

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Прикладные и естественнонаучные дисциплины»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ
СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ R, L, C**

Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ,
для теоретической подготовки к итоговой аттестации,
для выполнения самостоятельной работы обучающегося

Уфа
2018

Работа посвящена изучению электрических цепей синусоидального переменного тока с последовательным соединением элементов электрической цепи, методам расчета и построения токов и напряжений на комплексной плоскости по дисциплинам «Электроснабжение с основами электротехники» и «Электротехника и электроника» и смежным дисциплинам, изучающим вопросы моделирования и расчета цепей переменного тока.

Учебно-методическое пособие содержит теоретический материал для подготовки к итоговой аттестации, теоретический и практический материал для выполнения лабораторной работы и самостоятельной работы обучающего по теме «Электрические машины». Пособие предназначено для обучающихся всех форм обучения (дневного, очно-заочного (вечернего) и заочного отделений) архитектурно-строительного института и горно-нефтяного факультета УГНТУ.

Публикуется в авторской редакции.

Составители: Каримов Ф.Ч., доц., канд. техн. наук
Канарейкин В.И., доц., канд. техн. наук
Нигматуллина И.В., преподаватель

Рецензенты: Недосеко И.В., д.т.н., профессор каф. СК
Загидуллин С.Н., к.т.н., доцент каф. ПЕД

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Предположим, что имеется электрическая цепь, содержащая последовательное соединение идеальных элементов R (активное сопротивление, идеальный линейный резистор), L (идеальная индуктивность) C (идеальная ёмкость), приложено синусоидальное напряжение $U(t)$. По цепи при этом потечёт переменный синусоидальный ток

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

где $i(t)$ – мгновенное значение синусоидального переменного тока, A ;

I_m – амплитудное значение тока, A ;

ω – циклическая (круговая) частота синусоидального переменного тока, rad/c ;

t – время, c ;

φ_i – начальная фаза синусоидального тока, rad .

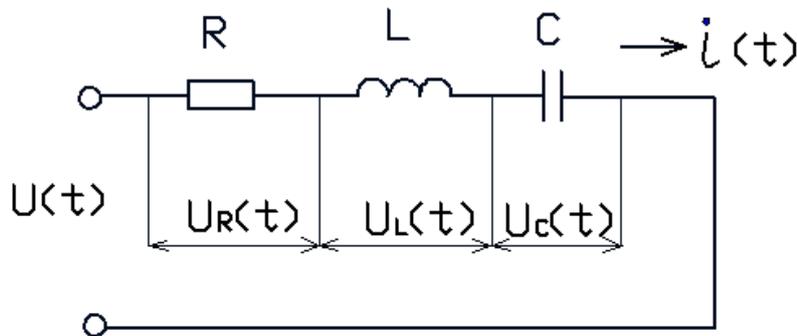


Рис. 1.1

В соответствии со вторым законом Кирхгофа можем записать:

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) + U_C(t), \quad (2)$$

где $U(t)$ – переменное (синусоидальное) напряжение, приложенное ко входу электрической схемы;

$U_R(t)$ – переменное (синусоидальное) напряжение, приложенное к элементу R (активному сопротивлению);

$U_L(t)$ – переменное (синусоидальное) напряжение, приложенное к идеальному элементу L (индуктивность);

$U_C(t)$ – переменное (синусоидальное) напряжение, приложенное к идеальному элементу C (электроёмкость).

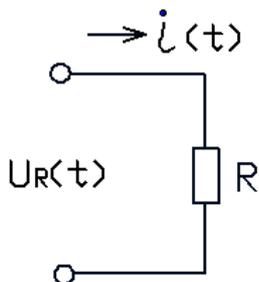


Рис. 1.2

Для дальнейших рассуждений рассмотрим по отдельности идеальные элементы R , L и C , включённые в электрическую цепь синусоидального переменного тока (1). При включении активного сопротивления R в цепь переменного тока схема приобретает вид, представленный на рис. 1.2.

Для этой схемы, в соответствии с законом Ома можем записать:

$$U_R(t) = R \cdot i(t) = R \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi_i) . \quad (3)$$

С другой стороны, для синусоидального переменного напряжения $U_R(t)$, приложенного к идеальному элементу R справедливо:

$$U_R(t) = U_{Rm} \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi_{U,R}) , \quad (4)$$

где U_{Rm} – амплитудное значение переменного синусоидального напряжения на идеальном элементе R ;

$\varphi_{U,R}$ – начальная фаза переменного напряжения на элементе R .

Из формул (3) и (4) получим

$$U_{Rm} = R \cdot I_m . \quad (5)$$

$$\varphi_{U,R} = \varphi_i . \quad (6)$$

Из (6) следует, что начальная фаза синусоидального переменного напряжения (4) на идеальном элементе R (активное сопротивление) совпадает с начальной фазой синусоидального переменного тока (1).

Рассмотрим включение идеального элемента L (индуктивность) в электрическую цепь синусоидального переменного тока (рис. 1.3).

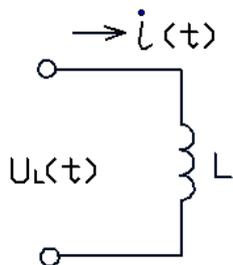


Рис. 1.3

Согласно электромагнитной индукции, при прохождении переменного (или любого изменяющегося во времени) электрического тока через индуктивность $e_{LS}(t)$, ток через индуктивность будет поддерживаться при условии:

$$U_L(t) = - e_{LS}(t) . \quad (7)$$

Далее, так как

$$e_{LS}(t) = - L \frac{di(t)}{dt} , \quad (8)$$

то согласно (7) и (1) можем записать:

$$\begin{aligned} U_L(t) &= L \frac{di(t)}{dt} = L \frac{d}{dt} [I_m \sin(\omega t + \varphi_i)] = \omega L I_m \cos(\omega t + \varphi_i) = \\ &= \omega L I_m \sin[\omega t + (\varphi_i + \frac{\pi}{2})] . \end{aligned} \quad (9)$$

С другой стороны, для синусоидального переменного напряжения на идеальном элементе L :

$$U_L(t) = U_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_{U,L}) . \quad (10)$$

Из сравнения выражений (9) и (10) получим

$$U_{Lm} = \omega L I_m , \quad (11)$$

$$\varphi_{U,L} = \varphi_i + \frac{\pi}{2}. \quad (12)$$

Здесь U_{Lm} – амплитудное значение синусоидального переменного напряжения на идеальном элементе L , $\varphi_{U,L}$ – начальная фаза переменного синусоидального напряжения на идеальном индуктивном элементе L .

В соответствии с законом Ома из (11) получим выражение для реактивного индуктивного сопротивления X_L :

$$U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m \quad X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (13)$$

где f – частота синусоидального переменного тока.

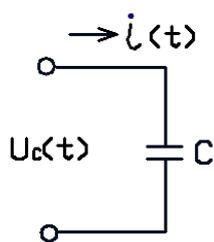
Таким образом, как следует из (12), синусоидальное переменное напряжение на идеальном индуктивном элементе опережает по фазе на величину, равную $\frac{\pi}{2}$, синусоидальный ток (1).

Разность фаз между током и напряжением составляет:

$$\Delta\varphi_{U,L} = +\frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

Рассмотрим включение идеального элемента C (электроёмкости) в электрическую цепь синусоидального переменного тока (рис. 1.4).

Для нахождения приложенного к элементу C синусоидального переменного напряжения $U_C(t)$ при протекании по цепи ёмкости синусоидального переменного тока $i(t)$ воспользуемся известной из курса физики формулой для заряда на конденсаторе:



$$q(t) = C \cdot U(t). \quad (15)$$

С другой стороны:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}, \quad (16)$$

или
$$q(t) = \int_0^t i(t) dt. \quad (17)$$

Рис. 1.4 Объединяя формулы (15-17) и (1) можем далее записать

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{1}{C} q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{1}{C} \int_0^t I_m \sin(\omega t + \varphi_i) dt = \\ &= -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \varphi_i) = \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left[\omega t + \left(\varphi_i - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Для переменного напряжения $U_C(t)$ справедливо

$$U_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_{U,C}). \quad (19)$$

Из сравнения формул (18) и (19) получим

$$U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m, \quad (20)$$

$$\varphi_{U,C} = \varphi_i - \frac{\pi}{2}, \quad (21)$$

где U_{Cm} – амплитудное значение синусоидального переменного напряжения на конденсаторе C ;

$\varphi_{U,C}$ – начальная фаза переменного синусоидального напряжения на идеальном элементе C .

В соответствии с законом Ома из (20) получим выражение для реактивного ёмкостного сопротивления X_C :

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega c} I_m = X_C I_m, \quad X_C = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c'}, \quad (22)$$

где f – частота синусоидального переменного тока.

Таким образом, как следует из (21), синусоидальное переменное напряжение на идеальном ёмкостном элементе (на идеальной ёмкости) отстает по фазе от протекающего синусоидального тока на величину $\frac{\pi}{2}$, т.е. разность фаз между током и напряжением составляют

$$\Delta \varphi_{U,C} = - \frac{\pi}{2}. \quad (23)$$

Рассмотрим теперь общий случай с последовательным включением всех элементов в цепь синусоидального переменного тока (см. рис. 1.1). Для напряжения $U(t)$, на основании вышеизложенных рассуждений, можем записать, подставив в формулу (2) полученные выражения для $U_R(t)$, $U_L(t)$ и $U_C(t)$. В результате получим

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) + U_C(t) = RI_m \sin(\omega t + \varphi_{U,R}) + \omega LI_m \sin(\omega t + \varphi_{U,L}) + \frac{1}{\omega c} I_m \sin(\omega t + \varphi_{U,C}) \quad (24)$$

или

$$U(t) = RI_m \sin(\omega t + \varphi_i) + \omega LI_m \sin \left[\omega t + \left(\varphi_i + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{1}{\omega c} I_m \sin \left[\omega t + \left(\varphi_i - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (25)$$

Для $U(t)$ можем записать

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_U), \quad (26)$$

где U_m – амплитудное значение приложенного к цепи последовательным соединением R , L и C синусоидального переменного напряжения;

φ_U – начальная фаза напряжения φ_U .

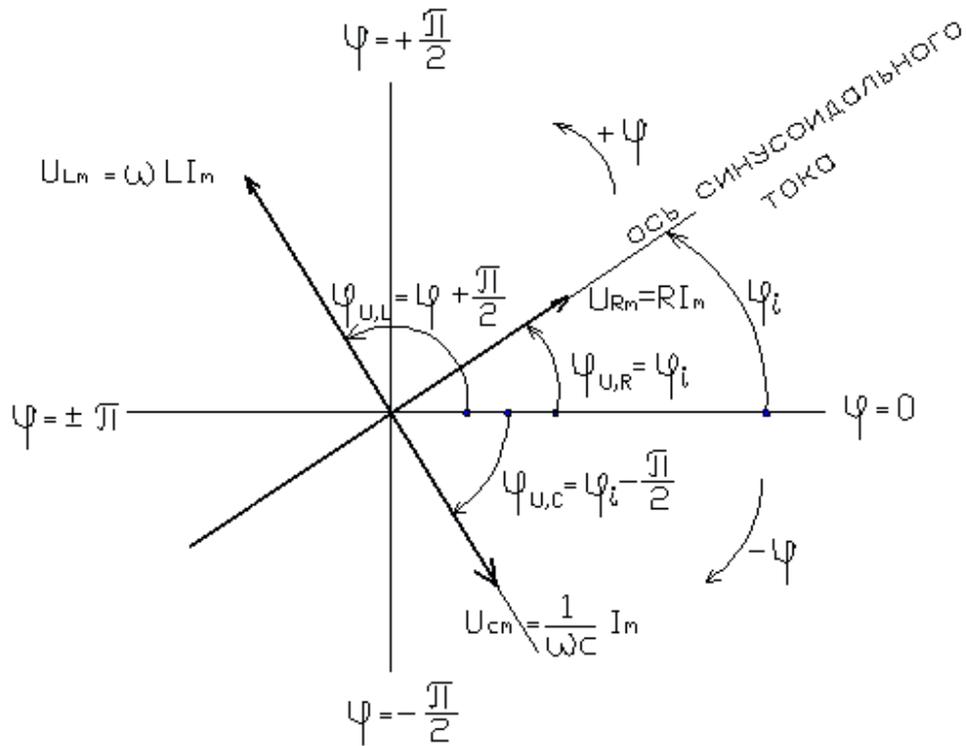
Для нахождения (определения) U_m воспользуемся векторной диаграммой для амплитудных значений, входящих в (25) величин. Векторная диаграмма представляет собой изображение на плоскости вращающихся с одинаковой круговой частотой ω векторов амплитуд. Для нашего случая это векторы

$$U_{Rm} = R \cdot I_m; U_{Lm} = \omega LI_m; U_{cm} = \frac{1}{\omega c} I_m. \quad (27)$$

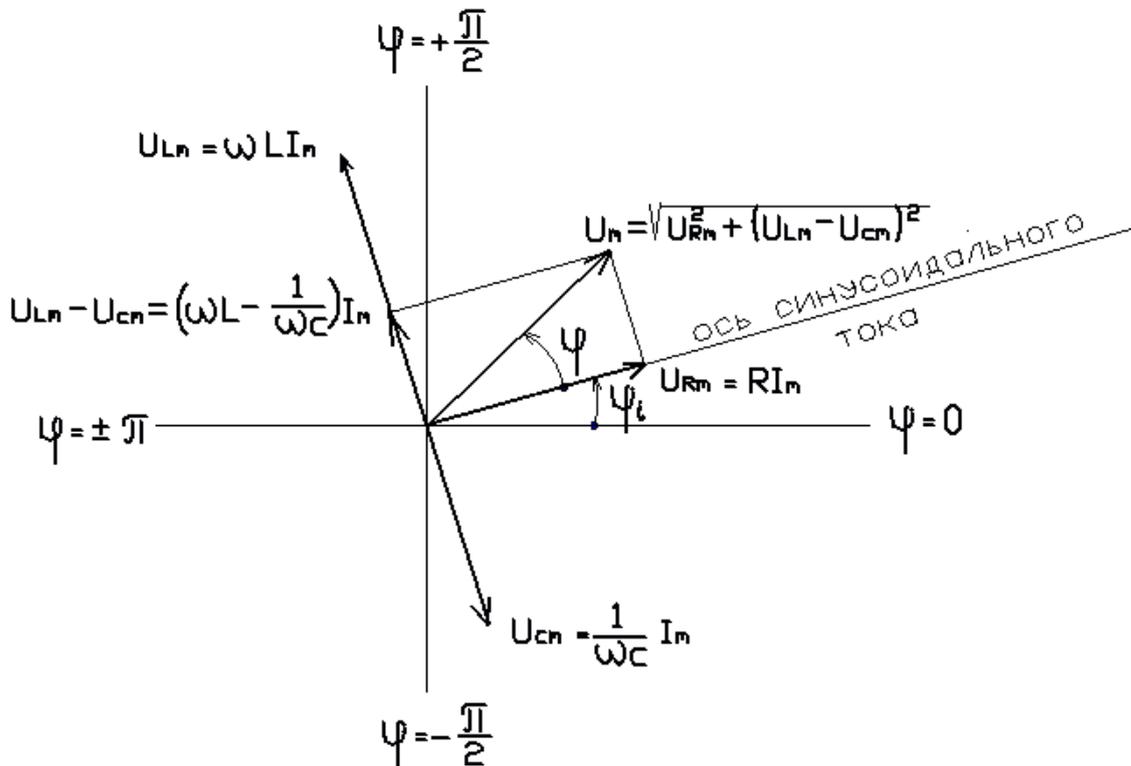
По оси абсцисс направим угол $\varphi = 0$. Положительное направление угла отсчитывается от $\varphi = 0$ против часовой стрелки при вращении вектора, а вращение по часовой стрелке принимается за отрицательное значение φ . В соответствии с этим угол φ_i откладывается от оси абсцисс (вектор I_m).

Как видно из рис. 1.5, для амплитуды U_m синусоидального напряжения, приложенного к электрической цепи с последовательным соединением элементов R , L и C , можем записать

$$\begin{aligned} U_m^2 &= U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{cm})^2 = (RI_m)^2 + \left(\omega LI_m - \frac{1}{\omega c} I_m \right)^2 = \\ &= R^2 I_m^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c} \right)^2 I_m^2 \end{aligned} \quad (28)$$



а)



б)

Рис. 1.5. Векторная диаграмма для векторов амплитудных значений U_{Rm} , U_{Lm} и U_{Cm} синусоидального напряжения на идеальных элементах R , L и C при последовательном их включении в цепь синусоидального переменного тока

$$U_m = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \cdot I_m. \quad (29)$$

В соответствии с законом Ома (29) переписывается в виде

$$U_m = Z \cdot I_m. \quad (30)$$

Здесь величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (31)$$

называется полным сопротивлением последовательной RLC -цепи.

Начальный угол φ (начальную фазу) напряжения $U(t)$, т.е. угол между синусоидальным током $i(t)$ и синусоидальным напряжением $U(t)$, также определим из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{U_{Rm}} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (32)$$

или

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right]. \quad (33)$$

Как видно из полученной формулы (33), начальная фаза напряжения (полного напряжения) $U(t)$ (2) при последовательном включении идеальных элементов R , L и C (рис. 1.1) в электрическую цепь синусоидального переменного тока (1) зависит от отношения реактивной ($X = X_L - X_C$) и активной (R) составляющей полного сопротивления (Z) цепи (рис. 1.5).

При построении векторных диаграмм для электрической цепи с последовательным соединением элементов R , L и C , начальную фазу φ_i синусоидального тока $i(t)$ (1) принимают равной нулю ($\varphi_i = 0$). В этом случае векторная диаграмма для амплитудных значений напряжений на U_{Rm} , U_{Lm} и U_{Cm} соответственно на элементах R , L и C , представленная на рис. 1.5, видоизменится и примет вид (рис. 1.6).

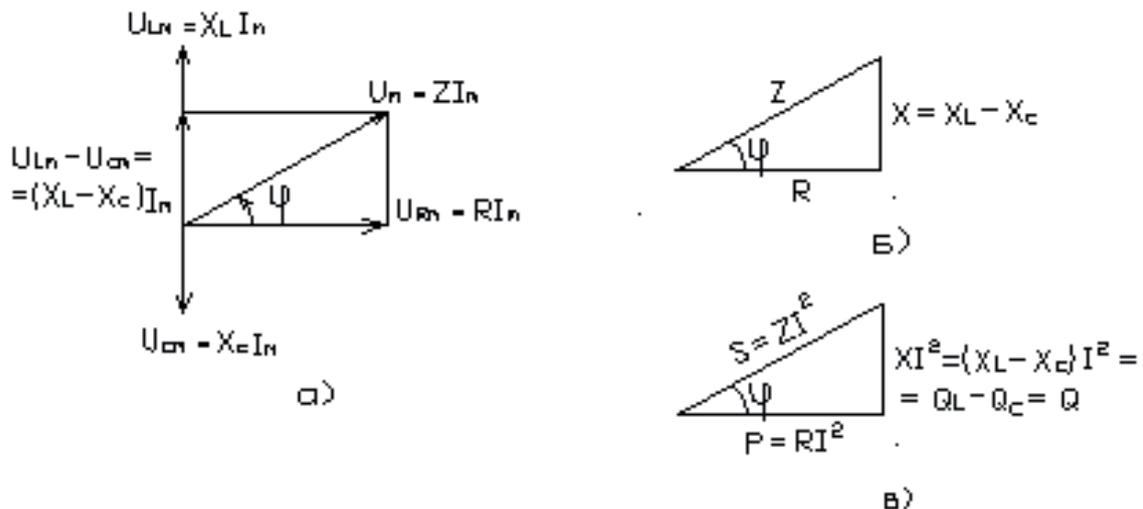


Рис. 1.6. Векторная диаграмма напряжений для последовательной RLC -цепи (а) и соответствующие данной векторной диаграмме треугольник сопротивлений (б) и треугольник мощностей (в)

- Сравнение фаз тока и напряжений позволяет сделать следующие выводы:
- в цепи с активным сопротивлением **ток и напряжение совпадают** по фазе, т.е. угол $\varphi = 0^\circ$;
 - в цепи с индуктивностью **ток отстаёт** от напряжения на угол 90° ;
 - в цепи с ёмкостью **ток опережает** напряжение на угол 90° .

Для соответствующих участков электрической цепи **векторные диаграммы токов** и **напряжений** представлены на рис. 1.7.

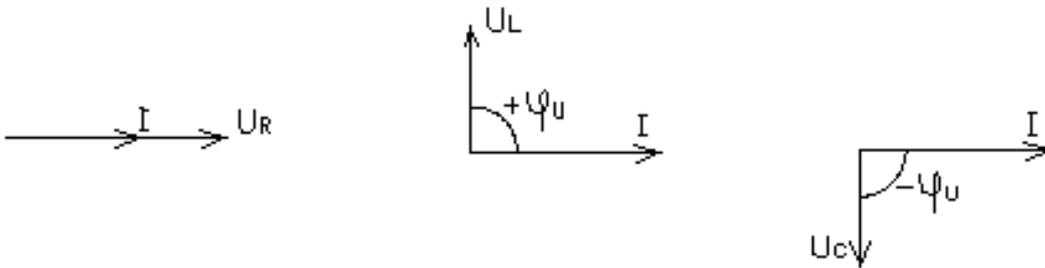


Рис. 1.7. Треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей

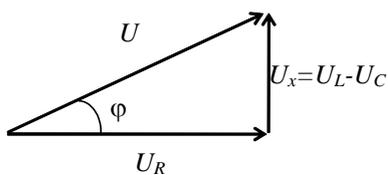
Как видно, на векторных диаграммах (рис. 1.6) можно выделить прямоугольный треугольник напряжений. В зависимости от соотношения между величинами реактивных сопротивлений X_L и X_C возможны три режима работы электрических цепей синусоидального переменного тока:

а) **напряжение** цепи **опережает ток** по фазе на угол φ и цепь в целом имеет **активно-индуктивный** характер;

б) **напряжение** цепи **отстаёт** по фазе **от тока** на угол φ и цепь в целом имеет **активно-ёмкостный** характер;

в) **напряжение** и **ток совпадают** по фазе, характер цепи в целом **чисто активный**. Такой режим цепи называется **резонансом напряжений**, при котором $U_L = U_C$, $X_L = X_C$. Настроить цепь в резонанс напряжений можно путём изменения X_L или X_C , т.е. изменяя величину ёмкости C , индуктивности L или частоты f (частота, при которой наступает резонанс $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$). При резонансе напряжений сопротивление цепи минимально, а ток максимальный.

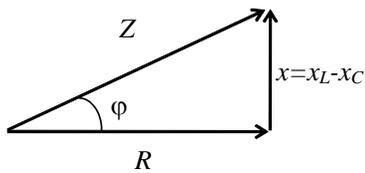
Цепи электроснабжения в строительной отрасли чаще всего имеют активно-индуктивный характер, поэтому далее рассмотрим соответствующие треугольники с положительным углом φ .



По теореме Пифагора можно установить связь между **полным** напряжением цепи и напряжениями на ее отдельных участках:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (34)$$

Если разделить стороны треугольника напряжений на ток (в цепи с последовательным соединением элементов ток одинаков во всех участках), то (в соответствии с законом Ома) получим треугольник сопротивлений.

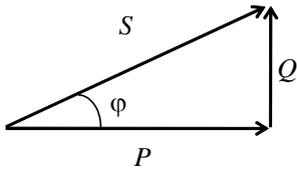


Здесь $X = (X_L - X_C)$ – реактивное сопротивление цепи, а Z – полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}. \quad (35)$$

Полученное уравнение устанавливает связь между различными сопротивлениями цепи.

Далее умножив стороны треугольника напряжений на ток получим треугольник мощностей со сторонами P , S и Q .



Здесь $P = U_R I$ – **активная мощность**, которая выделяется на активных сопротивлениях цепи. Она связана с необратимыми преобразованиями электрической энергии, то есть с совершением работы (полезной) в электроустановке. Активная мощность измеряется в **ваттах [Вт]**.

$Q = U_x I$ – реактивная мощность. Связана в электроустановках с совершением обратимых преобразований энергии, полезной работы она не совершает. В электроустановках затрачивается на создание электрических (C) и магнитных (L) полей. Реактивная мощность измеряется **вольт-амперах реактивных [вар]**. Реактивная мощность оказывает существенное влияние на режим работы электрической цепи. Циркулируя по проводам трансформаторов, генераторов, двигателей, линий электропередач, она нагревает их. Поэтому расчет проводов и других элементов устройств переменного тока производят из полной мощности, которая учитывает активную и реактивную мощности.

Величина $S = UI$ – полная мощность, измеряется в **вольт-амперах [ВА]**. Из треугольника мощностей определим **полную мощность**:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (36)$$

Из треугольника мощностей можно записать:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi, \quad (37)$$

откуда

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (38)$$

Множитель $\cos \varphi$ называется **коэффициентом мощности**. Коэффициент мощности – это отношение активной мощности к полной. Он показывает, какая часть от полной мощности, потребляемой электроустановкой из сети, затрачивается на совершение полезной работы. Очевидно, чем выше коэффициент мощности, тем эффективнее преобразование энергии в электроустановке. Наилучшее значение $\cos \varphi = 1$, в этом случае вся потребленная из сети энергия затрачивается на совершение полезной работы.

Из приведенных соотношений можно выразить ток, потребляемый электроустановкой из сети:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Из выражения следует, что чем ниже $\cos \varphi$, тем больший ток потребляет она из сети на совершение той же самой работы. На практике пропускная способность линий электропередач (*ЛЭП*) ограничена, поэтому снижение $\cos \varphi$ электроприёмников ведет к повышенной загрузке их током, и еще больше ограничивает их пропускную способность.

2. ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ

2.1. Краткое описание учебно-лабораторного оборудования

Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электрические цепи» предназначен для проведения лабораторно-практических занятий по дисциплине «Электрические цепи», обеспечивает изучение и исследования электрических цепей постоянного и переменного тока, трехфазных цепей, переходных процессов в линейных электрических цепях, полупроводниковых приборов, выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Лабораторный стенд представляет собой изделие настольного модульного исполнения.

Оборудование может применяться для обучения в общеобразовательных учреждениях, учреждениях начального профессионального, среднего профессионального и высшего профессионального образования для получения базовых и углубленных профессиональных знаний и навыков по дисциплине «Электрические цепи». Также оборудование может быть использовано на семинарах и курсах повышения квалификации электротехнического персонала, предприятий и организаций.

2.2. Основные технические характеристики комплекта оборудования

Параметр	Значение
Электропитание: - от однофазной сети переменного тока с рабочим нулевым и защитным проводниками, В - частота питающей сети, Гц	230 50
Потребляемая мощность, ВА (не более)	500
Исполнение	стендовое
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	930×800×1650
Вес, не более, кг	30

2.3. Перечень комплекта оборудования

№ п.п.	Наименование оборудования	Кол-во, шт.
	Лабораторные модули комплекта учебно-лабораторного оборудования “Электрические цепи”	
1	2	3
1	Функциональный генератор	1
2	Источник питания	1
3	Измерительные приборы	1
4	Автотрансформатор	1
5	Мультиметры	1
6	Нелинейные элементы. Реактивные элементы. Сопротивления добавочные (совмещенный)	1
7	Диоды, резисторы, конденсаторы	1
8	Трансформатор однофазный	1
9	Стол лабораторный	1
10	Рама двухуровневая двухрядная	1
11	Комплект соединительных проводов и силовых кабелей	1к
12	Светодиодная вывеска с названием стенда	1

2.4. Общий вид комплекта оборудования

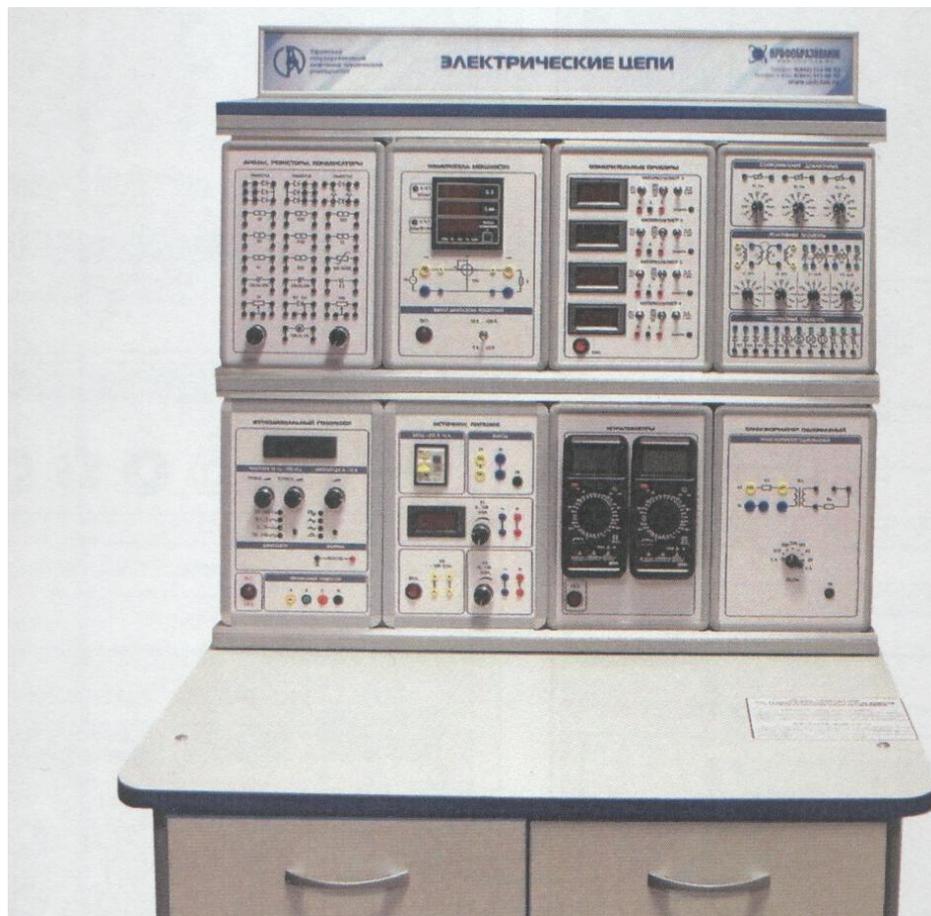


Рис. 2.1. Общий вид лабораторного стенда

Вид передних панелей модулей, используемых при проведении лабораторных работ по курсу «Электрические цепи», показан на рис. 2.2а-2.2в.

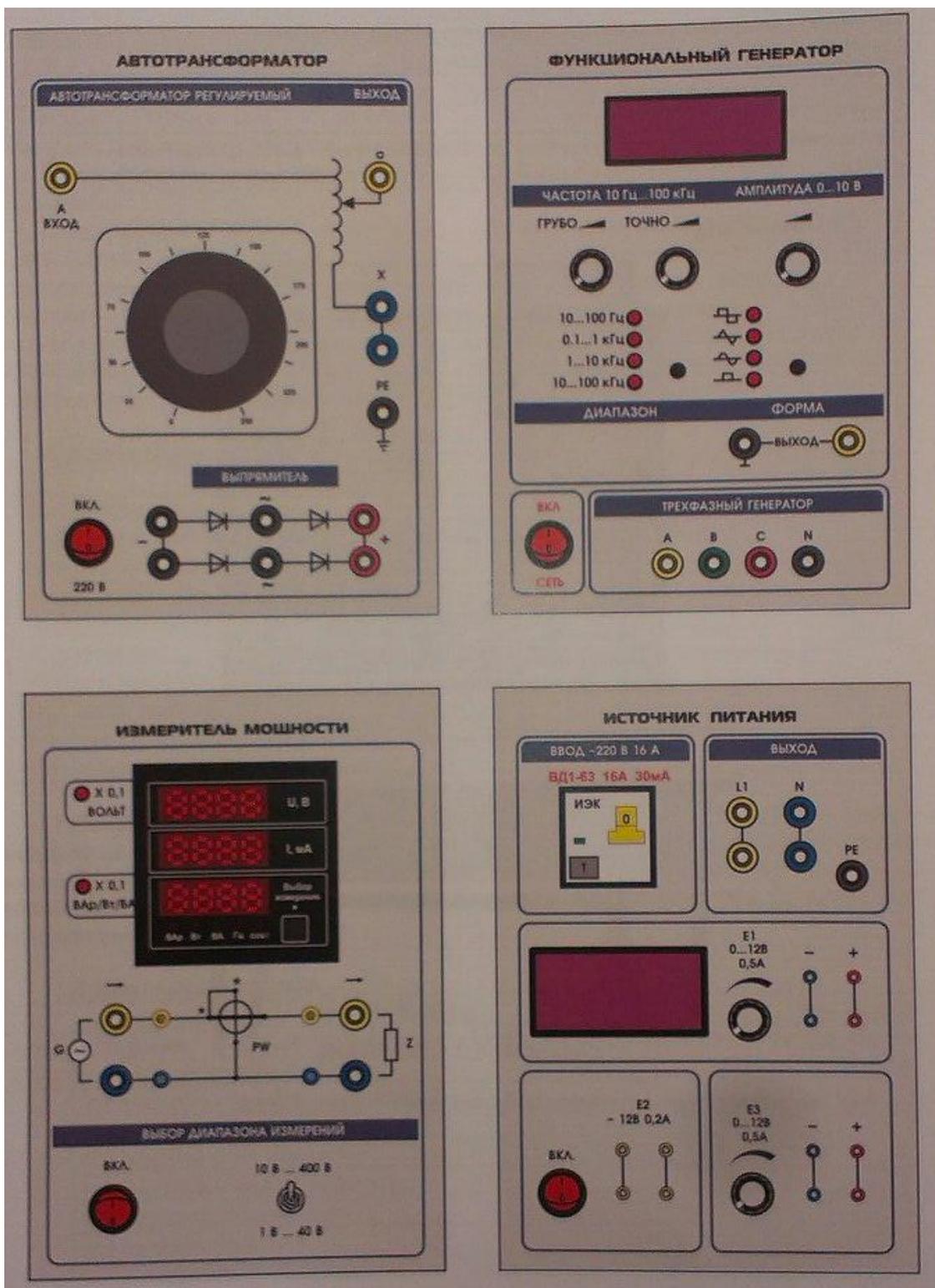


Рис 2.2а. Сменные модули стенда

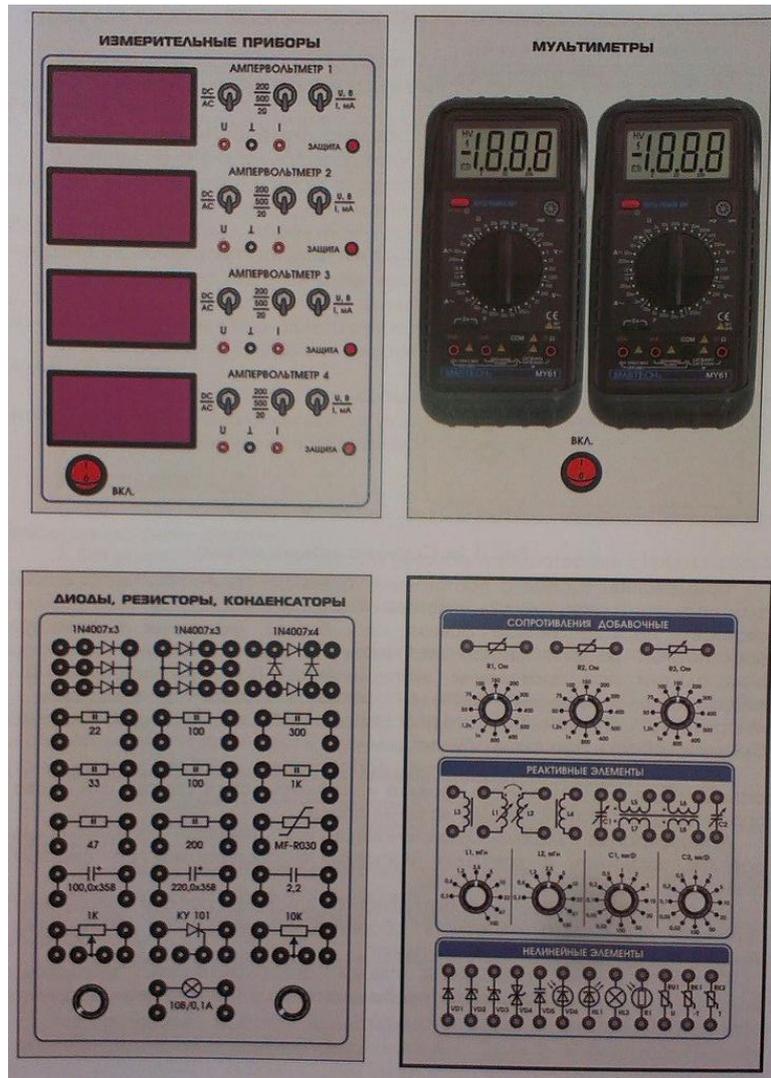


Рис.2.2б. Сменные модули стенда



Рис.2.2в. Сменные модули стенда

3. ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИМЕТРА

Для измерения трёх базовых электрических величин (тока, напряжения и омического сопротивления) используется мультиметр. Мультиметр является основным измерительным инструментом в слаботочных системах.

Мультиметр (рис.3.1), в общем случае, имеет следующие режимы:

- Измерение переменного напряжения, пределы измерений до 600 В и до 200 В;
- Генератор прямоугольных импульсов;
- Измерение силы тока для постоянного напряжения;
- Измерение постоянного тока до 10 А;
- Проверка транзисторов;
- Прозвонка для определения целостности кабеля;
- Измерение сопротивления: пределы измерений 200 Ом, 2000 Ом, 20 кОм, 200 кОм, 2000 кОм;
- Измерение постоянного напряжения: пределы измерений 200 мВ, 2000 мВ, 20 В, 200 В, 600 В.

3.1. Общие принципы работы с мультиметром

3.1.1. Переключения между режимами работы мультиметра производятся с помощью поворотного переключателя (рис.3.2). По окончании измерений необходимо установить переключатель в положение OFF, для предотвращения разряда батареи.

3.1.2. Не касаться оголенной части щупов при работе с мультиметром, т.к. помимо возможности поражения электрическим током возрастает погрешность измерений.

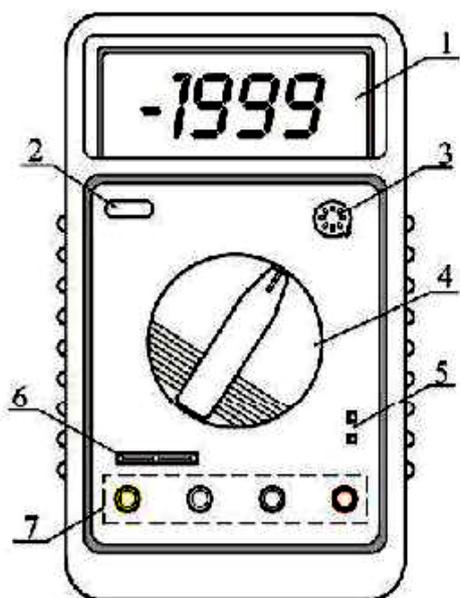


Рис. 3.1. Лицевая панель мультиметра

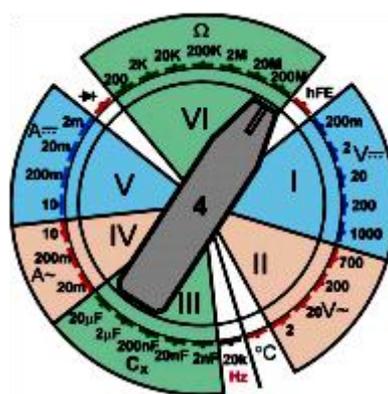


Рис. 3.2. Переключатель режимов измерения мультиметра

3.1.3. Перед началом работы с мультиметром необходимо правильно выставлять пределы измерений. Чем ближе к измеряемому значению выставлен предел, тем точнее будет результат. Если же примерное значение измеряемой величины заранее не известно, то стоит начинать измерения с максимально возможного предела измерений. Появление на дисплее **цифры «1»** указывает на то, что следует увеличить диапазон измерений.

На рис. 3.1 условные обозначения обозначают соответственно:

1 – дисплей; 2 – выключатель питания; 3 – гнездо для проверки транзисторов; 4 – переключатель режимов; 5 – разъём для подключения термопары; 6 – разъём для подключения конденсатора; 7 – входы для измерения тока, напряжения, сопротивления.

Внимание! Если положение переключателя режимов *не изменяют в течение 10 минут*, мультиметр *автоматически выключается*. Для продолжения работы необходимо дважды нажать кнопку 2 (рис.3.1).

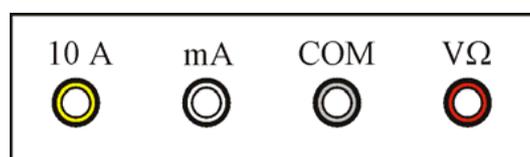


Рис. 3.3. Измерительные входы мультиметра:

10 А - вход для измерения тока до **10 А**; **mA** - вход для измерения тока до **200 mA**; **COM** - общий вход (земля); **VΩ** - вход для измерения напряжения и сопротивления

3.2. Проведение измерений с помощью мультиметра

3.2.1. Измерение силы тока с помощью мультиметра

Для измерения силы тока необходимо красный щуп подключить ко входу «**10А**», черный – ко входу «**COM**». Если Вы уверены, что в цепи течет небольшая сила тока (до **200 mA**), то можно установить щуп во вход «**mA**». Подключение мультиметра в режиме амперметра в цепь необходимо производить последовательно (в разрыв цепи).

3.2.2. Измерение напряжения с помощью мультиметра

Для измерения напряжения необходимо красный щуп подключить ко входу «**VΩ**», черный – ко входу «**COM**». Подключение мультиметра в режиме вольтметра в цепь необходимо производить параллельно.

3.2.3. Измерение сопротивления с помощью мультиметра

Для измерения электрического сопротивления участка цепи необходимо красный щуп подключить к входу «**VΩ**», черный – ко входу «**COM**». Установив переключатель в соответствующее положение произвести измерение, мультиметр при этом подключается параллельно участку цепи.

Необходимо помнить, что в измеряемом участке цепи не должен протекать электрический ток, иначе мультиметр выйдет из строя.

«Прозвонка» с помощью мультиметра. Установить мультиметр в режим прозвонки, красный щуп подключить ко входу « $V\Omega$ », черный – ко входу «СОМ». Для проверки работоспособности данного режима замкнуть два щупа между собой. При этом мультиметр издаст звуковой сигнал и покажет сопротивление, близкое к нулю. Звуковой сигнал мультиметр издает при сопротивлении проверяемого участка цепи до **80** Ом. Для прозвонки необходимо подключить щупы к разным концам цепи, если обрыва нет, то мультиметр издаст звуковой сигнал или покажет сопротивление.

До подключения мультиметра к измеряемой цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений измеряемой величины;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемому участку электрической цепи.

На рис.3.4. показано подключение мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения (а), мультиметра (как амперметра) для измерения тока (б), мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления (в).

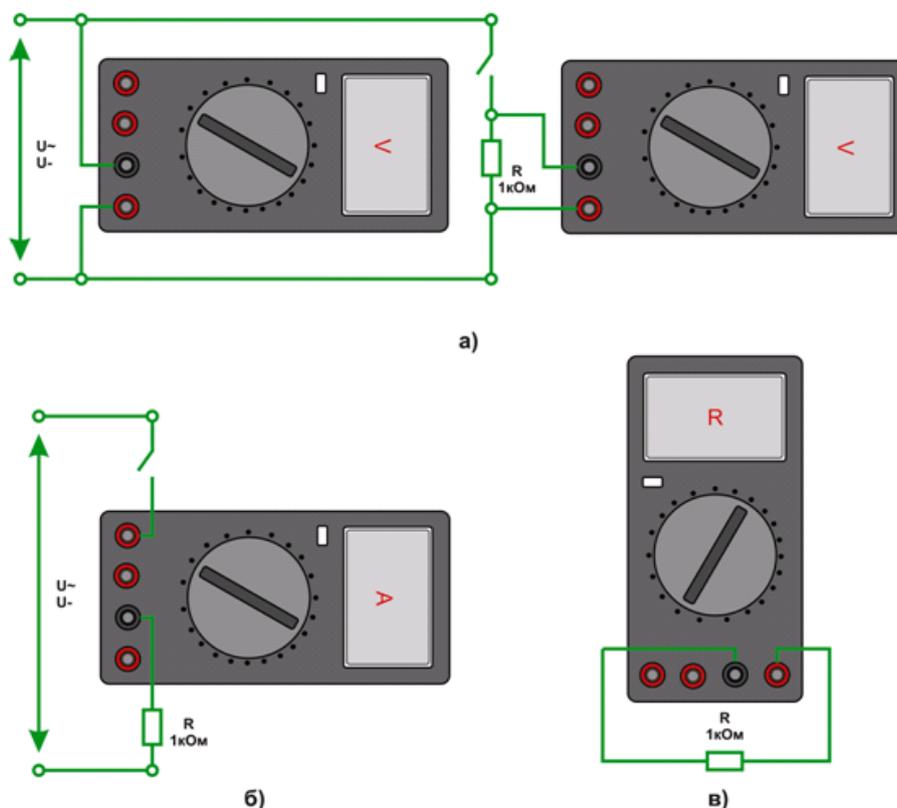


Рис. 3.4. Подключения мультиметра в измеряемую цепь в качестве:
а – вольтметра, б – амперметра, в – омметра

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель работы:

1. Приобретение навыков сборки простых электрических цепей, измерение напряжений на отдельных участках цепи.
2. Изучение свойств цепей при последовательном соединении активных и реактивных элементов.
3. Ознакомиться с понятиями мгновенной активной, реактивной и полной мощности, а также коэффициентом мощности синусоидального тока.
4. Знакомство с явлением резонанса напряжений.
5. Построение векторных диаграмм.

4.1. Порядок выполнения работы

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций, краткой теоретической части лабораторной работы или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что выключатель модулей стенда находится в положении «ВЫКЛ»;
4. По указанию преподавателя выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.
5. Подключить модули к сети -220В 50Гц.
6. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети -220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

4.2. Порядок проведения эксперимента

В работе используются:

Модули: «Источник питания», «Сопротивления добавочные», «Мультиметры», «Измерительные приборы».

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций, краткой теоретической части лабораторной работы или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. В соответствии с приведённой схемой (рис. 4.1) собрать электрическую цепь. Установить в соответствии с вариантом (табл. 4.1) значения сопротивления катушки индуктивности L_K с учетом внутреннего активного сопротивления катушки R_K , активного сопротивления R и емкость конденсатора C .

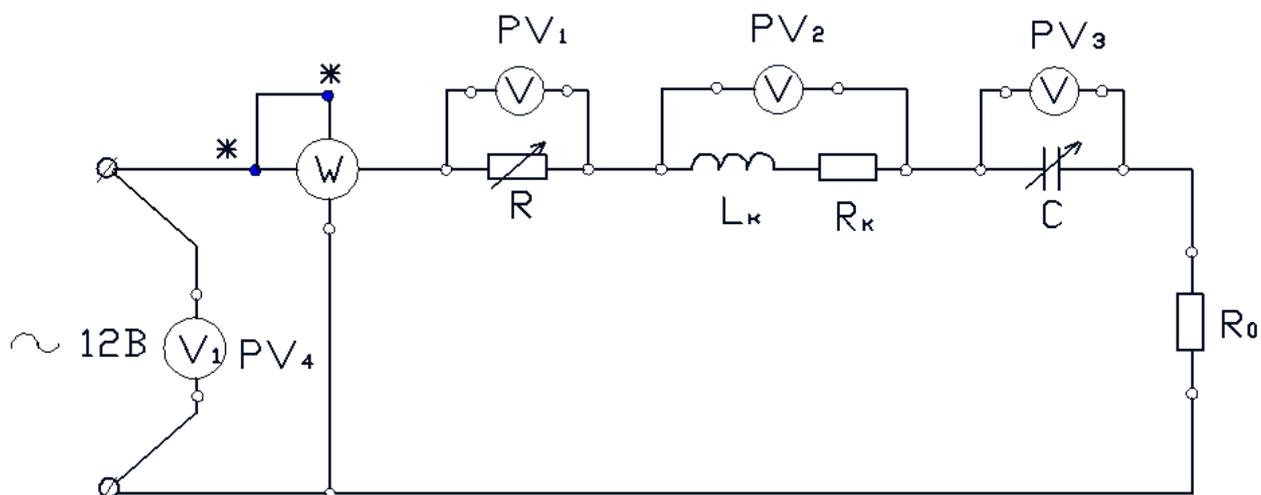


Рис. 4.1. Исследование электрической цепи синусоидального переменного тока с последовательным соединением элементов: L_K – индуктивность катушки индуктивности; C – электрическая ёмкость конденсатора; R_K – активное сопротивление катушки индуктивности; R – активное сопротивление нагрузки (резистор); R_0 – токоограничительное сопротивление в электрической цепи

Таблица 4.1

№ опыта	Измерено											
	$R_K, \text{ Ом}$	$L_K, \text{ мГн}$	$C, \text{ мкФ}$	$I, \text{ мА}$	$U_R, \text{ В}$	$U_L, \text{ В}$	$U_C, \text{ В}$	$U, \text{ В}$	$P, \text{ Вт}$	$Q, \text{ Вар}$	$S, \text{ ВА}$	$\cos\varphi$
1												
2												
3												
4												

Таблица 4.2

Схема	Измерено						Вычислено	
	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$U_R, \text{ В}$	$U_K, \text{ В}$	$U_C, \text{ В}$	$P, \text{ Вт}$	$\cos\varphi$	φ
Z_K, R								
R, X_C								
R_1, L_K, X_{C1}								

4. Подсоединить параллельно конденсатору C дополнительный проводник (исключив этим конденсатор из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.
5. Включить питание модулей стенда и произвести измерения указанных в табл. 4.2. величин в цепи с последовательным соединением резистора R и катушки L_K . Перед измерением напряжения перевести

измеритель напряжения в режим измерения переменного напряжения «~». Результаты измерений занести в табл. 4.2.

6. Выключить электропитание модулей стенда, подсоединить параллельно катушке L_K дополнительный проводник (исключив этим катушку из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.
7. Включить электропитание модулей стенда и произвести измерения, указанных в табл. 4.2, величин для цепи с последовательным соединением резистора R и конденсатора X_C . Результаты измерений занести в табл. 4.2. Выключить электропитание модулей стенда, убрать дополнительный проводник.
8. В цепи с последовательным соединением резистора R , катушки L_K и конденсатора C , изменяя величину емкости конденсатора C с помощью галетного переключателя модуля реактивных элементов, добиться наибольшего показания амперметра, то есть обеспечить состояние цепи, близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в табл. 4.2.
9. Для цепи с последовательным соединением трех элементов (R , L_K , C) по результатам измерений определить полную мощность цепи S и отдельных участков P , Q , а также полное Z , активное R и реактивное X сопротивление всей цепи. Результаты расчета занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ опыта	Вычислено							
	Мощности				Сопротивления			Коэф. мощности
	$Q_L, \text{Вар}$	$Q_C, \text{Вар}$	$P_R, \text{Вт}$	$S, \text{ВА}$	$R, \text{Ом}$	$X, \text{Ом}$	$Z, \text{Ом}$	$\cos\varphi$
1								
2								
3								
4								

10. Сравнить вычисленные и измеренные мощности.
11. По результатам измерений для исследованных цепей вычислить значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ и угла сдвига фаз.
12. Построить в соответствующем масштабе векторные диаграммы напряжений, сопротивлений и мощностей и объяснить их различие.
13. Объяснить влияние величины ёмкости конденсатора на режим работы исследуемой электрической цепи.
14. Сделать вывод о применении второго закона Кирхгофа

$$\sum_k \dot{E}_k = \sum_i \dot{I}_i \cdot R_i = \sum_i \dot{U}_i$$

в электрических цепях синусоидального переменного тока.

4.3. Правила оформления отчёта по лабораторной работе

Лабораторная работа представляет собой небольшое, но вполне законченное учебное научное исследование. Отчёт по лабораторной работе является документом, отражающим результаты выполненного исследования с максимальной полнотой и объективностью.

Требования к оформлению отчёта

Отчет должен быть выполнен на бумаге стандартного размера (формат А4) с полями по обеим сторонам текста. Материал отчёта должен иметь четкую рубрикацию, каждый раздел необходимо снабдить заголовком.

Примерный состав отчёта по лабораторной работе:

- цель работы;
- порядок выполнения лабораторной работы;
- принципиальные электрические схемы и (или) схемы соединений;
- перечень измерительных приборов и электрооборудования с указанием паспортных данных;
- таблицы экспериментальных измерений (исследований) и выполненных вычислений;
- диаграммы и графики характеристик функциональных зависимостей;
- выводы или заключение о проделанной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется индуктивным и ёмкостным сопротивлениями? Как они рассчитываются?
2. Как записываются закон Ома и законы Кирхгофа для цепи переменного тока?
3. От каких величин зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током?
4. Определить для электрической схемы синусоидального переменного тока (напряжения), приведённой на рис. 5.1, угол сдвига фаз между напряжением и током на участке CD, а также построить в соответствующем масштабе на комплексной плоскости векторную диаграмму токов и напряжений при следующих данных электрической цепи:

$$U_{CD} = 220 \text{ В}; R = 36 \text{ Ом}; L = 70 \text{ мГн}; C = 56 \text{ мкФ}.$$

Задачу решить методом комплексных проводимостей.

5. Для чего строится векторная диаграмма цепи?
6. Как рассчитать полное сопротивление ветви цепи?
7. Какие различают проводимости в цепи переменного тока и как они рассчитываются?

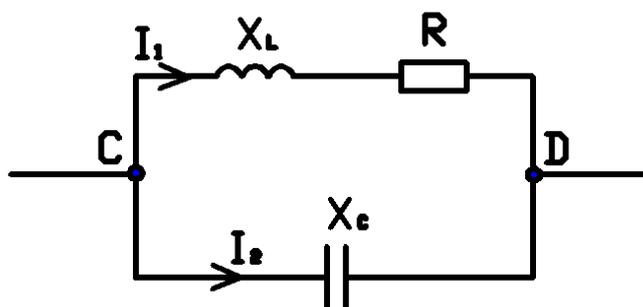


Рис. 5.1

8. Как рассчитать ток, действующий в ветви цепи?
9. Получение переменного тока. Дать определение синусоидальной величины и основных её параметров: амплитуды, начальной фазы, частоты, угловой частоты.
10. Построить треугольник мощностей.
11. Построить треугольник сопротивлений.
12. Построить треугольник проводимости.
13. Что характеризует коэффициент мощности и как он рассчитывается?
14. Как рассчитывается полное сопротивление цепи?
15. Какие различают проводимости в цепи переменного тока и как они рассчитываются?
16. Какие мощности различают в цепи переменного тока и как они рассчитываются?
17. Постройте электрическую цепь переменного тока с катушкой индуктивности.
18. Постройте электрическую цепь переменного тока с конденсатором.
19. Постройте электрическую цепь переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой.
20. Постройте электрическую цепь переменного тока с активно-ёмкостной нагрузкой

6. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

До начала работ каждый **студент ДОЛЖЕН** внимательно ознакомиться с настоящими правилами и расписаться в журнале учета инструктажа по технике безопасности.

Студент ОБЯЗАН выполнять следующие правила:

1. **Перед включением** лабораторного комплекса в сеть **220 В** убедитесь, что тумблер включения находится в положении «**ВЫКЛ.**».

2. **При сборке** электрической цепи используйте провода с исправной изоляцией. Подключая приборы, проверяйте соблюдение норм нагрузки (рабочее напряжение конденсатора, максимальный ток для катушек индуктивности и т.п.).

3. Сборку электрической цепи ведите **по контурам**, начиная с основного (содержащего источник питания); мультиметр, образующий вспомогательный контур, подключайте в последнюю очередь.

4. **Включайте** источники питания **только после проверки цепи преподавателем**.

5. Для проведения любых переключений в электрической цепи **отключите источник питания**, чтобы избежать короткого замыкания участка цепи.

6. **Отключите питание по завершению измерений.**

ЗАПРЕЩАЕТСЯ

1) касаться токоведущих частей схемы металлическими предметами, работать мокрыми руками;

2) без разрешения преподавателя включать лабораторные стенды в сеть 220 В и подавать напряжение на схему;

3) перемещать лабораторные стенды с одного стола на другой или вскрывать их;

4) курить в лаборатории, находиться в верхней одежде или головных уборах.

По всем возникающим вопросам студентам следует обращаться к преподавателю или лаборанту. За порчу оборудования студенты несут материальную ответственность.

7. ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

1. Схема состоит из одного резистивного элемента с сопротивлением $R=220$ Ом. Напряжение на её зажимах $u=220\sin(628t)$. Определите показания амперметра и вольтметра.

- $I = 1$ А; $u=220$ В
- $I = 0,7$ А; $u=156$ В
- $I = 0,7$ А; $u=220$ В
- $I = 1$ А; $u=156$ В

2. Амплитуда синусоидального напряжения 100 В, начальная фаза = -60° , частота 50 Гц. Запишите уравнение мгновенного значения этого напряжения.

- $u=100 \cos(-60t)$
- $u=100 \sin(50t - 60^\circ)$
- $u=100 \sin(314t-60^\circ)$
- $u=100 \cos(314t + 60^\circ)$

3. Полная потребляемая мощность нагрузки $S= 140$ кВт, а реактивная мощность $Q= 95$ кВАр. Определите коэффициент нагрузки.

- $\cos\varphi = 0,6$
- $\cos\varphi = 0,3$
- $\cos\varphi = 0,1$
- $\cos\varphi = 0,9$

4. Напряжение на зажимах цепи с резистивным элементом изменяется по закону: $u=100 \sin (314+30^{\circ})$. Определите закон изменения тока в цепи, если $R=20$ Ом.
- $I = 5 \sin 314 t$
 - $I = 5 \sin (314t + 30^{\circ})$
 - $I = 3,55 \sin (314t + 30^{\circ})$
 - $I = 3,55 \sin 314t$
5. Определите период сигнала, если частота синусоидального тока 400 Гц.
- 400 с
 - 1,4 с
 - 0,0025 с
 - 40 с
6. В электрической цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление R , электрический ток.
- Отстает по фазе от напряжения на 90°
 - Опережает по фазе напряжение на 90°
 - Совпадает по фазе с напряжением
 - Независим от напряжения.
7. Обычно векторные диаграммы строят для :
- Амплитудных значений ЭДС, напряжений и токов
 - Действующих значений ЭДС, напряжений и токов.
 - Действующих и амплитудных значений
 - Мгновенных значений ЭДС, напряжений и токов.
8. Амплитудное значение напряжения $u_{\max}=120$ В, начальная фаза равна 45° . Запишите уравнение для мгновенного значения этого напряжения.
- $u= 120 \cos (45t)$
 - $u= 120 \sin (45t)$
 - $u= 120 \cos (t - 45^{\circ})$
 - $u= 120 \cos (t + 45^{\circ})$
9. Как изменится сдвиг фаз между напряжением и током на катушке индуктивности, если оба её параметра (R и X_L) одновременно увеличатся в два раза?
- Уменьшится в два раза
 - Увеличится в два раза
 - Не изменится
 - Уменьшится в четыре раза
10. Мгновенное значение тока $I = 16 \sin(157t)$. Определите амплитудное и действующее значение тока.
- 16 А ; 157 А
 - 157 А ; 16 А
 - 11,3 А ; 16 А
 - 16 А ; 11,3 А
11. Укажите параметр переменного тока, от которого зависит индуктивное сопротивление катушки.
- Действующее значение тока

- b. Начальная фаза тока
- c. Период переменного тока
- d. Максимальное значение тока

12. Конденсатор емкостью C подключен к источнику синусоидального тока. Как изменится ток в конденсаторе, если частоту синусоидального тока уменьшить в 3 раза.

- a. Уменьшится в 3 раза
- b. Увеличится в 3 раза
- c. Останется неизменной
- d. Ток в конденсаторе не зависит от частоты синусоидального тока.

13. Каковы сопротивление R и активная мощность P в цепи, показанной на рис.7.1, если $X_L=30$ Ом, амперметр показывает 4 А, а вольтметр 200 В?

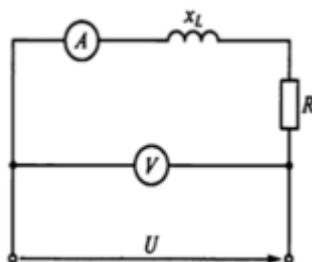


Рис.7.1

- a. $R=40$ Ом; $P=640$ Вт.
- b. $R=20$ Ом; $P=320$ Вт.
- c. $R=50$ Ом; $P=800$ Вт.
- d. $R=80$ Ом; $P=1280$ Вт.

14. Какое из приведенных выражений для цепи синусоидального тока, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L , C , содержит ошибку?

- a. $X_c = 2 \pi f C$
- b. $X_L = 2 \pi f L$
- c. $z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
- d. $\cos \varphi = \frac{R}{z}$

15. Напряжение на зажимах цепи рис.7.2 $u=100\sin(314t)$. Каковы показания амперметра и вольтметра в этой цепи, если $X_C=100$ Ом.

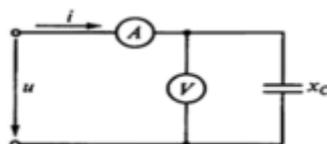


Рис.7.2

- a. $I=0,7$ А; $U=70$ В.
- b. $I=0,7$ А; $U=100$ В.
- c. $I=1$ А; $U=100$ В.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи [Электронный ресурс] : учебное. Электрон. дан.– СПб.: Лань, 2009. – 592 с.
2. Касаткин А.С. Электротехника [Текст] : учебник / А.С. Касаткина, М.В. Немцов. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 544 с.
3. Лопатин В. П. Электротехника, основы электроники и электрооборудование [Текст]: учебное пособие/ В. П. Лопатин ; УГНТУ, каф. ЭЭП. - 2-е изд., доп. - Уфа : Изд-во УГНТУ, 2013. - 190 с.
4. Общая электротехника, электроснабжение и вертикальный транспорт [Электронный ресурс] : учебное пособие для самостоятельной работы студентов / УГНТУ, каф. ПХиФ ; сост.: Р. Г. Рахматуллина, Ф. Ч. Каримов. - Уфа : УГНТУ, 2014. - 1,77 Мб.
5. Современный справочник электрика: Справочник / Суворин А.В., - 5-е изд., стер. - Рн/Д:Феникс, 2014. - 510 с. (Профессиональное мастерство) ISBN 978-5-222-22021-4 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/908834>
6. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник / Т.В. Анчарова, М.А. Рашевская, Е.Д. Стебунова. - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2012. - 416 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование). (переплет) ISBN 978-5-91134-672-0 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/326458>
7. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник / Т.В. Анчарова, М.А. Рашевская, Е.Д. Стебунова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. — 415 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/939294>
8. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие / Г.Н. Ополева. — М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2019. — 416 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1003805>
9. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий : учебник / Ю.Д. Сибикин. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : ИНФРА-М, 2018. — 405 с. — (Среднее профессиональное образование). — www.dx.doi.org / 10.12737 / textbook_5ad8a2ff1921e6.88482361. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/912395>
10. Электрические аппараты: Учебник / Щербаков Е.Ф., Александров Д.С. - М.:Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 304 с.: 60x90 1/16 (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-91134-929-5 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/466595>

СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретическая часть	1
2. Подготовка к экспериментальной части.....	9
2.1. Краткое описание учебно-лабораторного оборудования.....	9
2.2. Основные технические характеристики комплекта оборудования....	9
2.3. Перечень комплекта оборудования.....	10
2.4. Общий вид комплекта оборудования.....	10
3. Измерения с помощью мультиметра.....	13
3.1. Общие принципы работы с мультиметром.....	13
3.2. Проведение измерений с помощью мультиметра.....	14
3.2.1. Измерение силы тока с помощью мультиметра.....	14
3.2.2. Измерение напряжения с помощью мультиметра.....	14
3.2.3. Измерение сопротивления с помощью мультиметра.....	14
4. Экспериментальная часть.....	16
4.1. Порядок выполнения работы.....	16
4.2. Порядок проведения эксперимента.....	16
4.3. Правила оформления отчёта по лабораторной работе.....	19
5. Контрольные вопросы.....	19
6. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ по электротехнике.....	20
7. Тестовые вопросы для самостоятельной работы обучающихся.....	21
Список использованных источников	24