическая цепь?
5. Почему при резонансе напряжения на катушке  $r$ ,  $L$  и на конденсаторе  $C$  не одинаковы?
7. При каком условии напряжения на реактивных элементах цепи могут превышать входное напряжение?

## Лабораторная работа № 5

### 5.1 Разветвленная цепь синусоидального тока

Цель работы: экспериментальное определение параметров цепи и исследование явления фазового резонанса при параллельном соединении катушки индуктивности и емкости.

### 5.2 Краткие теоретические сведения

Примером разветвленной цепи переменного тока является параллельное соединение катушки индуктивности  $r, L$ , конденсатора  $C$ . (рис. 5.1).

Параллельное соединение катушки индуктивности  $r, L$ , конденсатора  $C$ .

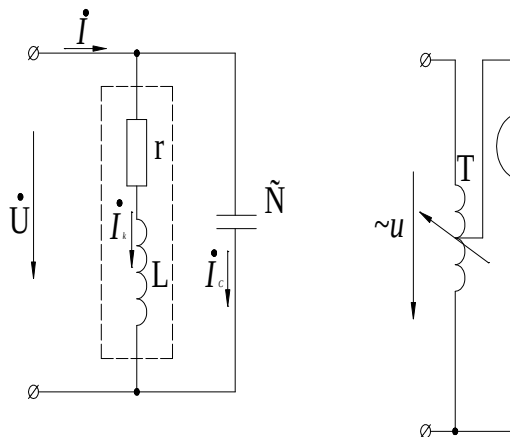


Рисунок 5.1

Под действием приложенного напряжения  $U$  ток в ветви с катушкой индуктивности по закону Ома равен

$$\frac{U}{z_k} = \frac{U}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}},$$

где  $U$  – действующее значение приложенного напряжения, В;

$z = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$  - полное сопротивление ветви с катушкой индуктивности, Ом.

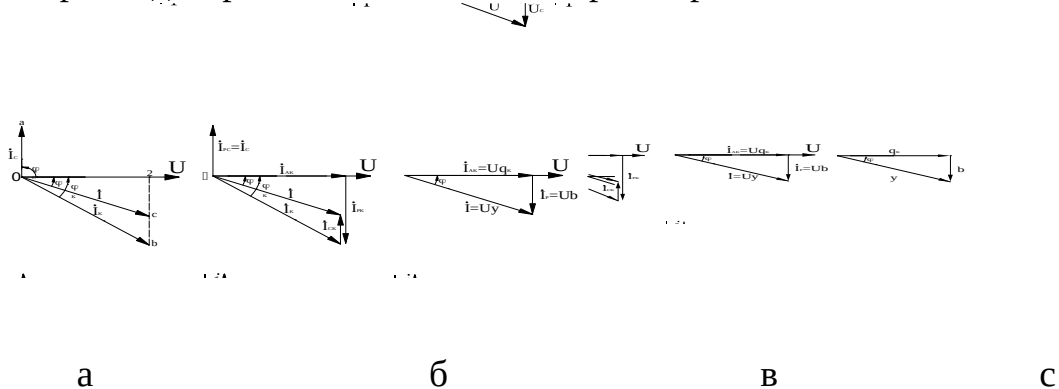
А ток в ветви с конденсатором

$$I_c = \frac{U}{z_c} = \frac{U}{x_c},$$

где  $z_c = x_c$  - полное сопротивление ветви с конденсатором, равное емкостному сопротивлению конденсатора, т.к. последний полагают идеальным, т.е. пренебрегают тепловыми (активными) потерями в диэлектрике  $r_c = 0$ . Тогда ток в общей части может быть найден по первому закону Кирхгофа

$$\vec{I} = \vec{I}_c + \vec{I}_k$$

Так как при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора напряжение на ветвях схемы одно и то же, то построение векторных диаграмм начинают с вектора напряжения  $\vec{U}$ .



а, б – векторные диаграммы, в – треугольник токов, г – треугольник проводимостей при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.

Рисунок 5.2

Из точки 0 вверх под углом  $\varphi_c = 90^\circ$  отложим вектор тока  $\vec{I}_c$  (отрезок  $0a$ ), т.к. ток на емкости опережает напряжение  $U$  на угол  $\pi/2$ ; а под углом  $\varphi_k$  в сторону отставания от вращения векторов (по часовой стрелке) отложим вектор тока  $\vec{I}_k$  (отрезок  $0b$ ). Сложив геометрически (по правилу параллелограмма) вектора токов  $\vec{I}_c$   $\vec{I}_k$  получим вектор тока  $\vec{I}$  в неразветвленной части цепи. Угол  $\varphi$  будет показывать угол сдвига фаз между векторами тока  $\vec{I}$  и напряжения  $\vec{U}$ . Из этой векторной диаграммы видно, что наличие конденсатора снизило ток в неразветвленной части цепи до величины  $I$ , меньшей  $\vec{I}_k$ . Если подобрать емкость  $C$  такой величины, чтобы  $0a = b/2$ , т.е. чтобы  $\vec{I}_c = \vec{I}_{pk}$ , то ток будет  $I$  достигнет минимальной величины, а угол  $\varphi$  будет равен нулю. Можно сложение векторов  $\vec{I}_c$  и  $\vec{I}_k$  проводить и аналитически. В этом случае вектор тока разлагают на две составляющие: активную и реактивную (рис. 5.2б). Активная составляющая тока есть проекция вектора тока на направление

вектора напряжения,  $I_a = I \cos \varphi$ , где  $\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{P}{UI}$ , а реактивная составляющая есть проекция вектора тока на ось, перпендикулярная напряжению  $I_p = I \sin \varphi$  где

$$\sin \varphi = \frac{x}{z} = \frac{Q}{UI}.$$

Для реальной катушки индуктивности:  
активная составляющая тока

$$I_{ak} = I_k \cos \varphi_k = \frac{U}{z_k} \cdot \frac{r_k}{z_k} = \mathcal{L} \quad (5.1)$$

где  $q_k = \frac{r_k}{z_k^2}$  - активная проводимость ветви с катушкой индуктивности, См;  
реактивная составляющая тока

$$I_{pk} = I_k \sin \varphi_k = \frac{U}{z_k} \cdot \frac{x_k}{z_k} = U \mathcal{B}_k, \quad (5.2)$$

где  $\mathcal{B}_k = \frac{x_k}{z_k^2}$  - индуктивная проводимость ветви с катушкой индуктивности, См.

Для идеального конденсатора  
активная составляющая тока  $I_a$  равна нулю, т.к.  $r_c = 0$ , реактивная составляющая тока

$$I_{pc} = I_c = \frac{U}{z_c} = \frac{U}{x_c} = U \mathcal{B}_c, \quad (5.3)$$

где  $\mathcal{B}_c = \frac{1}{x_c}$  - емкостная проводимость конденсатора, См.

при параллельном соединении нескольких ветвей, в одних из которых имеются катушки индуктивности, а в других – емкости, эквивалентная (или общая) активная проводимость

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots = \sum q_i;$$



а эквивалентная (или общая) реактивная проводимость

$$b = \Sigma b_L - \Sigma b_C.$$

Активная составляющая тока в неразветвленной части цепи в нашей лабораторной работе

$$I_a = I_{ak} + I_{ac} = I_{ak} = U q,$$

реактивная составляющая этого тока

$$I_p = I_{pk} - I_{pc} = U b_k - U b_c = U (b_k - b_c) = U b. \quad (5.4)$$

Зная  $I_a$  и  $I_p$ , по теореме Пифагора определим общий ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(U \cdot q)^2 + (U \cdot b)^2} = U \sqrt{q^2 + b^2} = U \cdot y, \quad (5.5)$$

где  $y = \sqrt{q^2 + b^2}$  - полная проводимость всей цепи, Ом.

Из выражения (5.5) следует, что сократив на напряжение  $U$ , из треугольника токов (рис. 5.2в) получим подобный треугольник со сторонами  $q$ ,  $b$ ,  $y$ , т.е. треугольника проводимостей (рис. 5.2г).

Уголь сдвига фаз

$$\varphi = \arctg \frac{b}{q} = \arctg \frac{I_p}{I_a}. \quad (5.6)$$

Анализируя выражение (5.4), можно сделать вывод что цепи, состоящей из параллельно соединенных катушки индуктивности и емкости  $I_c$  и реактивная составляющая тока в катушке  $I_{pk}$ , находясь в противофазе, могут частично или полностью компенсировать друг друга.

Итак, резонанс токов возникает в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора, когда выполняется условие равенства нулю общей реактивной проводимости цепи

$$b = b_k - b_c = \frac{X_k}{Z_k^2} - \dots \quad (5.7)$$

$$\text{Откуда } C_{\text{рез}} = \frac{x_k \cdot 10^6}{z_k^2 \omega}.$$

Из условия (5.7) следует, что добиться резонанса можно изменением параметров  $L$ ,  $C$ ,  $\omega$ .

При резонансе полная проводимость цепи чисто активная,  $y = g$ . В результате входной ток (ток неразветвленной части цепи) равен активной составляющей тока ветви  $r L$  с входным напряжением, т.е. цепь воспринимается источником как чисто активная.

При резонансе токов входной ток  $I = U \cdot q$  минимален, т.к. во всех остальных режимах цепи  $I = U \cdot q = \sqrt{q^2 + (e_L - e_C)^2}$ ,  $y > q$  т.е. при резонансе токов наблюдается экстремум входного тока цепи, но в отличие от резонанса напряжений здесь минимум тока.

Для характеристики резонансных свойств цепи вводят понятие добротности контура  $Q$

$$Q = \frac{I_{\text{рк}}}{I} = \frac{I_c}{I} = \frac{e_k}{q} = \frac{e_c}{q},$$

Которая показывает во сколько раз при резонансе токов реактивные составляющие токов в параллельных ветвях больше входного тока цепи. Чем больше добротность, тем более острую форму имеет зависимость общего тока в цепи (рис. 5.3).

Зависимости  $I=f(C)$ ,  $I_k=f(C)$ ,  $I_c=f(C)$  параллельной цепи

е-1

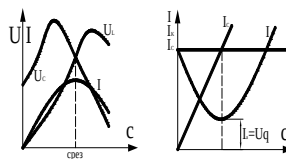


Рисунок 5.3

При резонансе токов потребляет от источника только активную мощность.

Анализ цепи удобно проводить символическим методом.

По закону Ома комплекс действующего значения тока в катушке



общего тока отстает от вектора напряжения на угол;

б) при  $\omega_k = \omega_c$  проводимость цепи носит чисто активный характер (резонанс токов); вектор общего тока совпадает по фазе с вектором напряжения  $\varphi = 0^\circ$ ;

в) при  $\omega_k < \omega_c$  характер цепи активно-емкостной и вектор общего тока опережает вектор напряжения на угол  $90^\circ < \varphi < 0^\circ$ .

### 5.3 Задание

5.3.1 Для цепи с параллельным соединением катушки индуктивности  $r$ ,  $L$  и конденсатора  $C$  (рисунок 5.5) рассчитать согласно данных табл. 5.1 величины, указанные в этой же таблице для своего варианта. По результатам расчетов построить векторную диаграмму. Пункт 1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе.

Таблица 5.1

	Дано					Определить								
	$U$ , В	$I$ , А	$I_k$ , А	$I_c$ , А	$P$ , Вт	$I_{ак}$ , А	$I_{рк}$ , А	$q_k$ , СМ	$\omega_k$ , М	$\omega_c$ , М	$\omega$ , М	$Y$ , СМ	$\cos \varphi$	
1	150	0,5	0,9	0,6	30									
2	100	0,25	0,58	0,4	40									
3	120	0,35 0,45	0,5	50										
4	170	0,6	0,55	0,6	35									
5	130	0,4	0,5	0,45	45									
6	140	0,45	0,6	0,7	40									

5.3.2 Снять экспериментально зависимости  $I_k = f(C)$ ,  $I_c = f(C)$ ,  $I = f(C)$  для цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости (см. указания по

выполнению лабораторной работы).

5.3.3 Определить из графика  $I = f(C)$  (п.1) значение резонансной емкости  $C_{\text{д.а.с.}}$ .

5.3.4 Для трех режимов цепи

резонанса  $C = C_{\text{рез}}$  ( $\varphi_C = \varphi_K$ );

после резонанса  $C > C_{\text{рез}}$  ( $\varphi_C > \varphi_K$ );

до резонанса  $C < C_{\text{рез}}$  ( $\varphi_C < \varphi_K$ ),

а) снять показания приборов и вычислить величины, указанные в табл. 5.1;

б) рассчитать значение емкости конденсатора  $C_{\text{рез}}$ , при которой имеет место резонанс токов, сравнить результаты с пунктом 2 задания;

в) построить в масштабе векторные диаграммы токов и треугольники проводимостей для указанных выше трех режимов.

#### 5.4 Указания по выполнению работы

5.4.1 Собрать электрическую схему, изображенную на рисунке 5.5.

В качестве конденсатора переменной емкости в лабораторной работе используется магазин конденсаторов. Конденсатор полагают идеальным ( $C$ ), а катушку индуктивности - реальной ( $rL$ ).

Схема разветвленной  $r, L, C$  цепи

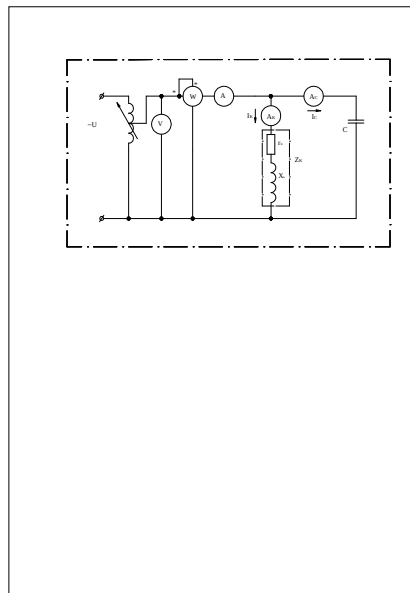


Рисунок 5.5

5.4.2 Установить автотрансформатором заданное преподавателем напряжение  $U$  на

входных зажимах цепи и, поддерживая его постоянным, снять опытным путем зависимости  $I_k = f(C)$ ,  $I_c = f(C)$ ,  $I = f(C)$ . При экспериментальном снятии зависимостей величину подключаемой емкости изменить с помощью тумблеров с обязательным установлением  $C_{рез}$ , т.е. добиться минимального значения тока  $I = I_{min}$ .

Результаты измерений занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

C, мкФ	$C < C_{рез}$	$C < C_{рез}$	$C < C_{рез}$	$C = C_{рез}$	$C > C_{рез}$	$C > C_{рез}$	$C > C_{рез}$
$I_k, A$							
$I, A$							
$I_c, A$							

5.4.3 При неизменном входном напряжении U снять показания приборов при  $C = C_{двс}$ ,  $\tilde{N} > C_{двс}$  и  $\tilde{N} < C_{двс}$ . Результаты измерений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

	Измерено						Вычислено										
	U, В	I, А	$I_k, A$	$I_c, A$	P, Вт	C, мкФ	$I_{ак}, A$	$I_{рк}, A$	$I_{рс}, A$	$q_k, Cм$	$\epsilon_k, Cм$	$\epsilon_c, Cм$	$\epsilon, Cм$	Y, Cм	cos φ	Q, Вар	C, мкФ
1																	
2																	
3																	
4																	

5.4.4 По данным измерений рассчитать величины, указанные в табл. 5.3.

5.4.5 Векторные диаграммы токов и треугольники проводимостей построить по данным таблицы 5.2. Т.к. при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора напряжение на ветвях схемы одно и то же, то построение векторных диаграмм начинают с L вектора напряжения U. Векторные диаграммы токов можно построить графически:

а) зная показания 3-х амперметров (построение треугольника по трем сторонам методом засечек согласно уравнения, составленного по первому закону Кирхгофа,  $I_c + I_k = I$

или в комплексной форме  $\underline{I}_c + \underline{I}_k = \underline{I}$ ;

б) рассчитав аналитически составляющие токов  $I_{ак}$ ,  $I_{рк}$ ,  $I_{рс}$  по формулам.

## Контрольные вопросы

1. Как определить активную, реактивную и полную проводимости цепи, состоящей из параллельного соединения двух ветвей. В одной из которых реальная катушка  $r, L$ , а в другой - емкость  $C$ ?
2. При каких условиях в электрических цепях возникает резонанс токов?
3. Чему равна полная проводимость цепи при резонансе?
4. Изменением каких параметров можно настроить цепь в резонанс?
5. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса токов?
6. Где на практике используется явление резонанса токов?

### Лабораторная работа № 6

#### 6.1 Исследование электрической цепи со взаимной индукцией

Цель работы: исследовать явление взаимной индукции двух магнитосвязанных катушек с током при их различном соединении.

#### 6.2 Краткие теоретические сведения

Явлением взаимоиндукции называется наведение э.д.с. в одном из контуров (катушек) при изменении электрического тока в другом контуре. Наведенная э.д.с. называется э.д.с. взаимоиндукции и обозначается  $e_m$ , а контуры – магнитосвязанными.

Известно, что при протекании электрического тока по любому контуру (катушке) вокруг него возникает магнитный поток. Если два магнитосвязанных контура расположить рядом и по одному из них пропустить электрический ток, то часть образовавшегося при этом магнитного потока ( $\Phi_{12}$ ) вокруг этого контура будет пронизывать второй контур. Схематически это показано на рисунке 6.1. На разомкнутых зажимах второго контура индицируется напряжение

$$U_{2M} = -e_{2M} = M \frac{di}{dt} = \frac{d\psi}{dt} = W_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt},$$

где  $M$  – взаимная индуктивность контуров, Гн;

$\psi_{12}$  – потокосцепление первого контура, пронизывающее вторую катушку, Вб;

$W_2$  – количество витков во втором контуре;  
 $\Phi_{12}$  – магнитный поток, пронизывающий второй контур, Вб.

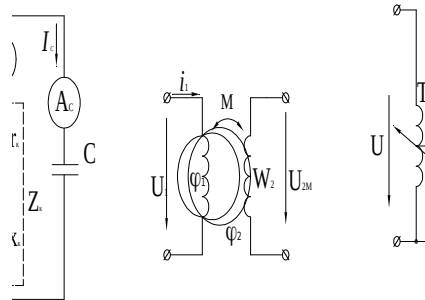


Рисунок 6.1

Положительное направление тока  $i$  и магнитного потока  $\Phi_1$ , равно сумме  $\Phi_{12} + \Phi_{11}$ , соответствует правилу правоугового винта.

Степень магнитной связи двух контуров характеризуется коэффициентом связи

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1, \quad (6.1)$$

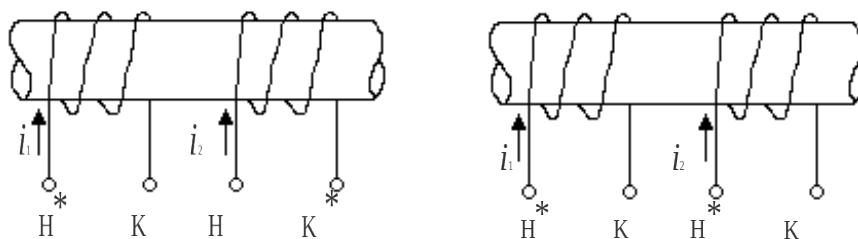
где  $M$  – взаимная индуктивность, Гн;

$L_1$  и  $L_2$  – собственные индуктивности первого и второго контуров, Гн.

В цепях с магнитосвязанными контурами полная индуктивность первого катушки равна

$$L = L_1 \pm M, \quad (6.2)$$

Знак плюс или минус в (6.2) зависит от согласного или встречного включения контуров в цепь, что поясняется на рис. 6.2



а – согласное включение; б – встречное включение.



Рисунок 6.2

Если токи двух магнитосвязанных контуров ориентированы одинаково относительно одноименных зажимов (например, относительно начала катушек, которые на схемах обозначаются звездочками или точками), такое включение называется согласным (рис. 6.2а). при согласном включении  $\Phi_{11}$  и  $\Phi_{12}$  направлены одинаково и суммируются, а при несогласном эти потоки направлены встречно и вычитаются. Поэтому в выражении (6.2) при согласном включении берется плюс, при встречном – минус.

При последовательном соединении двух магнитосвязанных контуров полная индуктивность цепи  $L$  и индуктивное сопротивление  $X_L$  определяется выражениями

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M; \quad X_L = \omega(L_1 + L_2 \pm 2M). \quad (6.3)$$

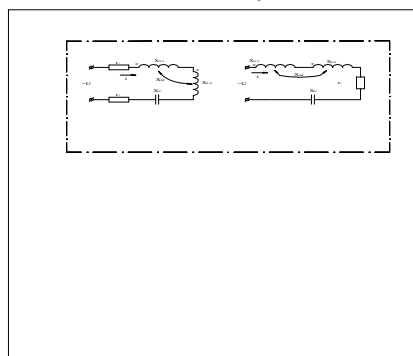
Знак плюс для согласного включения, минус – для встречного. Отсюда индуктивное сопротивление цепи, как полное, при согласном больше, чем при встречном. Это определение используется при включении для определения одноименных зажимов.

### 6.3 Задание

6.3.1. Для заданной схемы определить комплекс общего сопротивления схемы (выполняется во внеаудиторное время).

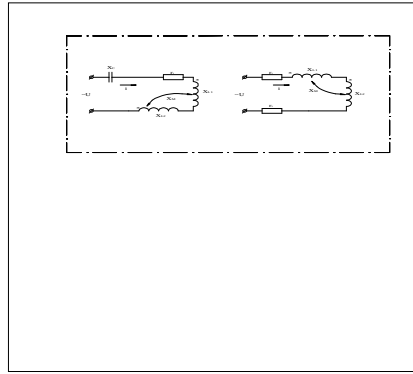
1.

2.



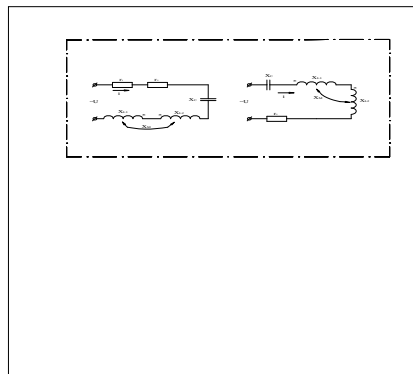
3.

4.



5.

6.



Номер схемы соответствует номеру бригады.

	Номер группы	$r_1$	$r_2$	$X_C$	$X_{L1}$	$X_{L2}$	$X_{L3}$
		Ом					
ЭПП	1	5	5	10	8	6	2
	2	1	3	20	2	3	1
	3	2	7	8	1	4	3
	4	5	6	7	2	3	4
	5	7	8	19	-	6	2
	6	10	7	8	7	8	3
	7	15	5	3	4	6	5
	8	2	4	5	3	4	1
ЭФ	1	10	6	4	3	2	5
	2	8	2	10	6	3	2
	3	4	3	2	3	1	4
	4	3	2	1	2	3	4

6.3.2 Опытным путем определить активное, индуктивное и полное сопротивление катушек -  $r_k$ ,  $X_L$ ,  $z_k$ .

6.3.3 По опытным данным вычислить величину собственной  $L$  и взаимной  $M$  индуктивностей для двух магнитосвязанных катушек.

6.3.4 Построить зависимости э.д.с. взаимоиндукции от расстояния между катушками.

#### 6.4 Указания по выполнению работы

6.4.1 Собрать электрическую схему, показанную на рисунке 6.3, позволяющую определить параметры катушек ( $r_k$ ,  $X_L$ ,  $z_k$ ).

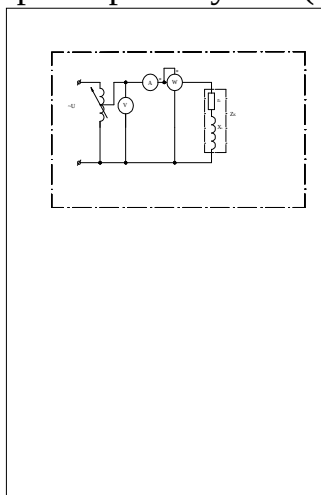


Рисунок 6.3

Изменяя входное напряжение, снять показания трех приборов для обеих катушек. Результаты измерений записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1.

	Показания приборов			Вычисленные значения			
	U, В	I, А	P, Вт	$r_k$ , Ом	$X_L$ , Ом	$z_k$ , Ом	L, Гн
1 катушка							
2 катушка							

6.4.2 Собрать электрическую схему, показанную на рисунке 6.4.

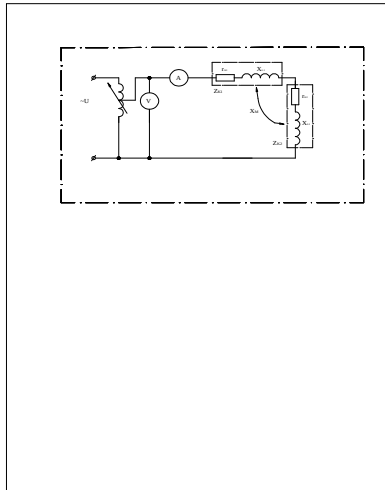


Рисунок 6.4

Измерить токи и напряжение при согласном и встречном включении катушек при одном значении напряжения. Результаты измерений записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

	Вид включения	Показания приборов		Вычисленное значение		
		I, А	U, В	r, Ом	X, Ом	Z, Ом
1						
2						

6.4.3 Собрать электрическую схему, показанную на рисунке 6.3, для ознакомления и изучения явления взаимной индукции.

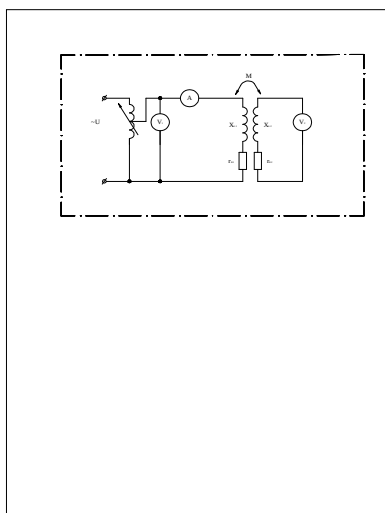


Рисунок 6.5

Изменяя расстояние между катушками, снять показания

приборов и определить взаимную индуктивность  $M = \frac{U_2}{\omega I}$ .

Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Расстояние	Показания приборов			Вычисленное значение
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I, А$	$M, Гн$
1				
2				
3				
.				

При оформлении результатов работы необходимо:

- определить параметры катушек по формулам

$$U = Iz, P = I^2 r, z = \sqrt{r^2 + X^2}, X_L = \omega L;$$

- построить графики  $M = f(l)$  и  $e_2 = f(l)$ , учитывая, что при согласном включении катушек индуктивное сопротивление всей цепи  $X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$ , при встречном  $X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M)$ .

Разность  $X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}} = 4\omega M$ , следовательно,

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}$$

где  $\omega$  - угловая частота, 1/с.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение явлению взаимоиндукции.
2. Каково направление магнитных потоков при согласном и встречном включении катушек?
3. Как найти одноименные зажимы двух катушек опытным путем, если установить взаимное расположение их и направление намотки витков не представляется возможным?
4. Чему равна полная индуктивность катушки со взаимной индукцией?
5. Как определить опытным путем взаимную индуктивность?

## Лабораторная работа № 7

### 7.1 Исследование линейных электрических цепей

## синусоидального тока при переменных параметрах элементов цепи

Цель работы: экспериментальное и аналитическое построение круговых диаграмм в неразветвленной и разветвленной цепях синусоидального тока.

### 7.2 Краткие теоретические сведения

Круговая диаграмма токов или напряжения – это дуга окружности, являющаяся геометрическим методом концов вектора тока или напряжения при изменении по модулю какого – либо сопротивления электрической цепи и при постоянстве других параметров цепи (модули остальных сопротивлений цепи, частота и Э.Д.С. источников).

Круговые диаграммы позволяют проводить графический анализ работы электрических цепей.

Рассмотрим построение круговой диаграммы тока  $\dot{I}$  на примере схемы рис. 7.1.

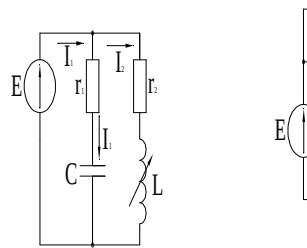


Рисунок 7.1

Ток в неразветвленной части схемы согласно первому закону Кирхгофа определяется по формуле

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (7.1)$$

Токи  $\dot{I}_1$  и токи  $\dot{I}_2$  рассчитываются по закону Ома в комплексной форме

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{r_1 - jx_c}, \quad (7.2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{r_1 + jx_c} = \frac{\frac{\dot{E}}{r_2}}{1 + \frac{x_L}{r_2} e^{j90^\circ}} = \frac{\dot{I}_{2K}}{1 + \frac{x_L}{r_2} e^{j90^\circ}}, \quad (7.3)$$

где  $\dot{I}_{2K} = \frac{\dot{E}}{r_2}$  - ток во второй ветви при  $x_L = 0$ , то есть при коротком замыкании на индуктивности.

Выражение

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_{2K}}{1 + \frac{x_L}{r_2} e^{j90^\circ}} = \frac{\dot{I}_{2K}}{1 + \frac{x_L}{r_2} e^{j\psi}}. \quad (7.4)$$

является уравнением окружности в комплексной форме записи.

После подстановки (7.2) и (7.4) в (7.1) получаем, что ток  $\dot{I}$  является величиной переменной и геометрическим местом концов вектора тока  $\dot{I}$  является дуга окружности

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{r_1 - jx_c} - \frac{\dot{I}_{2K}}{1 + \frac{x_L}{r_2} e^{j90^\circ}} \quad (7.5)$$

Порядок построения круговой диаграммы (рис. 7.2):

- 1) выбираем масштабы тока, напряжения, сопротивления;
- 2) откладываем в масштабе вектор  $\underline{k}_0$  - это хорда окружности OF
- 3) откладываем от начала OF по его направлению отрезок OE, равный в масштабе постоянному параметру а (на рис. 4.1, это  $r_2$ )
- 4) под углом  $(-\psi) = -(\beta - \alpha)$  к вектору  $\underline{k}_0$  проводим линию EN изменяющегося параметра в, принимаем что  $\psi > 0$
- 5) проводим линию OD  $\perp$  EN;
- 6) из середины вектора  $\underline{k}_0$  (отрезок OF) восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с отрезком OD; точка пересечения этих линий - центр искомой окружности: при этом рабочая часть





и по ней определить показания приборов при определенном значении сопротивления  $X_1$  в зависимости от номера бригады (табл. 7.1)

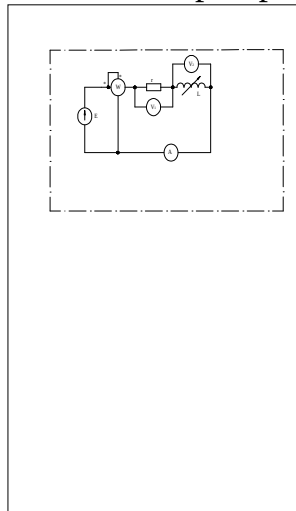


Рисунок 7.3

Таблица 7.1

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$\underline{E}$ , В	$100e^{j30^\circ}$	$50e^{-j45^\circ}$	$60e^{-j50^\circ}$	100	$40e^{j60^\circ}$	$80e^{j20^\circ}$	$25e^{j30^\circ}$	50
$r$ , Ом	50	5	30	25	10	20	5	10
$X_L$ , Ом	30	10	20	15	5	10	10	20

Пункт 7.3.1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе.

7.3.2 Снять показания всех приборов рисунка 7.2 при изменении  $X_C$  от 0 до  $\infty$ .

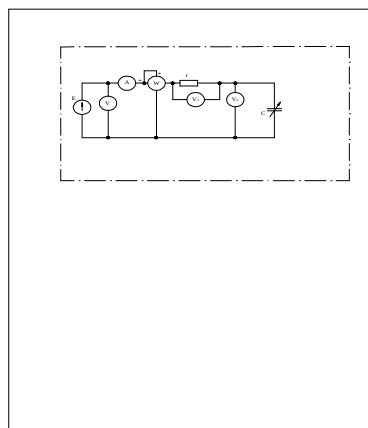


Рисунок 7.4

7.3.3 Построить круговую диаграмму тока  $I$  цепи рисунка 7.2 по экспериментальным данным.

7.3.4 Построить круговую диаграмму тока  $I$  схемы рисунка 7.2 по расчетным данным.

7.3.5 Построить на одном графике зависимости  $I(C)$  по экспериментальной и расчетной круговым диаграммам, сравнить их.

7.3.6 По круговой диаграмме рассчитать активную мощность при соответствующих значениях  $X_C$  и сравнить с экспериментальными данными.

Экспериментальные и расчетные данные свести в табл.7.2.

Таблица 7.2

C, мкФ	Измерено					Вычислено				
	I, А	U, В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	P, Вт	r, Ом	$X_C$ , Ом	P, Вт	$z = U/I$ , Ом	$z = \sqrt{r^2 + X_C^2}$ , Ом

7.3.7 Построить круговую диаграмму тока  $I$  при изменении  $X_C$  от 0 до  $\infty$  в схеме рисунка 7.5.

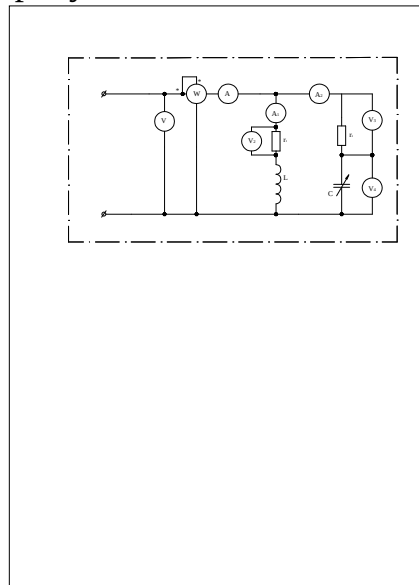


Рисунок 7.5

7.3.8 По круговой диаграмме определить два-три значения активной мощности P цепи и сравнить с показанием ваттметра при одних и тех же значениях  $X_C$ .

7.3.9 Построить зависимость  $I(C)$ .

7.4 Указания по выполнению работы

7.4.1 При выполнении пункта 4 задания предварительно рассчитать  $r$ ,  $X_C$  по показаниям приборов.

7.4.2 Перед выполнением пункта 7 задания экспериментально определить параметры катушки.

7.4.3 Для построения круговой диаграммы в пункте 7 задания снять показания всех приборов и произвести необходимые расчеты; экспериментальные и расчетные данные свести в табл.7.3.

Таблица 7.3

C, мкФ	Измерено								Вычислено			
	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_4$ , В	$I$ , А	$I_1$ , А	$I_2$ , А	P, Вт	$r_1$ Ом	$r_2$ Ом	$\cos \varphi_{ep}$	P, Вт

### Контрольные вопросы

1. Что такое круговая диаграмма?
2. Какие величины и как можно рассчитать по круговой диаграмме?
3. Построить векторную диаграмму напряжений по экспериментальным данным схемы

## Лабораторная работа № 8

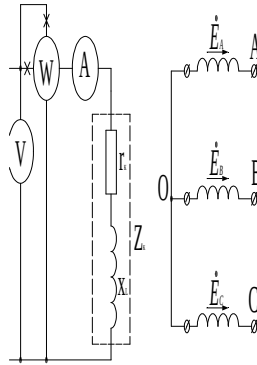
### 8.1 Трехфазная цепь. Соединение звезда.

Цель работы: исследовать закономерности изменения фазных токов, напряжения смещения нейтрали и тока в нулевом проводе трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нулевым и без нулевого провода при изменении величины и характера нагрузки.

### 8.2 Краткие теоретические сведения

Соединение фазных обмоток трехфазного генератора, при котором одноименные зажимы (например, концы X, Y, Z) соединяются в одну общую точку, называется звездой (рис.8.1). Общая точка трех обмоток генератора называется нулевой или нейтральной точкой (нейтралью) и обозначается буквой O (см. рис.8.1).

Нейтральная или нулевая точка (нейтраль) приемника (нагрузки) при соединении его фаз звездой обозначается буквой O` (рис.8.3)



$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  - э.д.с. фаз генератора (трехфазного источника).

Рисунок 8.1

Провод, соединяющий нейтраль генератора и приемника, называют нейтральным или нулевым.

Напряжение между нейтралами генератора и приемника называют напряжением смещения нейтрали обозначают  $U_{O'O}$  или  $U_N$ .

Если сопротивление нулевого провода мало ( $Z_0 \ll Z_A; Z_B; Z_C$ ), т.е.  $Z_0 \approx 0$ , (см. рис. 8.3), то независимо от характера нагрузки в фазах потенциалы точек  $O'$  и  $O$  практически равны. В этом случае пренебрегают сопротивлением нулевого провода. При расчетах выделяют три обособленных контура, образуемые э.д.с. фазы генератора, линейным проводом, фазой нагрузки и нулевым проводом. Линейные токи в контурах определяют по закону Ома. (см. рис. 8.3)

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C}. \quad (8.1)$$

Здесь  $Z_A, Z_B, Z_C$  - комплексные значения сопротивления соответственно в фазах А, В и С.  $E_A, E_B, E_C$  - э.д.с. фаз.

Ток в нулевом проводе равен геометрической сумме фазных токов (см. рис. 8.3) по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (8.2)$$

Если сопротивление нагрузки в фазах одинаково (нагрузка равномерная), то ток в нулевом проводе отсутствует, т.к. сумма равных

по модулю токов в симметричной трехфазной системе равна нулю.

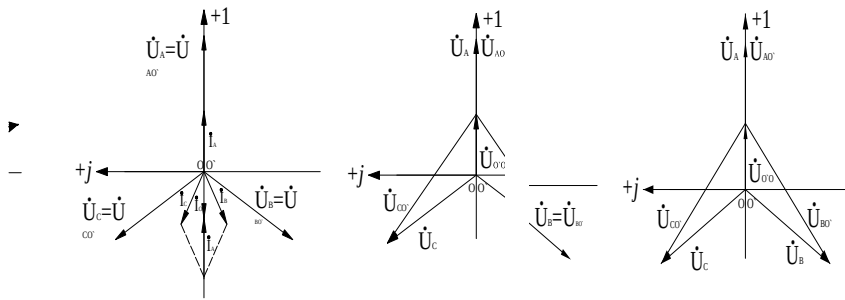
При неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе отличен от нуля.

На рис 8.2а на комплексной плоскости показана векторная диаграмма токов и напряжений для соединения звезда с нулевым проводом при неравномерной разнохарактерной нагрузке в фазах, а именно:

$$\underline{z}_A = r, \quad \underline{z}_B = j\omega L = jx_L, \quad \underline{z}_C = -j \frac{1}{\omega C} = -jx_C$$

$$\underline{z}_A \neq \underline{z}_B \neq \underline{z}_C$$

Векторная диаграмма токов и напряжений для трехфазной цепи соединением звезда



а – с нулевым проводом; б – без нулевого провода.

Рисунок 8.2

При отсутствии нулевого провода, а также при учете сопротивления нулевого провода  $\underline{z}_0$ , расчет трехфазной цепи производится по методу двух узлов. Узлами являются нейтральные точки генератора и нагрузки, точки 0 и 0'. Напряжение между узлами 0 и 0' называют напряжением смещения нейтрали и определяют его по формуле

$$\dot{U}_{0'0} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (8.3)$$

где  $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{z}_A}$ ,  $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{z}_B}$ ,  $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{z}_C}$  - проводимости фаз,

$\underline{z}_A$ ,  $\underline{z}_B$ ,  $\underline{z}_C$  - сопротивление фаз нагрузки.

При равномерной нагрузке  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$  и  $\dot{U}_{0'0} = 0$ .

При неравномерной нагрузке  $\dot{U}_{0'0} \neq 0$  и фазные напряжения нагрузки  $\dot{U}_{A0'}$ ,  $\dot{U}_{B0'}$ ,  $\dot{U}_{C0'}$  определяют из уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для трех обособленных контуров

$$\dot{E}_A = \dot{U}_{A0'} + \dot{U}_{0'0} \Rightarrow \dot{U}_{A0'} = \dot{E}_A - \dot{U}_{0'0}, \dot{U}_{B0'} = \dot{E}_B - \dot{U}_{0'0}, \dot{U}_{C0'} = \dot{E}_C - \dot{U}_{0'0} \quad (8.4)$$

Комплексные значения тока в трех фазах нагрузки

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{A0'}}{\underline{z}_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{B0'}}{\underline{z}_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{C0'}}{\underline{z}_C} \quad (8.5)$$

На рис. 8.2б показана векторная диаграмма фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали для трехфазной цепи соединением звезда без нулевого провода, при неравномерной нагрузке в фазах.

Из анализа векторных диаграмм, представленных на рисунке (см. рис. 8.2 а,б) следует, что несмотря на неравномерную нагрузку в фазах приемника при наличии нейтрального провода с малым сопротивлением  $Z_0 \cong 0$  не нарушается симметрия трехфазной системы напряжений, приложенных к нагрузке.

### 8.3 Задание


















8.3.1 Построить векторную диаграмму токов, фазных и линейных напряжений для схемы (см. рисунок 8.1) при наличии нулевого провода ( $z \cong 0$ ).

В табл. 8.1. даны сопротивления фаз нагрузки для каждой бригады.

Задание п.8.3.1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе.

Таблица 8.1

Сопротивления фаз	Номер бригады					
	I	II	III	IV	V	VI

$\underline{Z}_A$						
$\underline{Z}_B$						
$\underline{Z}_C$						

8.3.2 Исследовать трехфазную цепь при соединении фаз нагрузки звездой:

- при наличии нулевого провода,
- без нулевого провода

при следующих режимах приемника (нагрузки):

- 1) симметричная нагрузка ( $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = r$ );
- 2) несимметричная нагрузка ( $\underline{Z}_A = r, \underline{Z}_B = r_k + jX_k = \underline{Z}_k; \underline{Z}_C = -jX_C = -j\frac{1}{X_C}$ );

- 3) обрыв фазного провода,

где  $r$  - сопротивление резистора,  $\underline{Z}_k$  - сопротивление катушки индуктивности,  $X_C$  - сопротивление конденсатора.

8.3.3 Определить параметры катушки: полное  $\underline{Z}_k$ , активное  $r_k$  и индуктивное  $X_L$  сопротивления, угол  $\varphi$  - по формулам, приведенным в методическом указании к лабораторной работе № 9.

8.3.4 Построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех опытов и соответствующих вычислений в выбранном масштабе.

8.3.5 В отчете изложить цель и краткое содержание работы, начертить схемы электрических цепей, используемые в работе; привести таблицы с опытными данными, данные по вычислению параметров катушки и векторные диаграммы.

## 8.4 Указания по выполнению работы

8.4.1 Исследование различных режимов работы трехфазной цепи проводят согласно п.2 раздела "Задание" по схеме (см. рисунок 8.1), при этом производятся измерения напряжений на фазах нагрузки  $U_{AO'}$ ,  $U_{BO'}$ ,  $U_{CO'}$ , фазных (линейных) токов  $I_A$ , проводе  $I_O$ , напряжения смещения нейтрали  $U_{OO'}$ .

Измерение тока и напряжений производится одним амперметром и одним вольтметром. Амперметр подключается в цепь путем установки проводника со штеккером, соединенного с амперметром, в гнезда на лицевой панели, которые размещены в соответствующих точках электрической цепи. Вольтметр к

измеряемым участкам подключается двумя проводниками.

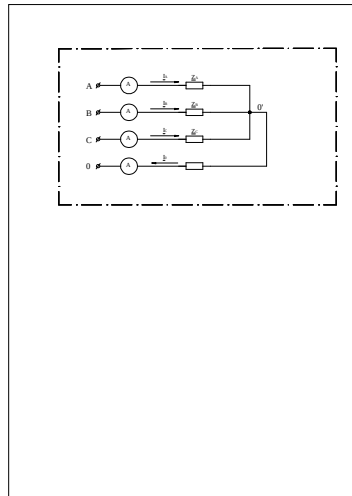


Рисунок 8.3

Результаты измерения записать в табл. 8.2.

По окончании каждого опыта переключателем отключить питание цепи.

Таблица 8.2

	Показания приборов										
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_O,$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_{AO'},$ В	$U_{BO'},$ В	$U_{CO'},$ В	$U_{OO'},$ В
1-а											
1-б											
2-а											
2-б											
3-а											
3-б											

Например, опыт 8.3.2-б соответствует следующему режиму трехфазной цепи: нулевой провод отключен, а сопротивления фаз такие:

$$\underline{Z}_A = r, \underline{Z}_B = r_k + jX_k = \underline{Z}_k; \underline{Z}_C = -jX_C = -j\frac{1}{X_C}. \quad (\text{см. п.8.3.2 раздела "Задание"}).$$

"Задание").

8.4.2 Собрать схему по рисунку 8.2 для определения параметров катушки.



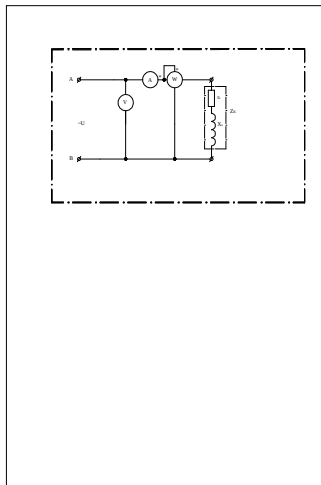


Рисунок 8.4

Для измерения активной мощности используют настольный ваттметр. Включить питание цепи.

Показания приборов записать в табл. 8.3.

Отключить питание цепи.

Таблица 8.3.

Показания приборов			Вычисленные данные			
Р, Вт	I, А	U, В	$r_k$ , Ом	X, Ом	$z_k$ , Ом	$\varphi$ , град

### Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется трехфазной?
2. При каких условиях симметричная система э.д.с. вызывает симметричную систему токов?
3. Постройте трехфазную схему соединением звезда и покажите на схеме фазные и линейные напряжения и токи.
4. Какая многофазная система э.д.с. называется симметричной?
5. Каким образом определяется напряжение смещения нейтрали?
6. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений при нагрузке индуктивного характера во всех фазах трехфазной цепи.

### Лабораторная работа № 9

### 9.1 Трехфазная цепь. Соединение треугольник.

Цель работы: исследовать закономерности изменения линейных и фазовых токов в трехфазной цепи при изменении величины и характера нагрузки при соединении последней в треугольник.

### 9.2 Краткие теоретические сведения

Соединение обмоток трехфазного генератора таким образом, что конец обмотки фазы А соединяется с началом обмотки фазы В, конец обмотки фазы В соединяется с началом обмотки фазы и т.д., называют соединением треугольник.

При соединении приемников энергии приемников энергии (фаз нагрузки) треугольником, каждая фаза нагрузки подключается непосредственно к соответствующим линейным проводам (началом обмоток). Поэтому линейное напряжение генератора или линии является одновременно фазным напряжением приемника (рис.9.1)

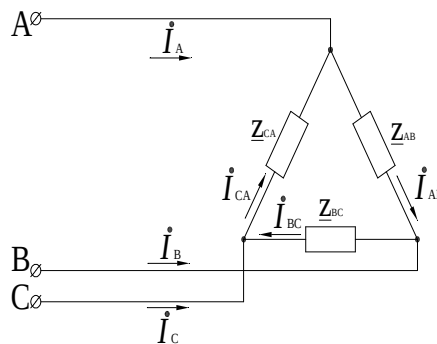


Рисунок 9.1

На рис. 9.1 показаны начала обмоток генератора (точки А, В, С) линейные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ , фазные токи в приемнике (нагрузке)  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$ , сопротивления нагрузки в фазах  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ .

Комплексные значения фазных токов в приемнике определяются по закону Ома

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}. \quad (9.1)$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} + \dot{I}_{BC}. \quad (9.2)$$

На рис. 9.2 показаны векторные диаграммы токов и напряжений при неравномерной нагрузке активно-индуктивного характера  $Z_{AB} = r_1 + jx_{L1}$ ;  $Z_{BC} = r_2 + jx_{L2}$ ;  $Z_{CA} = r_3 + jx_{L3}$  ( $Z_{AB} \neq Z_{BC} \neq Z_{CA}$ ).

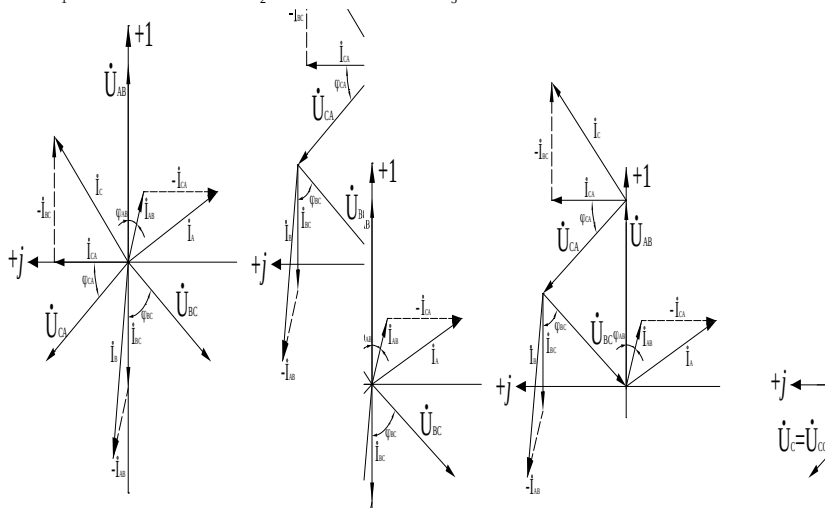


Рисунок 9.2

На рисунке 9.2а векторы напряжения приведены из общего начала. Для большей наглядности векторы напряжений перемещают параллельно самим себе и диаграмма принимает вид, изображенной на рис. 9.2б. При равномерной нагрузке фазные токи  $\dot{I}_{AB}$ ,  $\dot{I}_{BC}$ ,  $\dot{I}_{CA}$  равны по модулю и образуют симметричную систему. Линейные токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  также образуют симметричную систему токов. В этом случае все линейные токи больше в  $\sqrt{3}$  раз фазных токов.

















### 9.3 Задание

9.3.1 Построить векторную диаграмму фазных и линейных токов, фазных (линейных) напряжений для схемы рисунка 9.3. В табл. 9.1 даны сопротивления фаз нагрузки для каждой бригады.

Задание п. 1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе.

Таблица 9.1

Сопротивления фаз	Номер бригады					
	I	II	III	IV	V	VI

$\underline{Z}_{AB}$						
$\underline{Z}_{BC}$						
$\underline{Z}_{CA}$						

9.3.2 Исследовать трехфазную цепь (рисунок 9.1) при соединении фаз нагрузки в треугольник при следующих режимах:

- 1) симметричная нагрузка ( $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \dot{\eta}$ )
- 2) обрыв фазного провода;
- 3) обрыв линейного провода;
- 4) несимметричная нагрузка.

9.3.3 Определить параметры катушки:  $Z_k$  - полное сопротивление катушки,  $r_k$  - активное сопротивление катушки,  $X_L$  - индуктивное (реактивное) сопротивление катушки, угол  $\varphi$  по следующим формулам:

$$r = \frac{P}{I^2}; X = \sqrt{Z^2 - r^2}; \text{ где } Z = \frac{U}{I}, \varphi = \arccos \frac{P}{UI} = \arccos \frac{P}{S}.$$

9.3.4 Построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследованных режимов работы трехфазной цепи.

9.3.5 В отчете изложить цель и краткое содержание работы, начертить исследуемые в работе схемы электрических цепей, привести таблицы с опытными данными и данные по вычислению параметров катушки, на отдельных рисунках показать четыре векторные диаграммы, дать краткие выводы.

#### 9.4 Указания по выполнению работы

9.4.1 Исследование указанных в п.9.3.2 раздела "Задание" режимов проводят по схеме рисунок 9.3, при этом измеряются линейные, фазные токи и напряжение. Для соединения треугольник фазные и линейные напряжения равны.

Измерение тока проводится одним амперметром. Амперметр подключается в цепь путем установки проводника со штеккером, соединенного с амперметром, в гнездо на лицевой панели установки, которые размещены в соответствующих точках электрической цепи.

Вольтметр к измеряемым участкам подключается двумя проводниками.

Результаты измерений записать в табл. 9.2.

По окончании каждого опыта переключателем отключить питание цепи.

Таблица 9.2

	Показания приборов								
	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В
1									
2									
3									
4									

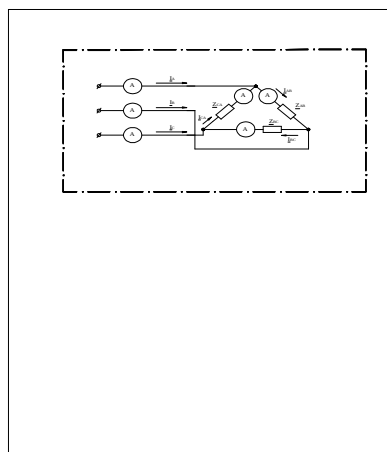


Рисунок 9.3

9.3.2 Определение параметров катушки проводится по схеме рисунка 9.4. Показания приборов записать в табл. 9.3.

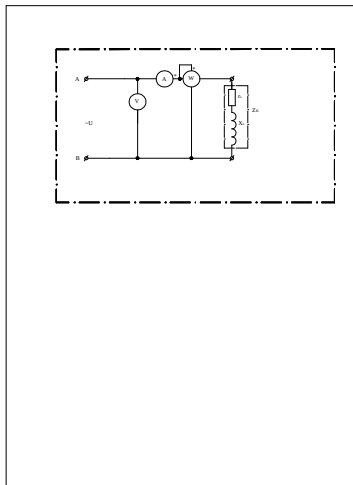


Рисунок 9.4

Таблица 9.3

Показания приборов			Вычисленные данные			
P, Вт	I, А	U, В	$r_k$ , Ом	$X_L$ , Ом	$z_k$ , Ом	$\varphi$ , град

### Контрольные вопросы

1. Какая многофазная система э.д.с. называется симметричной?
2. При каких условиях симметричная система э.д.с. вызывает симметричную систему токов?
3. Какие соотношения между фазными и линейными токами (напряжениями) для трехфазных симметричных цепей при соединении нагрузки треугольником?
4. Запишите выражения для мгновенных значений э.д.с. трехфазного генератора.
5. Запишите выражения для действующих значений э.д.с. в комплексной форме.
6. Постройте векторную диаграмму трехфазной системы э.д.с.

### Лабораторная работа № 10

#### 10.1 Исследование несимметричного пассивного линейного четырехполюсника

Цель работы: исследование режимов и экспериментальное определение коэффициентов уравнений линейных пассивных четырехполюсников.

## 10.2 Краткие теоретические сведения

Четырехполюсник – электротехническое устройство или часть электрической цепи, имеющие два входных 1,1' и два выходных 2,2' зажима (рис.10.1).

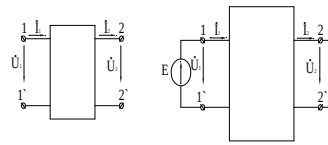


Рисунок 10.1

Четырехполюсники могут быть заменены эквивалентными или пассивными и вынесенными за зажимы пассивных четырехполюсников эквивалентными э.д.с.

Наиболее распространенной формой записи уравнений пассивных четырехполюсников является форма А такая при которой входные величины  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  выражается через выходные  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ ,

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 \end{cases} \quad (10.1)$$

где  $A, B, C, D$  - комплексные коэффициенты, зависящие от параметров элементов цепи четырехполюсника, её конфигурация и частоты источников э.д.с., тока.

Для линейных пассивных четырехполюсников выполняется принцип взаимности, заключающиеся в том, что для любой линейной цепи ток в  $k$  – ветви, вызванной э.д.с.  $E_i$ , находящейся в  $i$  – ветви,

$$I_k = E_i g_{ki} \quad (10.2)$$

будет равен току  $I_i$ , в  $i$  – ветви, вызванному э.д.с.  $E_k$  (численно равной э.д.с.  $E_i$ ), находящейся в  $k$  – ветви,

$$I_i = E_i g_{ki} . \quad (10.3)$$

Коэффициенты линейных пассивных четырехполюсников связаны между собой соотношением

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1; \quad (10.4)$$

следовательно, в системе уравнений (10.1) независимыми являются только три коэффициента.

Если в схеме рис. 10.1 поменять местами источник э.д.с. и сопротивление приемника (обратное включение) (рис. 10.2), при этом изменив положительные направления токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  на обратные, то уравнения (10.1) примут вид

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \underline{D}\dot{U}_1 + \underline{B}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_2 = \underline{C}\dot{U}_1 + \underline{A}\dot{I}_1 \end{cases} . \quad (10.5)$$

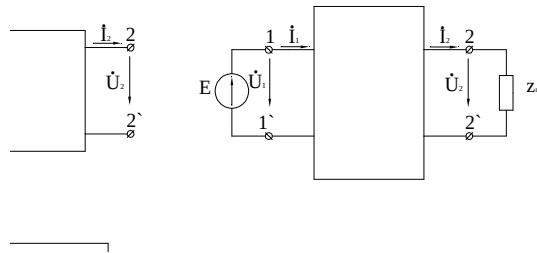


Рисунок 10.2

К симметричным четырехполюсникам относятся такие четырехполюсники, у которых при взаимной замене первичных и вторичных зажимов режимы источника и приемника не изменяются.

Для симметричных четырехполюсников выполняется условие

$$\underline{A} = \underline{D} ,$$

То есть в случае симметричных пассивных четырехполюсников независимыми являются два коэффициента.



Коэффициенты уравнений четырехполюсника могут быть определены аналитически, если известна схема четырехполюсника или экспериментально, когда внутреннее строение четырехполюсника неизвестно.

Наиболее простые выражения для комплексных коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  получаются по данным опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) на первичных зажимах при питании четырехполюсника со стороны вторичных зажимов (обратные ХХ и КЗ) и холостого хода на вторичных зажимах при питании со стороны первичных зажимов (прямой ХХ).

Входное сопротивление со стороны первичных зажимов при разомкнутых вторичных ( $\dot{I}_2 = 0$ ) из уравнений системы (10.1) определяется по следующему выражению:

$$z_{1x} = \frac{\dot{U}_{1x}}{\dot{I}_{1x}} = \frac{A}{C}. \quad (10.6)$$

Входное сопротивление со стороны первичных зажимов при коротком замыкании вторичных зажимов ( $\dot{U}_2 = 0$ ) из уравнений системы (10.1) определяется по формуле

$$z_{1k} = \frac{B}{D}. \quad (10.7)$$

Входное сопротивление четырехполюсника со стороны вторичных зажимов при холостом ходе на первичных зажимах ( $\dot{I}_1 = 0$ ) из уравнений системы (10.5) определяется

$$z_{2x} = \frac{\dot{U}_{2x}}{\dot{I}_{2x}} = \frac{D}{C}. \quad (10.8)$$

Входное сопротивление со стороны вторичных зажимов первичных ( $\dot{U}_1 = 0$ ) рассчитывается по формуле, поперечной из системы (10.5),

$$z_{2k} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} = \frac{B}{A}. \quad (10.9)$$

При совместном решении уравнений (10.4), (10.6), (10.8), (10.9) получаем

$$A = \sqrt{\frac{z_{1x}}{z_{2x} - z_{2k}}}. \quad (10.10)$$

Остальные коэффициенты системы уравнений четырехполюсника (10.1) или (10.5) рассчитываются по следующим формулам:

$$B = Az_{2k}; C = \frac{A}{z_{1x}}; D = \frac{Az_{2x}}{z_{1x}} = z_{2x} C \quad (10.11)$$

Четырехполюсник можно рассматривать как преобразователь входных величин  $U_1$  или  $I_1$  в выходные  $U_2$  или  $I_2$ ; в таком случае его можно характеризовать передаточной функцией  $K$ , равной отношению выходной величины к входной,

$$K = \frac{U_2}{U_1}. \quad (10.12)$$

### 10.3 Задание

10.3.1 Рассчитать параметры Т-образной или П-образной схемы замещения пассивного четырехполюсника по заданным коэффициентам уравнений четырехполюсника типа А и начертить полученную схему замещения. В таблице 1 приведены значения комплексных коэффициентов А, В, С, D.

Задание п.1 выполнить во внеаудиторное время при подготовке к лабораторной работе, при этом бригады с нечетными номерами рассчитывают параметры П-образной схемы, бригады с четными номерами - Т-образной схемы.

Таблица 10.1

Номер бригады	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
1	0,9 $\angle - 174^\circ$	91,5 $\angle - 161^\circ$	0,0096 $\angle - 90^\circ$	1,22 $\angle - 137,4^\circ$
2	1 $\angle 90^\circ$	150 $\angle 90^\circ$	0,01429 $\angle 45^\circ$	1,58 $\angle 18,4^\circ$
3	0,92	124 $\angle 74^\circ$	0,008 $\angle - 77^\circ$	2,13
4	1,66 $\angle - 25^\circ$	207,5 $\angle - 23^\circ$	0,01	1,82 $\angle 9,5^\circ$
5	$\sqrt{2}$ $\angle 45^\circ$	22,4 $\angle 63^\circ$	0,1 $\angle 90^\circ$	1 $\angle 90^\circ$
6	1 $\square 60^\circ$	173,2 $\angle 90^\circ$	0,01 $\angle 90^\circ$	1 $\square 60^\circ$
7	0,5	10 $\angle - 90^\circ$	0,05 $\angle - 90^\circ$	1

10.3.2 Провести опыты холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны первичных I, I' зажимов и по экспериментальным данным вычислить входные комплексные сопротивления  $Z_{1X}$  и  $Z_{1K}$  (рисунок 10.3).

10.3.3 Провести опыты холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны вторичных выводов 2, 2 и по экспериментальным данным вычислить комплексные сопротивления

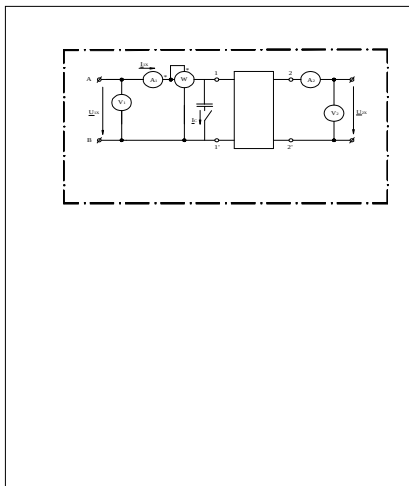


Рисунок 10.3

10.3.4 Рассчитать комплексные коэффициенты A, B, C, D уравнений четырехполюсника по данным пунктов 2, 3.

10.3.5 Измерить экспериментально комплексный коэффициент  $\underline{A} = \underline{U}_{1X} / \underline{U}_{2X}$  (рисунок 10 2) и сравнить с расчетным значением, полученным в пункте 4.

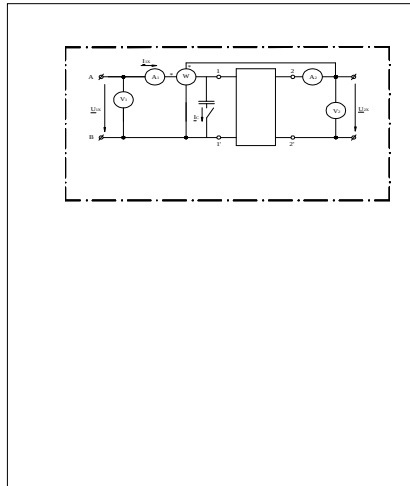


Рисунок 10.4

10.3.6 Рассчитать передаточную функцию по напряжению  $K$ , подключив ко вторичным зажимам 2, Т четырехполюсника резистивное сопротивление нагрузки с  $R_H = 50 \div 150$  Ом (по указанию преподавателя).

10.3.7 Проверить выполнение принципа взаимности по данным опытов прямого и обратного КЗ.

10.3.8 Проверить выполнение соотношения  $\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$ .

#### 10.4 Указания по выполнению работы

10.4.1 Напряжение источника питания поддерживается во всех опытах постоянным в пределах  $30 \div 80$  В (по указанию преподавателя), при этом  $\underline{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ .

10.4.2 Для определения знака угла  $\varphi_1$  комплексного входного сопротивления  $\underline{Z}_1 = Z e^{j\varphi_1}$  параллельно исследуемому четырехполюснику включается небольшая емкость  $C$  (рисунок 10.1). Если при включении этой емкости и постепенном увеличении ее величины начиная с нулевого показания амперметра  $A_1$  уменьшаются, то угол  $\varphi > 0$ , и выходное сопротивление носит активно-индуктивный характер, что следует из векторной диаграммы рисунок 10.3 а.

Если при подключении и увеличении емкости  $C$  показание общего амперметра увеличится, то угол  $\varphi < 0$  и входное сопротивление носит активно-емкостной характер (см. векторную диаграмму рисунок 10.3 б).

$$\text{При этом } \varphi_1 = \arccos \frac{P_1}{U_1 I_1}; \quad Z = \frac{U_1}{I_1}.$$

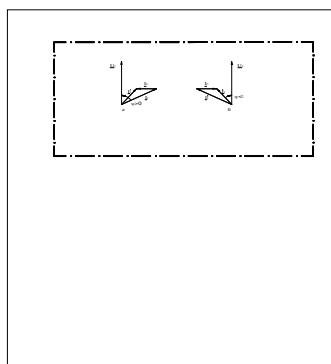


Рисунок 10.5

10.4.3 При обратном ХХ и КЗ источник питания и все приборы, ранее подключенные к первичным зажимам, включаются на вторичные зажимы четырехполюсника, то есть все концы, подходившие ранее к зажимам 1, 1 переносятся на зажимы 2, 2. Определение углов  $\varphi_{2x}$ ,  $\varphi_{2k}$  аналогично указанному в п.2 этого раздела.

10.4.4 На рисунке 10.2 приведена схема для определения знака угла  $\varphi_{21}$  между  $\underline{U}_{2x}$  и  $\underline{I}_{1x} \angle \varphi_{1x}$ . Абсолютное значение угла  $\varphi_{21}$  вычисляется по формуле  $P = U_{21} I_{1x} \cos \varphi_{21}$  при отключенном конденсаторе С. Если при подключенном конденсаторе и постепенном увеличении его емкости начиная с нуля показание ваттметра увеличивается, то напряжение  $\underline{U}_{2x}$  опережает  $\underline{I}_{1x}$ , то есть  $\varphi_{21} > 0$  (рисунок 10.6).

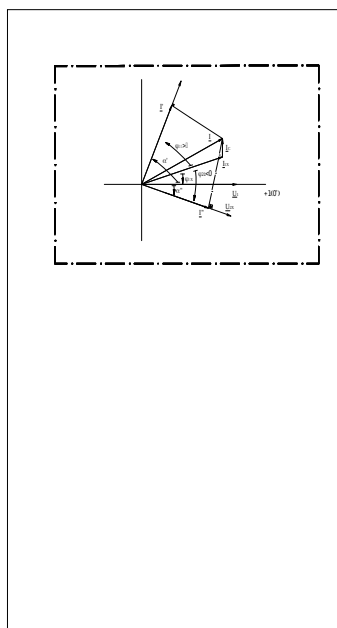


Рисунок 10.6

Векторная диаграмма рисунка 10.4 строится в масштабе, при этом  $\underline{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ .  $\underline{I}_{1x} = I_{1x} \angle \varphi_{1x}$ , вектор  $\underline{U}_{2x}$  проводится дважды под углом  $\varphi_{21}$  к вектору  $\underline{I}_{1x}$ : опережающий ток  $\underline{I}_{1x}$  ( $\varphi_{21} > 0$ ) и отстающий от тока  $\underline{I}_{1x}$  ( $\varphi_{21} < 0$ ). При подключении конденсатора суммарный ток  $\underline{I} = \underline{I}_{1x} + \underline{I}_c$ , проекции, которого на векторы  $\underline{U}_{2x}$  соответственно равны  $\underline{I}'$  и  $\underline{I}''$ .

I

Возможные показания ваттметра вычисляются по формулам:

$$P' = U_{2x} I'; \quad P'' = U_{2x} I'',$$

и сравниваются с показаниями ваттметра P в схеме без емкости:

при  $P' > P$  угол  $\varphi_{21} > 0$ ,

при  $P'' < P$  угол  $\varphi_{21} < 0$ .

Комплексное напряжение  $\underline{U}_{2x}$  определяется по выражению  $\underline{U}_{2x} = U_2 \angle \alpha$ , при этом возможны два значения угла  $\alpha$ :

$$\alpha' = \varphi_{21} + \varphi_{1x} > 0,$$

$$\alpha'' = -(\varphi_{21} - \varphi_{1x}) < 0 \quad (\text{рисунок 10.4})$$

Если при определении показания ваттметра в схеме рисунка 10.2 стрелка прибора отклоняется не по шкале и обмотку напряжения ваттметра, включенную в соответствии с положительным направлением  $\underline{U}_{2x}$ , приходится переключать, то угол между  $\underline{U}_{2x}$  и  $\underline{I}_{1x}$  нужно считать равным  $(\varphi_{21} + 180^\circ)$ , при этом учитывается знак этого случая, при этом  $\varphi_{1x} > 0$ ,  $\varphi_{21} < 0$ .

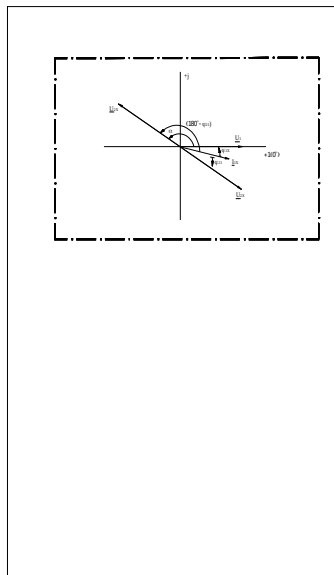


Рисунок 10.5

## Контрольные вопросы

1. Дайте определения взаимных и симметричных четырехполюсников.
2. Как экспериментально определяются коэффициенты уравнений четырехполюсника типа А?
2. Какие формы (типы) уравнений четырехполюсника Вы знаете?
3. Покажите схемы замещения четырехполюсника.

## Приложение А (справочное)

### Правила техники безопасности в лаборатории

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты после прохождения инструктажа по технике безопасности, который проводится на первом лабораторном занятии.
2. Монтаж схем производится изолированными проводами. Применение неизолированного провода категорически запрещается.
3. Запрещается включать схему без проверки преподавателем или лаборантом.
4. Устранять неисправности, производить переключения в рабочей цепи следует только при отключенном напряжении.
5. Имеющиеся в схеме конденсаторы разрядить до начала и после окончания работы.
6. Во время работы нельзя прикасаться к оголенным частям электрической цепи.
7. Студент, выполняющий подключение к источнику питания, электрической энергии, должен предупредить об этом членов бригады словом «Включаю».

8. Запрещается оставлять электрическую цепь включенной при уходе членов бригады.

## **Приложение Б (справочное)**

### **Правила оформления отчета по лабораторной работе**

В Павлодарском государственном университете им. С. Торайгырова принят единый образец оформления отчета по лабораторной работе. Отчет оформляется на листах бумаги формата А 4 (210 x 297) и имеет титульный лист.

Отчет должен содержать:

цель работы;

схемы опытов, таблицы результатов экспериментов и вычислений в порядке их выполнения с указанием номера и названия опыта;

обработку результатов экспериментов (рабочие формулы, полученные графики зависимостей, векторные диаграммы);

выводы по лабораторной работе;

таблицу использованных в работе приборов.

Нумерация страниц отчета сквозная, первой страницей является титульный лист. Схемы, таблицы, графики и векторные диаграммы выполняются с помощью чертежных инструментов и соблюдением



стандартов на условные обозначения элементов схем и буквенных обозначений величин электрических цепей. Каждый рисунок должен иметь номер и название.

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом индивидуально.

## Приложение В (справочное)

При переводе комплексных чисел из алгебраической формулы  
 $\underline{z} = a + jb$

где  $a$  - вещественная часть комплексного числа;  $b$  - мнимая часть комплексного числа;  $j$  - мнимая единица,

в показательную  $\underline{z} = ze^{j\psi}$  вычисляются модуль  $z$  и аргумент  $\psi$  комплексного числа в показательной форме.

Модуль  $z$  комплексного числа в показательной форме вычисляется по формуле:

$$z = \sqrt{a^2 + b^2}$$

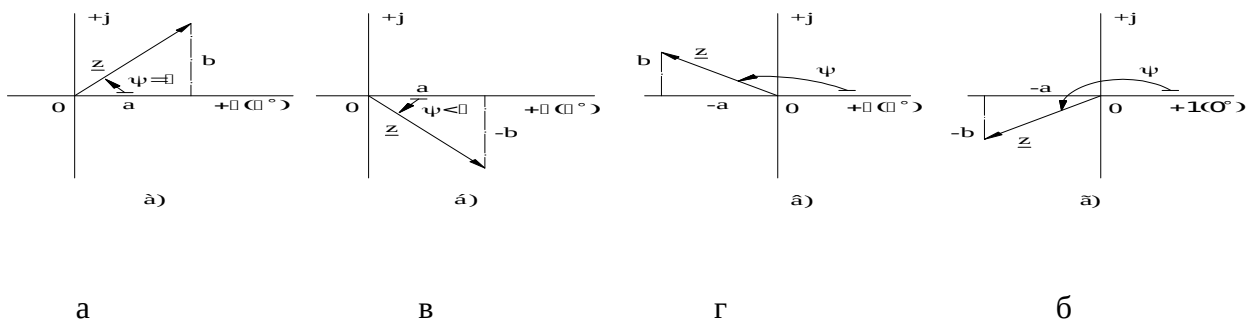


Рисунок 1

При вычислении аргумента  $\psi$  необходимо учитывать расположение вектора, соответствующего комплексному числу, на комплексной плоскости. Если вектор расположен в первом или четвертом квадратах (рисунок 1 а, б) аргумент вычисляется по формуле:

$$\psi = \arctg \frac{b}{a}$$

Если же вектор расположен во втором или третьем квадратах (рисунок 1 в, г), то аргумент вычисляется по формуле:

$$\psi = \arctg \frac{b}{a} + 180^\circ$$

Перевод комплексных чисел из показательной формы в алгебраическую осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} b &= z \sin \psi, \\ a &= z \cos \psi. \end{aligned}$$

### Литература

1 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. – М. : Высшая школа, 1984. – 360 с.

2 Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей : 1 учебник для вузов. – М. : Энергия, 1975. – 572 с.

3 Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. В 2 т. : учебник для электротехнических вузов / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. – Л. : Энергоиздат, 1981. – Т.1. – 536 с.

## Содержания

Предисловие.....	3
Лабораторная работа № 1. Снятие вольтамперных характеристик.....	4
Лабораторная работа № 2. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока.....	9
Лабораторная работа № 3. Разветвленная цепь постоянного тока с переменной нагрузкой.....	15
Лабораторная работа № 4. Исследование неразветвленной цепи синусоидального тока.....	22
Лабораторная работа № 5. Разветвленная цепь синусоидального тока.....	30
Лабораторная работа № 6. Исследование электрической цепи	

со взаимной индукцией.....	40
Лабораторная работа № 7. Исследование линейных электрических цепей синусоидального тока при переменных параметрах элементов цепи.....	46
Лабораторная работа № 8. Трехфазная цепь. Соединение звезда.....	52
Лабораторная работа № 9. Трехфазная цепь. Соединение треугольник.....	58
Лабораторная работа № 10. Исследование несимметричного пассив- ного линейного четырехполюсника.....	63
Приложение А (справочное) .....	72
Приложение Б (справочное) .....	73
Приложение В (справочное) .....	74
Литература.....	75