

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Методические указания  
к проведению лабораторных работ  
для студентов химико-технологических  
и инженерно-технических специальностей**

Минск 2013

УДК 621.3+621.38(076.5)  
ББК 31.2я73  
Э45

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

С о с т а в и т е л и :

*О. И. Александров, Н. П. Коровкина, В. В. Сарока*

Научный редактор кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой АППиЭ БГТУ *Д. С. Карпович*

Р е ц е н з е н т

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационных систем и технологий БГТУ  
*Н. Н. Пустовалова*

**Электротехника и основы электроники** : метод. указания к проведению лабораторных работ для студентов химико-технологических и инженерно-технических специальностей / сост. : О. И. Александров, Н. П. Коровкина, В. В. Сарока ; науч. ред. Д. С. Карпович. – Минск : БГТУ, 2013. – 83 с.  
ISBN 978-985-530-283-5.

В издание включены кратко изложенный теоретический материал по темам семи лабораторных работ, методика их выполнения. В каждой работе содержится домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию, а также контрольные вопросы. С правилами по технике безопасности студенты смогут ознакомиться в приложении.

УДК 621.3+621.38(076.5)  
ББК 31.2я73

ISBN 978-985-530-283-5

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Курс электротехники – учебной дисциплины о технических применениях электрических и магнитных явлений – по своему существу требует полного сочетания теории и лабораторной практики. Для того чтобы хорошо знать электротехнику, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи. Решение задач может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия по электротехнике имеют целью:

- закрепить теоретический материал;
- дать возможность подробно ознакомиться с устройствами и характеристиками наиболее важных электротехнических приборов, аппаратов, составляющих предмет лабораторной практики;
- помочь овладеть практическими способами управления электротехническими устройствами и настройки их на заданный режим;
- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей;
- научить выполнять определенные расчеты с использованием компьютерных программ;
- выработать умение выносить суждения о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных и исследуемых электротехнических устройств для решения тех или иных практических задач.

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

Подготовка заключается в ознакомлении с содержанием работы; выяснении целей и задач работы; ознакомлении с приборами и аппаратами, необходимыми для выполнения работы, со схемой их соединения и с последовательностью выполнения всех операций, подготовкой бланка к выполняемой работе.

Бланк лабораторной работы должен содержать результаты подготовки к лабораторной работе (решение задачи, ответы на контрольные вопросы), перечень электроизмерительных приборов, таблицу технических данных электроизмерительных приборов, электрическую схему, таблицы измерений и вычислений, необходимые формулы для расчета, графики, векторные диаграммы, выводы по работе.

# ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- получить допуск к выполняемой работе. Для допуска к лабораторному занятию студент должен выполнить домашнее задание в объеме, указанном в лабораторной работе настоящего издания. Проверка домашнего задания проводится на лабораторном занятии перед выполнением работы с использованием опросных тестов или устно;
- ознакомиться с имеющейся аппаратурой и записать ее технические данные в табл. 1;
- рассчитать приближенно (с погрешностью до 10%) возможные максимальные и минимальные значения токов и напряжений на всех участках цепи, затем по полученным данным проверить возможность применения имеющейся аппаратуры;

Таблица 1

**Технические данные электроизмерительных приборов**

Условное обозначение прибора на схеме	Наименование прибора	Название системы и ее условное обозначение	Пределы измерения	Цена деления	Класс точности	Заводской номер
РА	Амперметр	Электромагнитная 	0...1 А	0,01А/дел	0,5	77492

– составить план расположения электроизмерительных приборов на рабочем столе. При этом необходимо приборы расположить так, чтобы:

- а) схема соединения получилась простой и наглядной;
- б) работа с ней была удобной и не требовала неудобных положений наблюдателя;
- в) приборы, чувствительные к влиянию внешних магнитных полей, имели наименьшие дополнительные погрешности от магнитных полей;

– перед сборкой схемы следует ознакомиться с электрическими схемами самих приборов и аппаратуры, а также со схемами их

включения. При этом необходимо выяснить, какие клеммы приборов и аппаратов соответствуют отдельным точкам схем и в каких положениях должны находиться движки реостатов и рукоятки других регулирующих устройств;

– при сборке схемы длина проводов должна соответствовать расстоянию между соединяемыми зажимами; ради упрощения следует сначала соединить главную последовательную цепь, начав сборку ее с одной клеммы источника питания и закончить на другой его клемме, а затем подключить параллельные ветви;

– после сборки схема должна быть проверена членами бригады. Проверка производится путем обхода сначала главного контура цепи, а потом всех параллельных ветвей. При сложных схемах производят дополнительную проверку всех узлов схемы. В заключение проверяют натяг всех зажимов, правильность установки движков всех регулирующих устройств, нулевые положения стрелок измерительных приборов;

– включение схемы под напряжение допускается только с разрешения преподавателя после проверки им схемы соединения. При включении цепи под напряжение необходимо внимательно следить за показаниями амперметров и других приборов. Если будет замечено ненормальное быстрое движение амперметра к концу шкалы, указывающее на большой ток в цепи, то нужно немедленно разомкнуть тумблер универсального стенда и сообщить об этом преподавателю;

– после замыкания тумблера универсального стенда необходимо убедиться в возможности получения всех необходимых режимов работы цепи (без записей наблюдений) и только после этого вторично получить все нужные режимы работы, записывая наблюдения в бланк лабораторной работы;

– отсчеты по приборам необходимо проводить внимательно и аккуратно, записывая их в момент производства отсчета или непосредственно после отсчета, но до изменения режима работы цепи;

– записи в бланке лабораторной работы должны вестись аккуратно; они должны быть оформлены так, чтобы из них можно было получить все необходимые данные, относящиеся к работе.

При выполнении работы необходимо следить за соблюдением правил техники безопасности (приложение 4):

– категорически воспрещается касаться руками изолированных проводов и зажимов, когда цепь находится под напряжением;

– после выполнения измерений, записей и контрольных расчетов они показываются преподавателю, который дает разрешение на окончание работы или указание о дополнительных измерениях;

– после разборки схемы зажимы у всех приборов должны быть подвернуты, соединительные провода аккуратно собраны и повешены на свои места;

– после выполнения лабораторной работы завершается оформление бланка отчета.

Студенты несут материальную и административную ответственность за сохранность используемого лабораторного оборудования и инвентаря.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Каждый студент самостоятельно должен обработать данные опыта и подготовить отчет о проделанной работе.

Отчет должен быть оформлен аккуратно и грамотно. Схемы вычерчивают в строгом соответствии с условными графическими и буквенно-цифровыми обозначениями элементов электрических схем.

В таблицу данных электроизмерительных приборов включают все использованные в эксперименте электроизмерительные приборы и преобразователи.

При вычислении результатов измерений рекомендуется выполнение арифметических действий с применением вычислительной техники. Результаты вычислений должны иметь одинаковую степень точности (например, до второго десятичного знака).

Графики и векторные диаграммы строят с использованием линейки, циркуля, шаблона, обязательно в масштабе. На графиках масштабы наносят на координатные оси, на векторных диаграммах указывают отдельно (например, 5 А/см, 50 В/см и т. д.). Необходимо использовать стандартные соотношения в выбранных масштабах: количество измерительных единиц (А, В и т. д.) выражают целыми  $1 \cdot 10^n$ ,  $2 \cdot 10^n$  или  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  – любое целое число. Углы откладывают с помощью транспортира.

Выводы по работе должны содержать основную информацию в кратком изложении: основную характеристику наблюдаемых соотношений, явлений, их причины, подтвержденные наблюдением, оценку расхождений между ожидаемыми и наблюдаемыми значениями изучаемых величин и т. п.

Значения отдельных измерений или расчетов на графике должны быть отчетливо показаны в виде точек. Кривую проводят приближенно к теоретическому виду данной зависимости; некоторые экспериментальные точки могут не совпасть с ней, а оказаться вблизи теоретических значений. Возможные причины отклонения следует объяснить в выводах.

Если на одном графике расположено несколько кривых, лучше их построить разным цветом, обозначив у каждой символ изображаемой функции. Аналогично следует подходить и к оформлению векторных диаграмм.

Образец построения графика представлен на рис. 1.

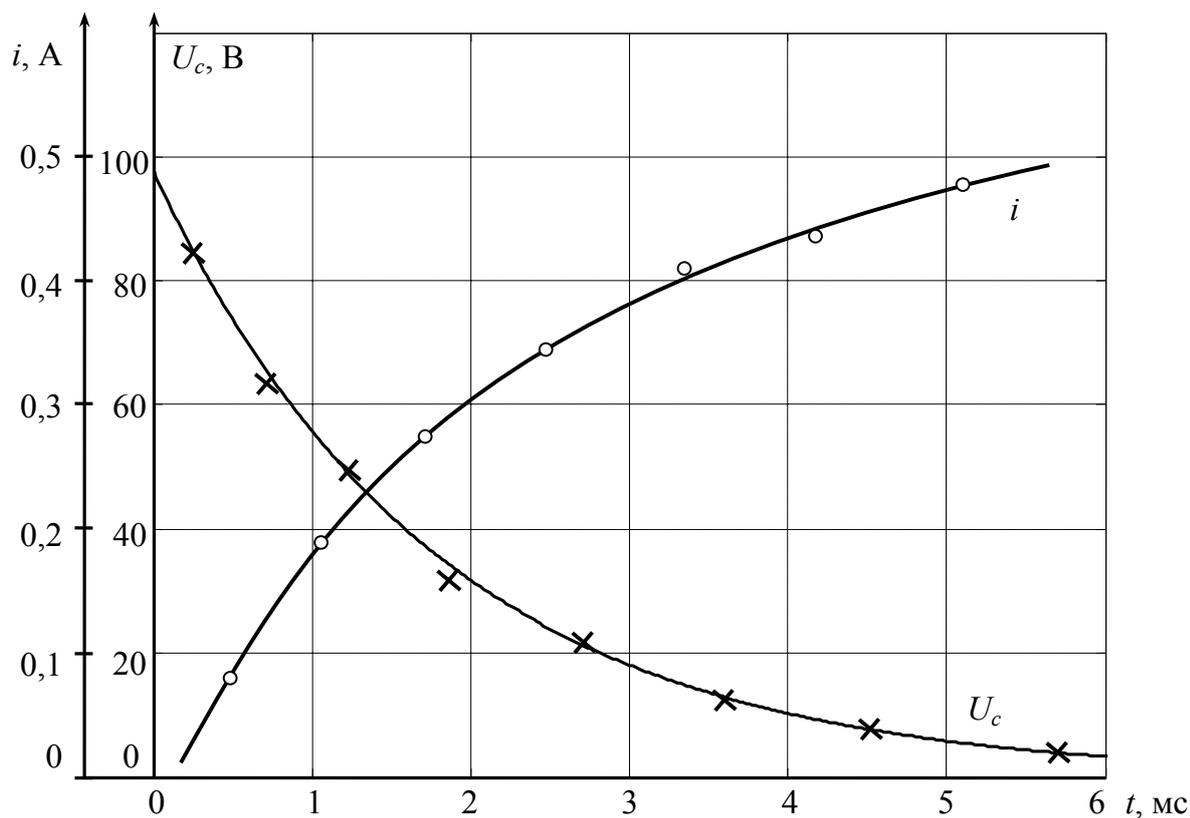


Рис. 1. Образец построения графика

Отчеты, оформленные с нарушениями указанных требований, приниматься не будут. Прием отчетов по лабораторным работам производится на следующем занятии. *При наличии задолженности в количестве двух незащищенных работ к выполнению третьей работы студент не допускается, о чем сообщается в деканат факультета.*

Отчет должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов – первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

# Лабораторная работа № 1

## ОЗНАКОМЛЕНИЕ СО СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С R-, L-, C-ЭЛЕМЕНТАМИ

**Цель работы:** получить навыки измерения и расчета сопротивлений и мощностей в цепи синусоидального тока; приобрести навыки сборки электрической схемы.



### Общие сведения

Схемы замещения элементов электрических цепей синусоидального тока (математические модели электрических цепей) составляются с помощью условных обозначений  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов. Параметры этих элементов:

– резистивный элемент с активным сопротивлением  $R$ , Ом, или активной проводимостью  $G = 1 / R$ , См;

– индуктивный элемент с индуктивностью  $L$ , Гн, и реактивным индуктивным сопротивлением  $X_L = 2\pi fL$ , Ом или реактивной индуктивной проводимостью  $B_L = 1 / X_L$ , См;

– емкостный элемент с емкостью  $C$ , Ф, и реактивным емкостным сопротивлением  $X_C = 1/2\pi fC$ , Ом, или реактивной емкостной проводимостью  $B_C = 1 / X_C$ , См.

**Цепь с резистивным элементом.** Элементы электрической цепи, обладающие только активным сопротивлением  $R$ , называют резисторами (реостат, лампа накаливания). Пусть к зажимам цепи с активным сопротивлением  $R$ , представленной на рис. 2, приложено напряжение  $u = U_{\max} \sin \omega t$ .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенного значения напряжения  $u = Ri$ , т. е.

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_{\max}}{R} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

где  $I_{\max} = U_{\max} / R$  или  $I = U / R$ .

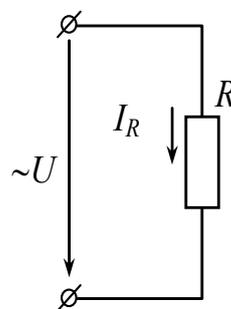


Рис. 2. Электрическая цепь с активным сопротивлением  $R$

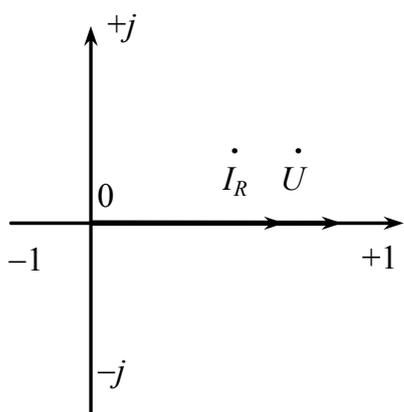


Рис. 3. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $R$ -элементом

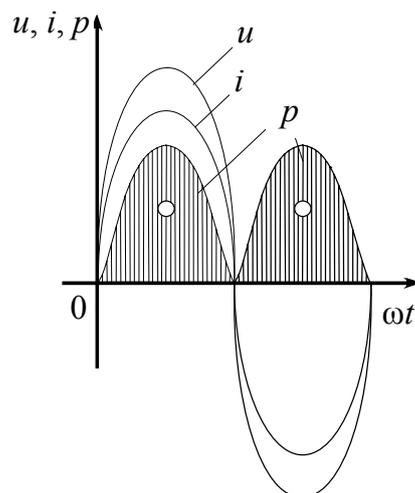


Рис. 4. Временная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $R$ -элементом

Из вышеприведенного видно, что векторы напряжения и тока в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе, что показано на векторной (рис. 3) и временной (рис. 4) диаграммах.

Сдвиг по фазе между напряжением и током цепи с активным элементом (при начальной фазе напряжения  $\psi_u = 0$ ) равен нулю:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0^\circ - 0^\circ = 0^\circ.$$

Комплексные напряжение и ток цепи с резистивным элементом:

$$\dot{U} = U e^{j0^\circ}; \psi_u = 0^\circ;$$

$$\dot{I} = I e^{j0^\circ}; \psi_i = 0^\circ.$$

Тогда комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I} = U e^{j0^\circ} / I e^{j0^\circ} = R,$$

т. е. комплексное сопротивление цепи с резистивным элементом равно положительному вещественному числу, модуль которого равен  $R$ .

*Векторная диаграмма* – это совокупность изображений на комплексной плоскости значений токов и напряжений. Каждый вектор вычерчивается с учетом его амплитуды и угла начальной фазы. За начало отсчета фазы принимается положительное направление оси действительных чисел ( $0, +1$ ) комплексной плоскости.

*Временная диаграмма* – это изображение на плоскости синусоидально изменяющихся величин напряжений и токов одной и той же частоты.

Размеры амплитуд векторов токов и напряжений на векторных диаграммах, а также и амплитуд синусоид на временных диаграммах выполняются в соответствующих масштабах (для токов и напряжений).

Мощность цепи с резистором. Так как напряжение и ток в цепи с  $R$ -элементом совпадают по фазе, мгновенное значение мощности всегда положительно:

$$p = ui = U_{\max} \sin \omega t \cdot I_{\max} \sin \omega t = U_{\max} I_{\max} \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t).$$

Таким образом, в цепи с резистивным элементом вся потребляемая электрическая энергия преобразуется в тепловую или другие виды энергии. Примером резистивного элемента может служить ТЭН, лампа накаливания и др. Так как здесь  $\cos \varphi = 1$ , то среднее значение мощности за период равно активной мощности

$$P = UI = RI^2,$$

где  $P$  – активная мощность цепи, Вт, кВт, МВт.

Полная мощность цепи с  $R$ -элементом равна активной мощности, которая характеризует интенсивность передачи электроэнергии от источника к приемнику и ее преобразование в другие виды энергии. Это активный необратимый процесс. Временная диаграмма мощности цепи приведена на рис. 4.

В комплексной форме полная мощность

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P,$$

где  $\dot{I}^*$  – сопряженный комплекс тока.

Активная мощность измеряется ваттметром:  $P_W = UI = RI^2$ , действующее значение тока – амперметром, а действующее значение напряжения – вольтметром. Таким образом, активное сопротивление цепи, содержащей только резистивный элемент, можно определить по показаниям амперметра и вольтметра или по показаниям ваттметра и амперметра.

$$R = U_R / I; P = P_W / I^2.$$

**Цепь с емкостным элементом.** Конденсатор – это элемент электрической цепи, обладающий емкостью. Конденсатор состоит из двух пластин с большой поверхностью, выполненных из проводникового материала и разделенных диэлектриком. Емкость конденсатора определяет тот электрический заряд, который накапливается на пластинах при разности потенциалов между ними в 1 В.

При подаче на конденсатор синусоидального напряжения в силу того, что напряжение непрерывно меняется по значению и направлению, меняется и заряд на пластинах конденсатора. Это изменение заряда и связанное с ним движение электронов и есть электрический ток в цепи.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника питания и конденсатора емкостью  $C$  (рис. 5).

Пусть напряжение источника питания  $u = U_{\max} \sin \omega t$ . Под действием напряжения в цепи возникает ток  $i$  и на каждой пластине конденсатора накапливается заряд  $Q = Cu_c$ , где  $u_c$  – мгновенное напряжение конденсатора.

По второму закону Кирхгофа для цепи имеем  $u = u_c$ .

Следовательно, ток в цепи пропорционален скорости увеличения напряжения:

$$i = dQ / dt = \omega C U_{\max} \cos \omega t = \omega C U_{\max} \sin(\omega t + \pi / 2) = I_{\max} \sin(\omega t + \pi / 2),$$

где амплитуда тока  $I_{\max} = \omega C U_{\max} = U_{\max} / (1 / \omega C)$ .

Таким образом, в цепи с конденсатором ток опережает напряжение на угол  $\pi / 2$  и изменяется по синусоидальному закону.

Величина  $1 / \omega C$  имеет размерность сопротивления,  $1 \text{ с}/\Phi = 1 \text{ с} \cdot \text{В}/\text{Кл} = 1 \text{ с} \cdot \text{В}/\text{с} \cdot \text{А} = 1 \text{ Ом}$ ). Это реактивное сопротивление емкости или емкостное сопротивление, величина которого обратно пропорциональна частоте и емкости конденсатора:

$$X_c = 1 / \omega C = 1 / 2\pi f C = U_c / I.$$

Комплексные напряжение и ток в этой цепи

$$\dot{U} = U e^{j0^\circ}; \psi_u = 0^\circ;$$

$$\dot{I} = I e^{j90^\circ}; \psi_i = +90^\circ.$$

Сдвиг по фазе  $\varphi$  между напряжением и током (при начальной фазе напряжения  $\psi_u = 0$ ) равен  $-90^\circ$  (ток опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$ ):

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0^\circ - 90^\circ = -90^\circ.$$

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I} = U e^{j0^\circ} / I e^{j90^\circ} = X_c e^{-j90^\circ} = -jX_c.$$

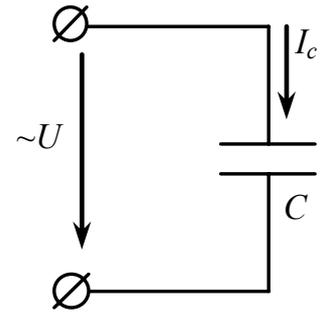


Рис. 5. Электрическая цепь с  $C$ -элементом

Таким образом, комплексное сопротивление цепи с  $C$ -элементом равно отрицательному мнимому числу. Модуль комплексного сопротивления равен  $X_C$ .

Мощность цепи с конденсатором

$$p = ui = U_{\max} \sin \omega t I_{\max} \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t,$$

т. е. мгновенная мощность имеет только переменную составляющую. В первую и третью части периода, когда ток совпадает по направлению с напряжением, мощность положительна и энергия передается от источника питания к цепи, а во вторую и четвертую четверти периода энергия запасается в электрическом поле конденсатора.

Таким образом, через четверть периода мощность меняет знак. Такая энергия обмена энергией между источником и приемником, которая не преобразуется в другие виды энергии, называется *реактивной*. Интенсивность обмена энергией характеризуется реактивной мощностью  $Q_C$ , равной амплитуде мгновенного значения мощности:

$$Q_C = U_C I = C \omega U_C^2 = -X_C I^2,$$

где  $Q_C$  – реактивная мощность цепи, (вар, квар, Мвар).

В комплексной форме полная мощность

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = S e^{j\varphi} = UI \cos 90^\circ - jUI \sin 90^\circ = -jUI.$$

Изменение мощности в цепи с  $C$ -элементом, а также временная диаграмма напряжения и тока представлены на рис. 6.

Векторная диаграмма (на комплексной плоскости) напряжения и тока представлена на рис. 7.

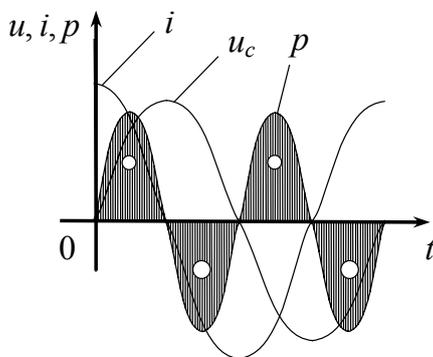


Рис. 6. Временная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $C$ -элементом

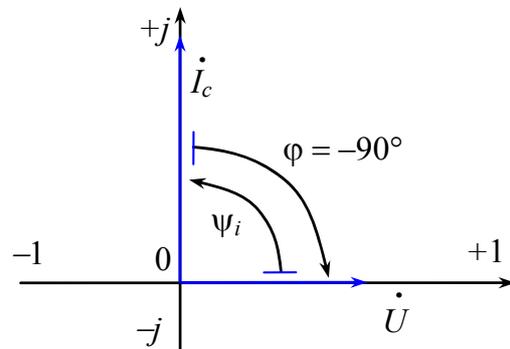


Рис. 7. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $C$ -элементом

В цепи с  $C$ -элементом емкостное сопротивление  $X_c$  и реактивная мощность  $Q_c$  определяются по показаниям вольтметра  $U_c$  и амперметра  $I$  и равны:

$$X_c = U_c / I, \text{ Ом}; Q_c = U_c I \text{ вар.}$$

Ваттметр, включенный в цепь с емкостным сопротивлением, показывает нулевое значение активной мощности. Конденсатор является идеальным реактивным элементом и активную мощность не рассеивает.

**Цепь с индуктивным элементом.** Трансформаторы, электрические двигатели, дроссели, кроме активного сопротивления, обладают индуктивным сопротивлением. Индуктивностью обладают все проводники с током. В ряде случаев она мала и ею пренебрегают, но значительна там, где обмотки катушек состоят из большого числа витков провода.

Индуктивность возрастает, если магнитный поток замыкается по пути с малым магнитным сопротивлением (например, по стальному сердечнику).

Рассмотрим цепь с идеальной катушкой индуктивности с постоянной индуктивностью  $L$ , у которой активное сопротивление  $R_k = 0$  (рис. 8).

Пусть к цепи приложено напряжение  $u = U_{\max} \sin \omega t$ . Под действием напряжения в цепи возникает ток  $i$ , который создает магнитный поток  $\Phi$ . Согласно закону электромагнитной индукции, магнитный поток  $\Phi$  индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -w d\Phi / dt = -L di / dt,$$

где  $w$  – число витков катушки.

Знак «минус», согласно принципу электромагнитной индукции (закон Ленца), указывает на то, что ЭДС самоиндукции  $e_L$  всегда имеет такое направление, при котором она препятствует изменению магнитного потока или тока в цепи.

На рис. 8 показаны условные положительные направления напряжения  $u$ , тока  $i$ , ЭДС самоиндукции  $e_L$  на элементе с индуктивностью  $L$ . Условное положительное направление ЭДС  $e_L$  выбирают исходя из того, что ее действительное направление в любой момент времени противоположно напряжению на катушке  $u_L$ .

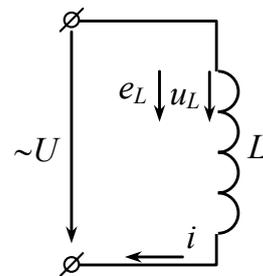


Рис. 8. Электрическая цепь с  $L$ -элементом

По второму закону имеем  $u - u_L = 0$ , а с учетом того, что  $u_L = -e_L$ , получаем

$$u = e_L = 0.$$

Тогда

$$U_{\max} \sin \omega t - L di / dt = 0, \text{ или } di / dt = U_{\max} \sin \omega t / L.$$

При решении этого уравнения получаем выражение для тока в цепи:

$$i = (U_{\max} / L) \sin \omega t dt = - U_{\max} \cos \omega t / \omega L = U_{\max} \sin (\omega t - \pi / 2) / \omega L = \\ = I_{\max} \sin (\omega t - \pi / 2).$$

Таким образом, в цепи с индуктивностью ток отстает по фазе от напряжения на угол  $\pi / 2$  и изменяется по синусоидальному закону.

Величина  $\omega L$  имеет размерность сопротивления,  $1 \text{ Гн/с} = 1 \text{ В}\cdot\text{с/А}\cdot\text{с} = 1 \text{ Ом}$ .

Это реактивное индуктивное сопротивление  $X_L = \omega L = 2\pi fL$ . Оно прямо пропорционально частоте и индуктивности. Тогда

$$I_{\max} = U_{\max} / X_L, \text{ или } I = U / X_L.$$

Так как ЭДС самоиндукции численно равна напряжению на элементе с индуктивностью, то  $X_L I = U = E_L$

Следовательно, индуктивное сопротивление является коэффициентом пропорциональности между током  $i$  и ЭДС самоиндукции  $e_L$ .

Комплексные напряжение и ток цепи

$$\dot{U} = U e^{j0^\circ}, \psi_u = 0^\circ; \\ \dot{I} = I e^{-j90^\circ}, \psi_i = -90^\circ.$$

Сдвиг по фазе между напряжением и током (при начальной фазе напряжения  $\psi_u = 0^\circ$ )

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0^\circ - (-90^\circ) = +90^\circ.$$

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I} = U e^{j0^\circ} / I e^{-j90^\circ} = X_L e^{j90^\circ} = jX_L.$$

Таким образом, комплексное сопротивление цепи с  $L$ -элементом равно положительному мнимому числу.

Модуль комплексного сопротивления

$$Z = X_L.$$

### Мощность цепи с $L$ -элементом

$$p = ui = U_{\max} \sin \omega t - I_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ) = -UI \sin 2\omega t,$$

т. е. мгновенная мощность имеет только переменную составляющую. В первую и третью части периода ток направлен от цепи к источнику питания, а во вторую и четвертую – от источника питания к цепи. Таким образом, через четверть периода мощность меняет знак. Такая энергия обмена между источником и приемником, которая не преобразуется в другие виды энергии, называется *реактивной*. Интенсивность обмена энергией характеризуется реактивной мощностью  $Q_L = U_L I$ .

Реактивная мощность цепи  $Q_L = U_L I = X_L I^2$ , вар, квар, Мвар.

Полная мощность цепи в комплексной форме

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = S e^{j\varphi} = UI \cos 90^\circ + jUI \sin 90^\circ = jUI.$$

Изменение мощности, а также временная диаграмма цепи с идеальной индуктивностью представлены на рис. 9.

Векторная диаграмма (на комплексной плоскости) цепи с идеальной индуктивностью показана на рис. 10.

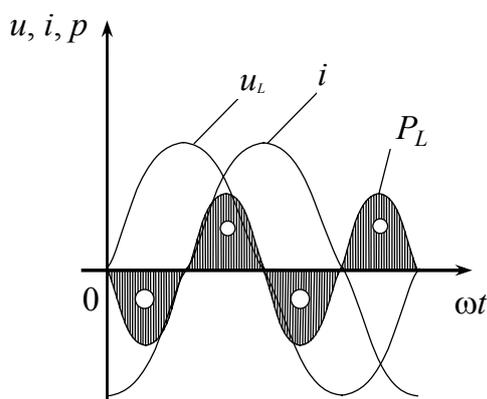


Рис. 9. Временная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $L$ -элементом

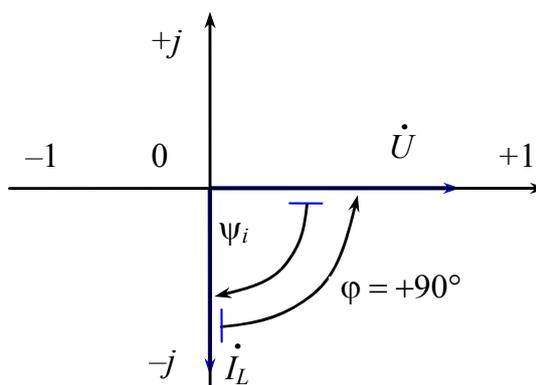


Рис. 10. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с  $L$ -элементом

**Цепь с реальной индуктивной катушкой.** Схема замещения реальной индуктивной катушки содержит  $R$ - и  $L$ -элементы (рис. 11). Наличие активного сопротивления связано с тем, что материалом для изготовления катушки служит металлический провод, обладающий активным сопротивлением.

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = R + jX_L = z e^{j\varphi};$$

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ – модуль эквивалентного сопротивления;}$$

$$\varphi = \arctg X_L / R.$$

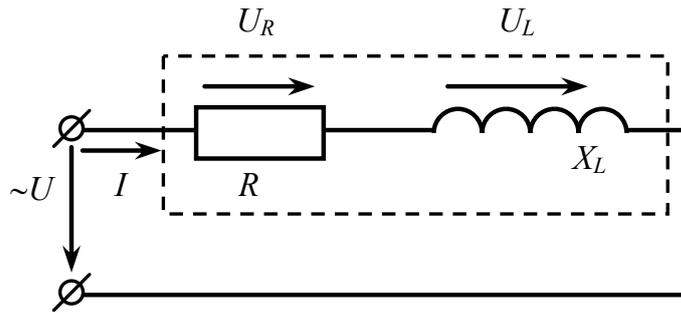


Рис. 11. Электрическая цепь реальной катушки индуктивности, содержащей  $R$ - и  $L$ -элементы

Ток цепи

$$\dot{I} = \dot{U} / Z_{\text{экв.}}$$

Напряжения участков цепи

$$\dot{U}_R = R\dot{I}; U_L = jX_L\dot{I}.$$

Векторная диаграмма цепи с реальной индуктивной катушкой представлена на рис. 12.

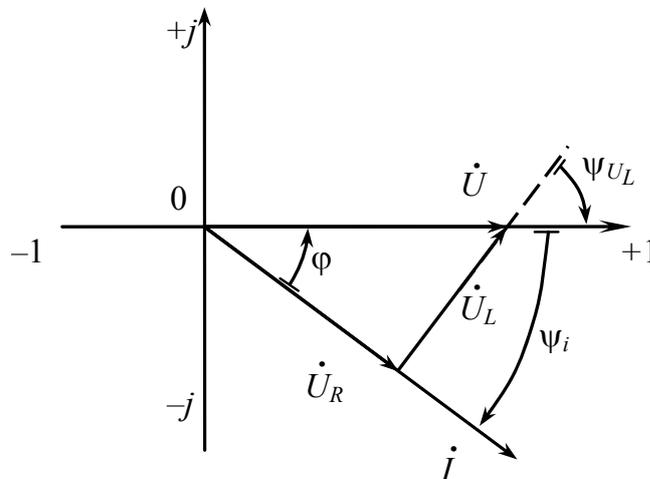


Рис. 12. Векторная диаграмма цепи с реальной индуктивной катушкой;  $\psi_i = 45^\circ$



### Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь согласно рис. 13.
2. После проверки схемы преподавателем подайте напряжение.
3. Включите поочередно в цепь резистор, конденсатор и индуктивную катушку, измеряя в каждом случае напряжение  $U$ ,

ток  $I$  и активную мощность  $P$ . Результаты измерений внесите в табл. 2.

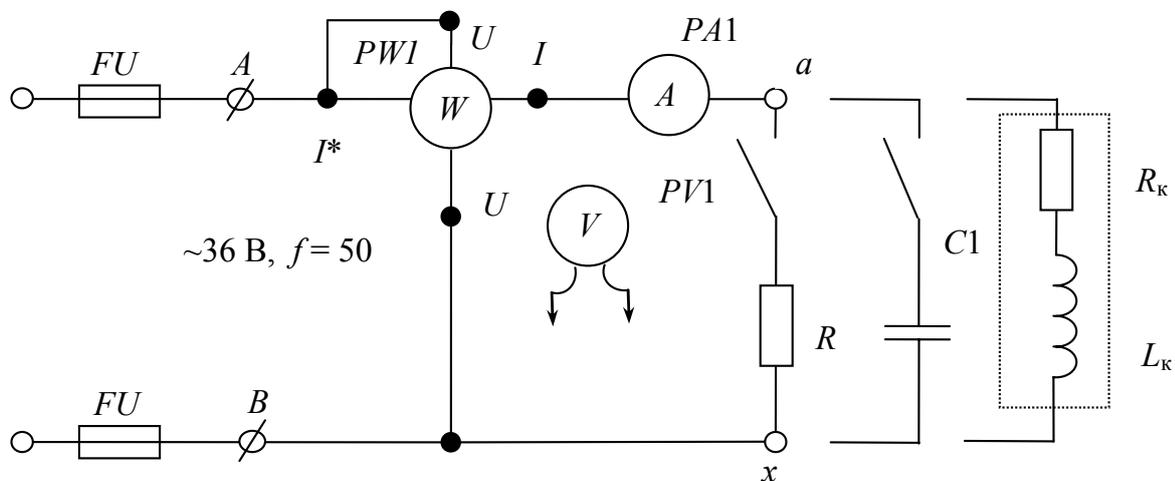


Рис. 13. Схема электрической цепи лабораторной установки

Таблица 2

Приемник	Измерено			Вычислено									
	$U$ , В	$I$ , А	$P$ Вт	$Z$ , Ом	$R$ , Ом	$X$ , Ом	$S$ , ВА	$Q$ , вар	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$\cos\varphi$	$\varphi$ , град	$\psi_i$ , град
Резистор								–	–	–			
Конденсатор									–				
Индуктивная катушка										–			

3. По результатам измерений:

– вычислите значения величин, указанных в табл. 2.

– постройте векторные и временные диаграммы токов, напряжений, мощностей для п. 1, 2; для п. 3 – векторную диаграмму токов, напряжений и треугольник мощностей; начальную фазу напряжения  $\psi_u$  принять согласно варианту табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта (стенда)	1	2	3	4	5	6	7	8
$\psi_u$	+30°	–30°	+45°	–45°	+60°	–60°	–90°	–90°

4. Сформулируйте выводы по работе согласно ее цели.



## Контрольные вопросы

1. Какие свойства элементов электрической цепи характеризуют параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ?
2. Какое сопротивление называется активным, индуктивным, емкостным? Приведите примеры активного, активно-индуктивного и емкостного сопротивлений.
3. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока с активным сопротивлением, емкостным, активно-индуктивным и как он определяется?
4. Запишите формулу закона Ома для цепи с активно-индуктивным сопротивлением.
5. Как по данным исследования можете объяснить наличие в цепи индуктивного сопротивления?
6. Назовите приемники электрической энергии, обладающие параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ .
7. Что такое действующее и мгновенное значения тока и напряжения?
8. Как по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра определяют активное, индуктивное и емкостное сопротивления?
9. Что такое активная, реактивная и полная мощности; их физический смысл; чем они измеряются и как вычисляются?
10. Что такое коэффициент мощности, как он определяется и как изменяется с изменением  $X_c$ ?
11. Мгновенное значение напряжения  $u = 100\sin(\omega t - 30^\circ)$ . Определите действующее значение и начальную фазу напряжения.
12. Действующее значение тока  $I = 5$  А, начальная фаза тока  $\psi_i = 45^\circ$ . Напишите мгновенное значение тока  $i$ . Запишите значение комплексного тока.
13. Мгновенное значение тока  $i = 14,1\sin(\omega t + 60^\circ)$ . Запишите значение комплексного тока в алгебраической, тригонометрической, показательной формах записи.
14. Как осуществляется переход от алгебраической формы записи комплексного тока к мгновенному значению?
15. Катушка индуктивности  $L = 0,032$  Гн подключена к источнику питания  $U = 80$  В,  $f = 50$  Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, если начальная фаза напряжения  $\psi_u = 30^\circ$ .

16. Конденсатор  $C = 600$  мкФ подключен к источнику питания  $U = 40$  В,  $f = 50$  Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, если начальная фаза тока  $\psi_i = 30^\circ$ .

17. Катушка индуктивности  $L = 0,08$  Гн подключена к источнику питания  $U = 100$  В,  $f = 40$  Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, если начальная фаза напряжения  $\psi_u = 120^\circ$ .

18. Конденсатор  $C = 800$  мкФ подключен к источнику питания  $U = 90$  В,  $f = 60$  Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, если начальная фаза тока  $\psi_i = -120^\circ$ .

## Лабораторная работа № 2 АНАЛИЗ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Цель работы:** изучить особенности неразветвленной электрической цепи при различных соотношениях индуктивного и емкостного сопротивлений.



### Общие сведения

Схема замещения неразветвленной электрической цепи, содержащей индуктивную катушку и конденсатор, представлена на рис. 14.

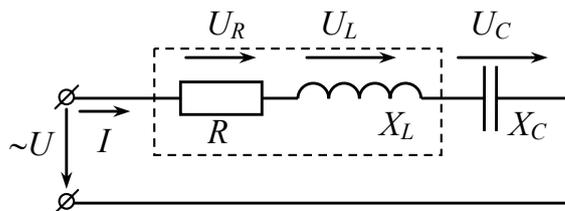


Рис. 14. Электрическая цепь с последовательным соединением  $R, L, C$

Проанализируем данную электрическую цепь – рассмотрим значения тока цепи  $I$ , напряжений на отдельных участках  $U_R, U_L, U_C$ , полной, активной и реактивной мощностей.

Так как при последовательном соединении элементов  $R, L, C$  ток является общим для всех элементов цепи, то удобно принять

$$i = I_m \sin \omega t.$$

По II закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C = \\ &= I_{\max} R \sin \omega t + I_{\max} \omega L \sin(\omega t + \pi/2) + I_{\max} (1/\omega C) \sin(\omega t - \pi/2). \end{aligned}$$

Выбрав направление обхода контура по часовой стрелке, запишем уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексном виде:

$$\dot{U} = RI + j\omega LI - I/(j\omega C) = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Векторные диаграммы тока и напряжений цепи при различных соотношениях  $X_L$  и  $X_C$  показаны на рис. 15.

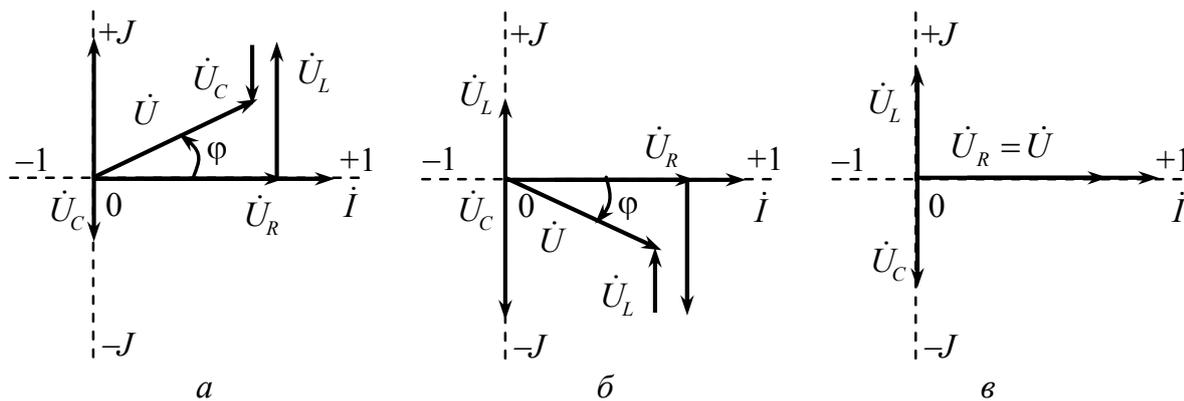


Рис. 15. Векторные диаграммы при различных соотношениях  $X_L$  и  $X_C$ :  
 $a - X_L > X_C$ ;  $b - X_L < X_C$ ;  $v - X_L = X_C$

Из векторных диаграмм следует, что векторы напряжений образуют треугольник напряжений, в котором гипотенуза – входное напряжение цепи  $U$ , катет, прилегающий к углу  $\varphi$ , – активная составляющая напряжения  $U_R$ , второй катет  $U_L - U_C = U_p$  – реактивная составляющая напряжения

$$U_R = U \cos \varphi; U_p = U \sin \varphi;$$

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

Если в треугольнике напряжений все стороны разделить на ток  $I$ , то получим треугольник сопротивлений (рис. 16, *a*), а если умножить на  $I^2$  – треугольник мощностей (рис. 16, *б*).

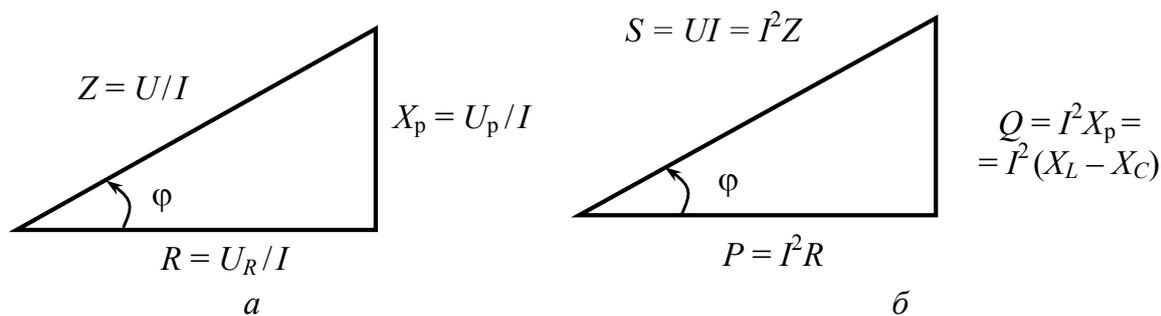


Рис. 16. Треугольник:  
 $a$  – сопротивлений;  $б$  – мощностей

Из треугольника сопротивлений

$$R = Z \cos \varphi; X_p = Z \sin \varphi; Z = \sqrt{R^2 + X_p^2}.$$

Из треугольника мощностей

$$P = S \cos \varphi; Q = S \sin \varphi; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Из треугольников определяют

$$\cos\varphi = U_R / U = R / Z = P / S.$$

Свое название  $\cos\varphi$  получил из треугольника мощностей – коэффициент мощности – важный показатель элементов электрооборудования. Определяет, какую часть от полной мощности составляет активная мощность, мощность, расходуемая на совершение полезной работы.

Комплексные ток и напряжения

$$\dot{I} = I e^{j0^\circ}.$$

$$\dot{U} = \dot{U} e^{j\varphi} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = IR + IjX_L - IjX_C = I(R + j(X_L - X_C)).$$

Разделив обе части уравнения на  $\dot{I}$ , получим комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = U e^{j\varphi} / I e^{j0^\circ} = Z e^{j\varphi} = R + j(X_L - X_C),$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  – модуль комплексного сопротивления, или полное сопротивление цепи;  $R$  – активное сопротивление цепи;  $X_L - X_C = X_p$  – реактивное сопротивление цепи;  $\varphi$  – аргумент комплексного сопротивления, равный углу сдвига фаз между векторами напряжения и тока  $\varphi = \arctg(X_L - X_C) / R$ .

При последовательном соединении элементов с  $R, L, C$  ток в цепи

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

В зависимости от соотношений между индуктивным и емкостным сопротивлениями в электрической цепи с последовательным соединением индуктивной катушки и конденсатора имеют место три характерных режима:

– недокомпенсации реактивного сопротивления, когда ток отстает от напряжения ( $X_L > X_C$ ),  $0 < \varphi < 90^\circ$ ;

– перекомпенсации реактивного сопротивления, когда ток опережает напряжение ( $X_C > X_L$ ),  $0 < \varphi < -90^\circ$ ;

– компенсации реактивного сопротивления, когда ток и напряжение совпадают по фазе ( $X_C = X_L$ ),  $\varphi = 0^\circ$ .

Из всех возможных соотношений между индуктивным  $X_L$  и емкостным  $X_C$  сопротивлениями особый интерес представляет случай, когда эти сопротивления равны, т. е.  $X_L = X_C$ . В этом случае реактивное сопротивление  $X_p = X_L - X_C = 0$  и полное сопротивление цепи  $Z = R$  минимальны. Тогда ток в цепи  $I = U / R$  и при  $U = \text{const}$ ,  $R = \text{const}$  значение его максимально.

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах по значению равны

$$U_L = X_L I = X_C I = U_C.$$

Следовательно,

$$U_L = X_L I = X_L U / R; U_C = X_C I = X_C U / R.$$

Таким образом, напряжения на индуктивном и емкостном элементах могут превышать напряжение сети в  $X_L / R$  раз, если  $X_L > R$ .

Сдвиг по фазе между напряжениями  $U_L$  и  $U_C$  равен  $\pi$ , т. е. эти напряжения находятся в противофазе.

Режим цепи при последовательном соединении элементов с  $R$ ,  $L$  и  $C$ , когда  $X_L = X_C$ , а напряжения на индуктивном ( $U_L$ ) и емкостном ( $U_C$ ) элементах находятся в противофазе, называется *режимом резонанса напряжений*.

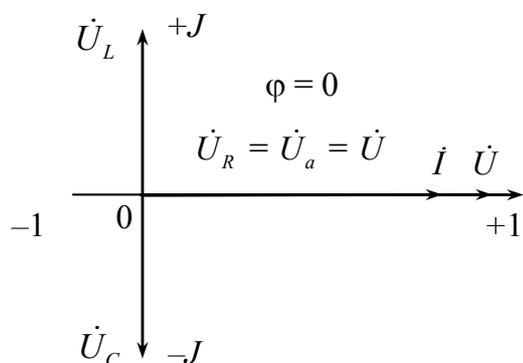


Рис. 17. Векторная диаграмма для режима резонанса напряжений

Векторная диаграмма напряжений для резонанса представлена на рис. 17. Реактивная составляющая напряжения равна нулю; следовательно, полное напряжение  $U = U_R$ , а угол сдвига фаз

$$\varphi = 0; \cos \varphi = 1.$$

Активная мощность такой цепи  $P = UI \cos \varphi = UI = S$ , а реактивная  $Q = UI \sin \varphi = 0$ . В режиме резонанса напряжений реактивные мощности индуктивной катушки ( $Q_L = X_L I^2$ ) и конденсатора ( $Q_C = X_C I^2$ ) равны между собой, но обратные по знаку. Происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора.

Равенства индуктивного и емкостного сопротивлений  $\omega L = 1/(\omega C)$  можно добиться, изменяя угловую частоту  $\omega$ , индуктивность  $L$  или емкость  $C$ . Угловая частота, при которой наступает резонанс напряжений,

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

При этой резонансной частоте ток в цепи достигает максимального значения. При уменьшении частоты увеличивается сопротивление  $X_C = 1/(\omega C)$ , а следовательно, и реактивное сопротивление цепи  $X_p = X_L - X_C$  становится не равным нулю. Ток  $I = U/\sqrt{R^2 + X_p^2}$  умень-

шается. При частоте  $\omega = 0$ , что формально соответствует напряжению постоянного тока, ток в цепи равен нулю ( $X_C$  равен бесконечности), реактивное сопротивление цепи тоже становится больше нуля и ток начинает уменьшаться (рис. 18).

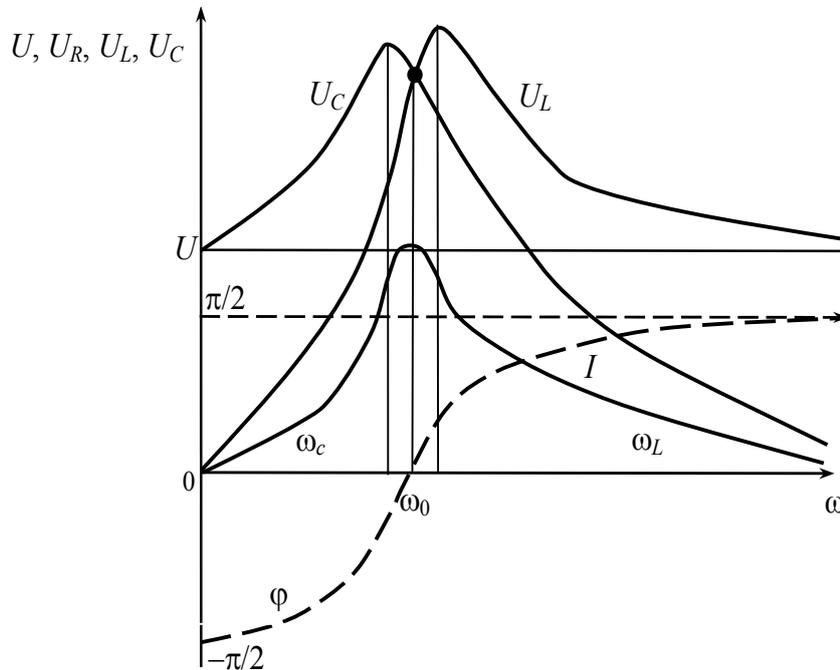


Рис. 18. Зависимость напряжений и тока от частоты

Падение напряжения на элементе с активным сопротивлением  $U_R = RI$  изменяется так же, как ток в цепи, поскольку  $R = \text{const}$ . При этом  $U_R = U$ , если  $\omega = \omega_0$ .

Зафиксировать наступление резонанса напряжений можно по показанию:

- амперметра (он покажет максимальное значение силы тока);
- вольтметра (напряжения на катушке и конденсаторе будут приблизительно равны);
- ваттметра (ваттметр покажет максимальное значение активной мощности).

Явление резонанса напряжений используют в устройствах радиотехники, телевидения, автоматики и других электроустройствах.

Если электрическая цепь имеет такие  $L$  и  $C$ , что резонансной для этой цепи является частота  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , то ток этой частоты будет максимальным. Токи других частот (если в цепи действуют несколько напряжений разной частоты) будут меньше. Изменяя индуктивность  $L$  или емкость  $C$ , можно настроить контур на эту частоту, т. е. усилить ток этой цепи.

В электросиловых устройствах это явление не нашло применения, так как в режиме резонанса напряжений резко увеличиваются напряжения  $U_L$  и  $U_C$ , что может привести к пробоев их изоляции.



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить материал, указанный в литературе.
2. Письменно ответить на контрольные вопросы, представленные в 4-м пункте лабораторной работы.
3. При заданных напряжении сети  $U$ , параметрах катушки  $R_k, L_k$ , частоте сети  $f = 50$  Гц согласно номеру варианта (табл. 4) рассчитать емкость конденсатора  $C$  для получения резонанса напряжения в исследуемой цепи, ток  $I_{рез}$  в этом режиме, а также напряжения на индуктивной катушке  $U_{L-R}$  и конденсаторе  $U_C$ .

Таблица 4

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U, В$	33,8	34,0	33,9	33,9	34	33,9	34	33,9
$L_k, мГн$	589	592	308	560	450	615	480	440
$R_k, Ом$	55,4	45,9	76,5	84,7	38,1	47,5	38,2	38,0

Полученные данные занести в табл. 5.

Таблица 5

$C, мкФ$	$I_{рез}, А$	$U_{L-R}, В$	$U_C, В$	Примечание

Подготовить бланк отчета к лабораторному занятию.



### Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую схему согласно рис. 19.
2. После проверки схемы преподавателем подключите стенд к сети.
3. Увеличивая емкость конденсатора, определите режим резонанса напряжений по показаниям амперметра (максимальный ток),

ваттметра (максимальная мощность). Уточните наступление резонанса при помощи вольтметра.

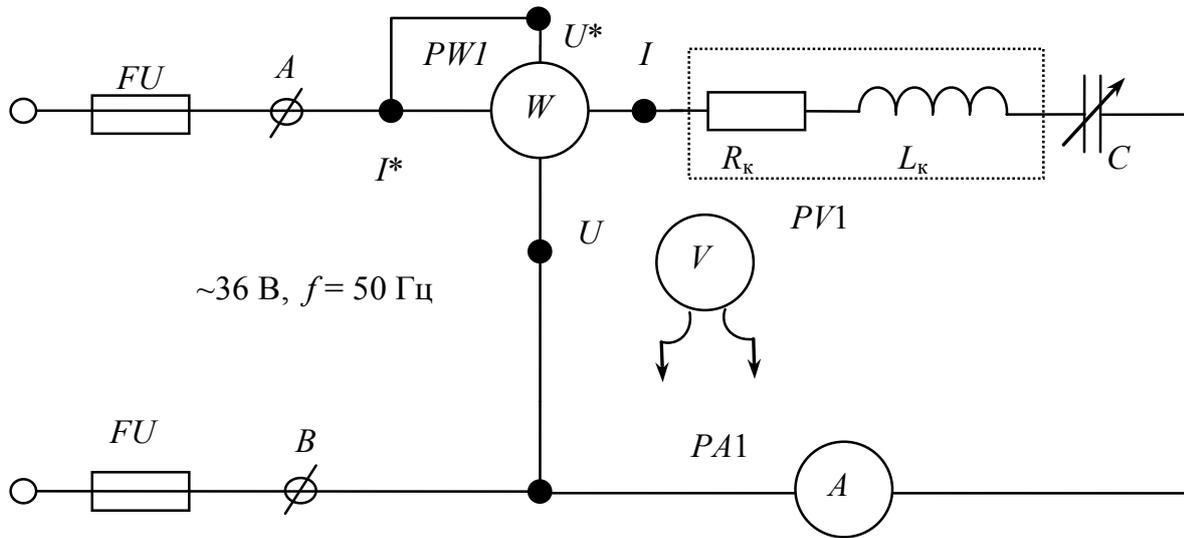


Рис. 19. Схема электрической цепи лабораторной установки

4. Увеличивая емкость конденсатора, запишите показания приборов в табл. 6 для следующих режимов:

- а)  $X_C \gg X_L, I_A \ll I_{рез}$ ;
- б)  $X_C > X_L, I_A < I_{рез}$ ;
- в)  $X_C \cong X_L, I_A = I_{рез}$ ;
- г)  $X_C < X_L, I_A < I_{рез}$ ;
- д)  $X_C \ll X_L, I_A \ll I_{рез}$ .

5. Полученные данные внесите в табл. 6.

Таблица 6

Измерено					Вычислено											
$U$ , В	$U_{L-R}$ , В	$U_C$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$R$ , Ом	$X_L$ , Ом	$X_C$ , Ом	$X_p$ , Ом	$Z$ , Ом	$S$ , ВА	$Q$ , вар	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_p$ , В	$\cos \varphi$	$\varphi$ , град

5. По результатам исследования вычислите значения величин, приведенных в табл. 6.

6. Постройте векторные диаграммы тока и напряжений для п. 1, 3, 5; треугольники мощностей для п. 1, 5 табл. 6.

При построении векторной диаграмм примите начальную фазу тока  $\psi_i$  равной начальной фазе напряжения по табл. 6 согласно своему варианту.

7. Исследуйте влияние изменения частоты сети, емкости конденсатора, индуктивности катушки на ток цепи и напряжения на реактивных элементах цепи, угол сдвига фаз, используя программу «SHABLON» (ауд. 101, 111, корпус 1):

– в программу 2 «Неразветвленные цепи синусоидального тока» введите в базу данных из табл. 4 значения напряжения  $U$  (В), индуктивности катушки  $L$  (мГн), из табл. 5 значение емкости конденсатора  $C$ , (мкФ); частоту сети  $f$  принять равным 50 Гц;

– набрав команду «Рассчитать», получите на экране значения:

$U_L$  – напряжение на катушке индуктивности;

$U_C$  – напряжение на конденсаторе;

$I$  – ток цепи;

$\varphi$  – сдвиг фаз;

– получите графики зависимостей:

$I = f(f)$ ;  $U_L = f(f)$ ;  $U_C = f(f)$ ;  $\varphi = f(f)$ ;

$I = f(L_k)$ ;  $U_L = f(L_k)$ ;  $U_C = f(L_k)$ ;  $\varphi = f(L_k)$ ;

$I = f(C)$ ;  $U_L = f(C)$ ;  $U_C = f(C)$ ;  $\varphi = f(C)$ ;

– проанализируйте полученные зависимости.

8. Нанесите на полученные графики экспериментальные значения  $I$ ,  $U_C$  и расчетные величины  $I$ ,  $U_L$ ,  $\varphi$  из табл. 5. Сравните расчетные значения  $I_{рез}$ ,  $U_C$  с экспериментальными данными табл. 6.

9. Проанализируйте результаты исследования.

10. Сформулируйте выводы по работе.



## Контрольные вопросы

1. В каких режимах может работать электрическая цепь при последовательном соединении  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов?

2. Соотношение каких величин определяют режимы работы электрических цепей?

3. Какое явление называется резонансом напряжений?

4. При каких условиях возникает резонанс напряжений?

5. Изменением каких параметров цепи можно добиться резонанса напряжений?

6. По показаниям каких приборов можно судить о наступлении резонанса напряжений?

7. Чему равен  $\cos\varphi$  в режиме резонанса напряжений?

8. В каком соотношении могут быть величины входного напряжения и напряжений на реактивных элементах цепи, содержащей  $R$ ,  $L$  и  $C$  в режиме резонанса напряжений?

9. При каких условиях возникают перенапряжения на реактивных элементах цепи?

10. Где находит применение резонанс напряжений?

11. Почему не нашел применения резонанс напряжений в силовых цепях?

12. В цепь синусоидального тока частотой  $f = 50$  Гц последовательно включены  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $L = 0,096$  мГн,  $C = 630$  мкФ. Напряжение на конденсаторе  $U_C = 30$  В. Определить ток, активную, реактивную и полную мощность цепи. Вычертить электрическую схему цепи и построить векторную диаграмму, если начальная фаза тока  $\psi_i = -45^\circ$ .

13. Напряжение сети  $U = 50$  В, начальная фаза напряжения  $\psi_u = 60^\circ$ ; ток цепи  $I = 10$  А, начальная фаза тока  $\psi_i = +30^\circ$ . Определить параметры цепи при последовательном соединении элементов, активную, и реактивную мощности электрической цепи.

14. В цепь синусоидального тока частотой  $f = 50$  Гц последовательно включены  $R_1 = 25$  Ом,  $X_L = 25$  Ом,  $X_C = 50$  Ом. Напряжение на конденсаторе  $U_C = 250$  В. Определить ток, активную, реактивную и полную мощности цепи. Вычертить электрическую схему цепи и построить векторную диаграмму, если начальная фаза тока  $\psi_i = -45^\circ$ .

## Лабораторная работа № 3 АНАЛИЗ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Цель работы:** изучить особенности электрической цепи при различных соотношениях индуктивной и емкостной проводимостей; приобрести навыки настройки исследуемой цепи на различные режимы работы.



### Общие сведения

При исследовании разветвленной цепи синусоидального тока, содержащей индуктивную катушку и конденсатор, ее схема замещения может быть представлена параллельным соединением  $R$ - $L$ - и  $C$ -элементами (рис. 20).

В процессе анализа данной цепи рассматриваются значение тока цепи  $I$ , протекающего по неразветвленному участку; токов  $I_C$ ,  $I_{L-R}$ , протекающих по параллельным ветвям цепи; полной, активной и реактивной мощностей ( $S$ ,  $P$ ,  $Q$ ) в зависимости от соотношений  $B_L$  и  $B_C$ .

Ток  $I$ , протекающий по неразветвленному участку цепи, согласно закону Ома, для рассматриваемой цепи зависит от полной проводимости  $Y$  и приложенного напряжения  $U$ :

$$I = Y \cdot U,$$

где  $Y$  – полная проводимость цепи:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2},$$

здесь  $G$  – активная проводимость цепи, для рассматриваемой цепи  $G = R_k / (R_k^2 + X_k^2)$ , См;  $B_C$ ,  $B_L$  – соответственно емкостная и индуктивная проводимости цепи, См:

$$B_C = 1 / X_C = \omega C;$$

$$B_L = X_k / (R_k^2 + X_k^2).$$

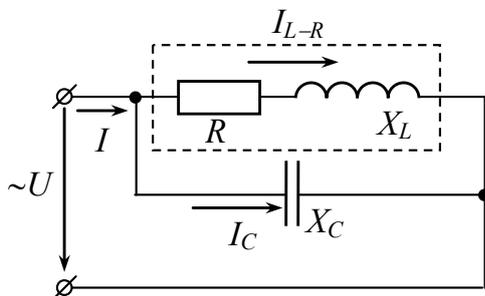


Рис. 20. Электрическая цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора

Согласно первому закону Кирхгофа, ток  $I$  связан с токами  $I_C$  и  $I_{L-R}$  в комплексной форме записи  $\dot{I} = \dot{I}_C + \dot{I}_{L-R}$ .

На рис. 21 векторы токов образуют треугольник, катеты которого равны активной  $I_a$  и реактивной  $I_p$  составляющим тока, а гипотенуза – полному току  $I$ .

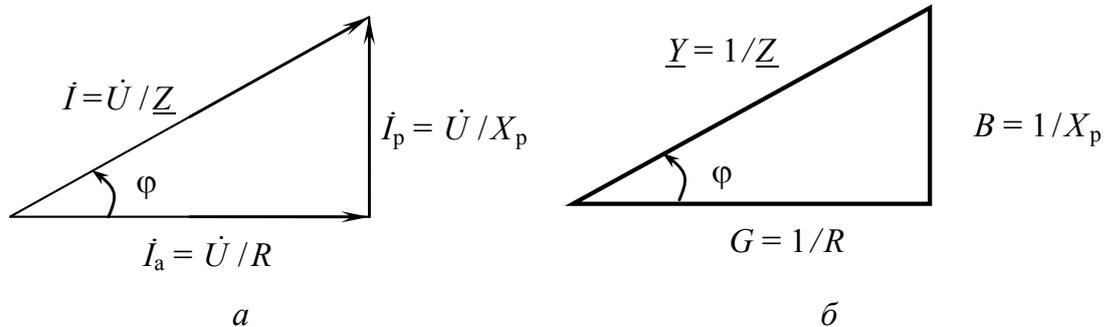


Рис. 21. Треугольник:  
а – токов; б – проводимостей

Если  $I_{L-R} > I_C$ , то  $I_p$  отстает от напряжения, а полный ток  $I$  – на  $\varphi$  ( $0 < \varphi < \pi / 2$ ).

Если  $I_{L-R} < I_C$ , то ток  $I_p$  опережает напряжение, а полный ток  $I$  – на  $\varphi$  ( $-\pi / 2 < \varphi < 0$ ).

Если каждую сторону треугольника токов разделить на напряжение, то получим треугольник проводимостей, из которого следует, что полная проводимость цепи равна корню квадратному из суммы квадратов активной  $G$  и реактивной  $B_p = B_C - B_L$  проводимостей.

Полный ток цепи при параллельном соединении элементов

$$I = YU = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \cdot U.$$

Из треугольника проводимостей получаем соотношения:

$$G = Y \cos\varphi;$$

$$B = Y \sin\varphi;$$

$$\varphi = \arctg (B/G) = \arctg ((B_C - B_L) / G).$$

Полная проводимость цепи в комплексной форме

$$\underline{Y} = 1 / \underline{Z} = 1 / (Ze^{j\varphi}) = Y e^{-j\varphi} = G - jB,$$

где  $G$  и  $B$  – активная и реактивная проводимости соответственно.

Если в цепи преобладает индуктивная проводимость ( $B_L > B_C$ ), то реактивная проводимость в комплексной форме отрицательна,

а если преобладает емкостная проводимость ( $B_L < B_C$ ), то – положительна.

В зависимости от соотношений между индуктивной и емкостной проводимостями в электрической цепи с параллельным соединением индуктивной катушки и конденсатора могут иметь место три характерных режима (векторная диаграмма цепи показана на рис. 22):

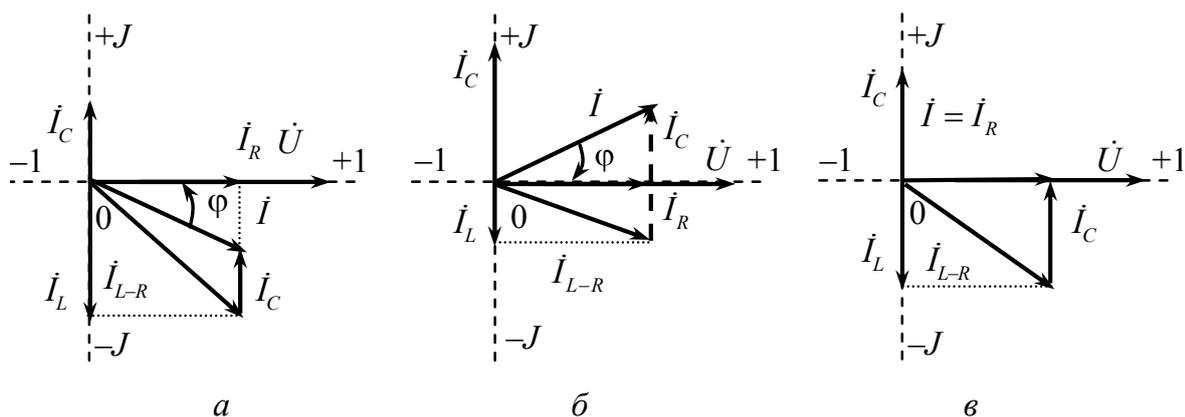


Рис. 22. Векторная диаграмма цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора

а) режим, при котором ток  $I$  отстает по фазе от приложенного к цепи напряжения  $U$  ( $B_L > B_C$ ), называют режимом недокомпенсации реактивной мощности, на рис. 22, а приведена векторная диаграмма токов и напряжений такой цепи;

б) режим, при котором ток  $I$  опережает по фазе приложенное напряжение ( $B_L < B_C$ ), называется перекомпенсацией реактивной мощности, векторная диаграмма токов и напряжения приведена на рис. 22, б;

в) режим совпадения по фазе тока  $I$  и напряжения  $U$  ( $B_L = B_C$ ); векторная диаграмма токов и напряжений приведены на рис. 22, в; этот режим электрической цепи называется резонансом токов.

Так как режим резонанса токов возникает при  $\omega L / (R_k^2 + (\omega L)^2) = \omega C$ , то получить этот режим можно тремя способами, а именно изменением:

- 1) ёмкости конденсатора  $C$ ;
- 2) индуктивности катушки  $L$ ;
- 3) частоты  $f$  приложенного напряжения  $U$ .

В режиме резонанса токов полная проводимость цепи  $Y = G$ , так как  $B_L = B_C$ , реактивная мощность равно нулю, а цепь потребляет только активную мощность. Следовательно,  $\cos\varphi = 1$ . Токи  $I_L = I_C$  и могут превышать общий ток  $I$  в цепи в  $B_L / G$  раз, если  $B_L = B_C > G$ .

Несмотря на то, что в ветвях с  $L$  и  $C$  протекают токи, превышающие полный ток, они всегда противоположны по фазе друг другу. Поэтому через каждую четверть периода происходит обмен энергией между магнитным полем индуктивной катушки и электрическим полем конденсатора, который поддерживается напряжением источника питания.

Режим резонанса токов может быть получен путем подбора параметров цепи при заданной частоте источника питания или путем настройки частоты при заданных параметрах цепи. Графики зависимости тока в линии и коэффициента мощности от емкости конденсатора приведены на рис. 23.

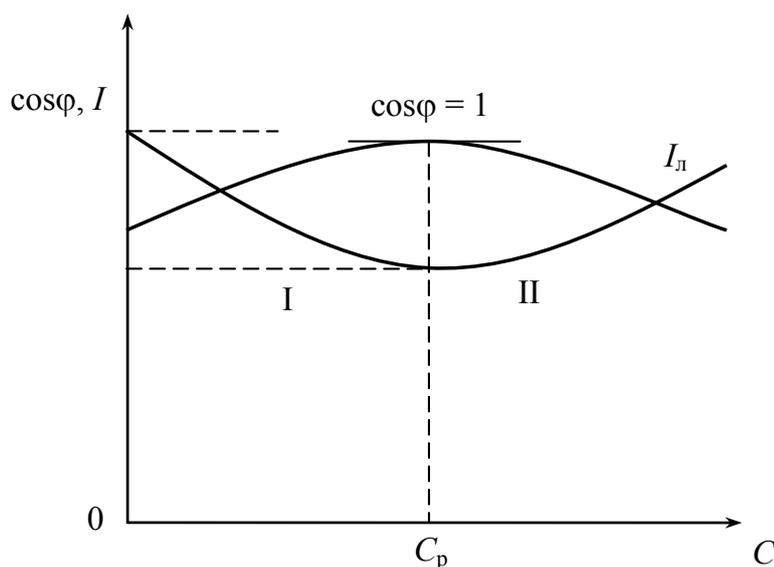


Рис. 23. Зависимость тока в линии и коэффициента мощности от емкости конденсаторов  $C$ ;  
 I – область недокомпенсации; II – область перекомпенсации;  
 $C_p$  – точка резонанса

Резонанс токов нашел широкое применение в мероприятиях по повышению коэффициента мощности промышленных предприятий.

Большинство промышленных потребителей переменного тока имеют активно-индуктивный характер: асинхронные двигатели, установки электрической сварки, высокочастотной закалки и др. Они работают с низким коэффициентом мощности и, следовательно, потребляют значительную реактивную мощность, что приводит к необоснованной загрузке реактивным током источников питания и линии электропередач.

Для уменьшения реактивной мощности и повышения коэффициента мощности параллельно потребителю включают батарею косинусных конденсаторов (рис. 24).

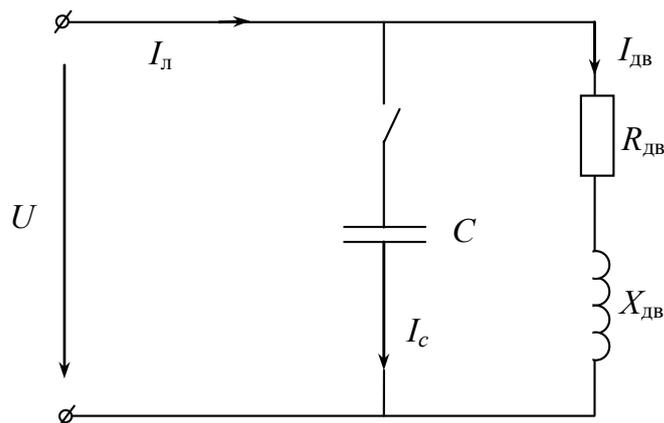


Рис. 24. Электрическая цепь с параллельным включением конденсатора

На векторной диаграмме (рис. 25)  $I_l = I_{dv}$  – полный ток, протекающий по линии электропередач до подключения батареи косинусных конденсаторов после подключения батареи:

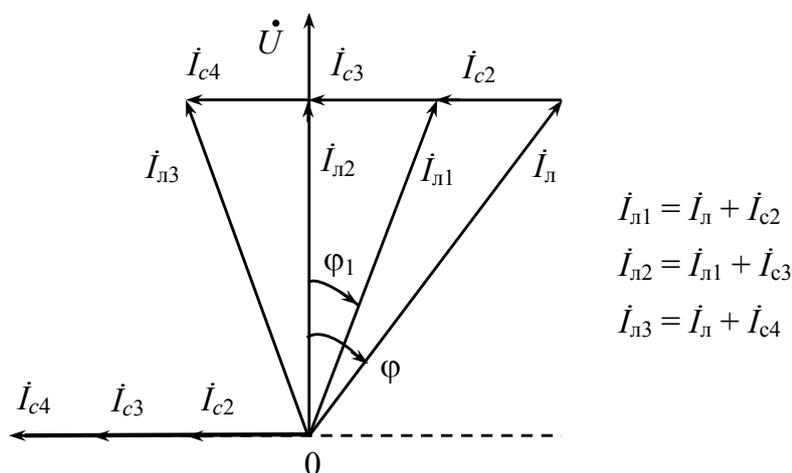


Рис. 25. Векторная диаграмма электрической цепи с параллельным включением конденсатора

Реактивная мощность конденсаторной батареи уменьшает общую реактивную мощность установки, так как

$$Q = Q_L - Q_c,$$

и тем самым увеличивает коэффициент мощности.

Резонанс токов широко применяется в электроустановках для компенсации реактивной мощности, во многих радиотехнических устройствах и т. д.

При резонансе токов в электрической цепи:

а) полная проводимость равна активной проводимости, т. к. индуктивная и емкостная проводимости взаимно компенсируются;

б) в момент резонанса ток неразветвленного участка достигает минимального значения, т. к. полная проводимость цепи становится наименьшей, равной величине активной проводимости.

в) амперметры в цепи катушки и конденсатора показывают одинаковое значение силы тока.



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить материал, указанный в литературе. По заданным параметрам катушки  $R_k$  и  $L_k$  и величине  $U$  согласно своему варианту (табл. 7) подобрать емкость конденсатора  $C_{рез}$  для получения резонанса токов при частоте 50 Гц. Рассчитать  $C_{рез}$ ,  $I_c$ ,  $I_{L-R}$ ,  $I$ . Полученные данные внести в табл. 8.

Таблица 7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_k$ , мГн	590	580	525	574	636	652	675	700	715	800
$R_k$ , Ом	40,3	40,3	57	88	44	43	43,6	48	50	600
$U$ , В	38	37,8	37,0	38	37,8	39,0	37,6	38,0	37,8	38,0

Таблица 8

$C_{рез}$ , мкФ	$I_c$ , А	$I_{L-R}$ , А	$I$ , А	Примечание

2. В программе 3 «Разветвленные цепи синусоидального тока» ввести в базу данных значения напряжения  $U$ , В, индуктивности катушки  $L$ , мГн, из табл. 7, значение емкости конденсатора  $C$ , мкФ, из табл. 8.

3. Получить результаты.



### Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь согласно схеме, представленной на рис. 26.

2. Измерьте напряжение питания схемы при помощи мультиметра.

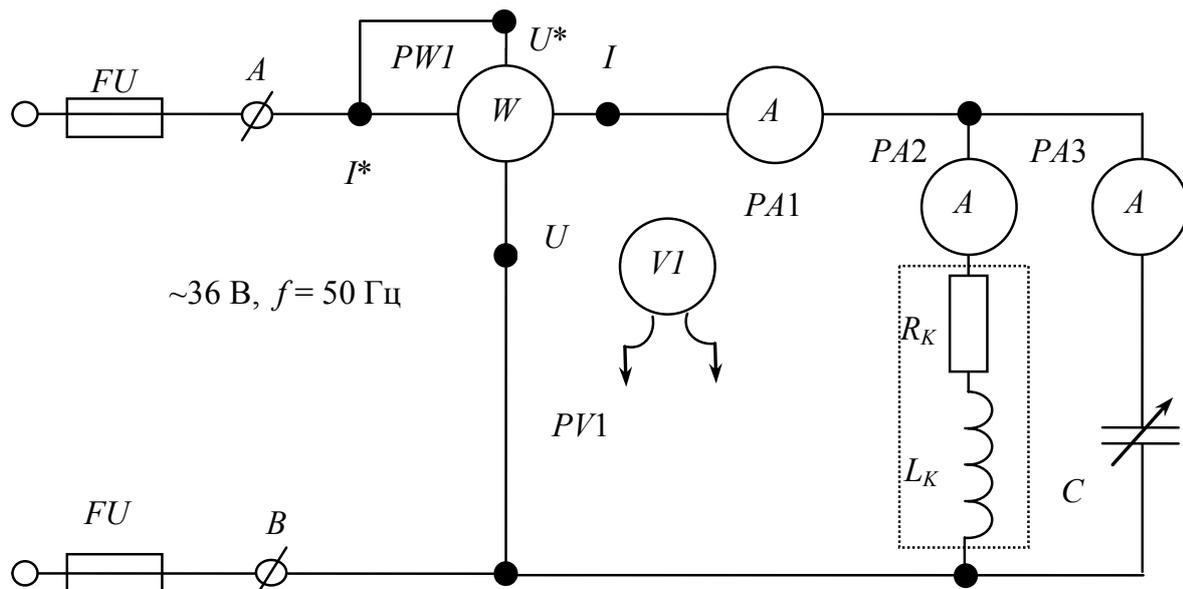


Рис. 26. Схема электрической цепи лабораторной установки

3. Изменяя емкость, проведите опыты для трех режимов:
  - а)  $B_L > B_c$ , когда  $I_{L-R} > I_c$  (2–3 измерения);
  - б)  $B_L = B_c$ , когда  $I_{L-R} \approx I_c$ ,  $I = I_{\min}$  (1 измерение);
  - в)  $B_L < B_c$ , когда  $I_{L-R} < I_c$  (2–3 измерения);
4. Показания приборов запишите в табл. 9.

Таблица 9

№ изм.	Измерено					Вычислено									
	$U$ , В	$I_{н}$ , А	$I_{L-R}$ , А	$I_c$ , А	$P$ , Вт	$B_L$ , См	$B_c$ , См	$Y$ , См	$C$ , мкФ	$I_a$ , А	$I_L$ , А	$\cos \varphi$	$Q$ , вар	$\varphi$ , град	
1															
2															
3															
4															
5															

5. По результатам исследования вычислите значения величин, приведенных в табл. 9. Указания о вычислении сопротивлений и мощностей см. в лабораторной работе № 1.

6. Постройте векторные диаграммы токов и напряжения для трех режимов работы (п. 1, 3, 5 табл. 9).

7. Нанесите на графики, после выполнения п. 3, экспериментальные значения и расчетные величины из табл. 9. Сравните расчетные значения с экспериментальными данными табл. 9 при резонансе.

8. Проанализируйте результаты исследования и сформулируйте выводы по работе.



## Контрольные вопросы

1. Запишите законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме для рассматриваемой цепи.
2. Начертите треугольники сопротивлений и проводимостей и выведите формулы перехода от сопротивлений к проводимостям и обратно.
3. Запишите условия наступления в цепи резонанса токов, выраженные через сопротивления параллельных ветвей.
4. Выведите формулу емкости, которая должна быть включена параллельно потребителю для повышения коэффициента мощности цепи. Начертите треугольник мощностей и запишите формулы для их расчета.
5. С помощью каких приборов и по каким признакам можно опытным путем определить наступление резонанса токов?
6. Укажите области применения резонанса токов.
7. Опишите режимы работы цепи с параллельно соединенными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами: недокомпенсация, перекомпенсация, резонанс.
8. Напишите единицу измерения проводимости. В чем заключается физический смысл проводимости?
9. Что показывают приборы в режиме резонансов токов?
10. Укажите отличия резонанса токов от резонанса напряжений.
11. В цепь синусоидального тока  $f = 50$  Гц параллельно включены две ветви с параметрами  $R_1 = 8$  Ом;  $L_1 = 0,016$  Гн;  $R_2 = 4$  Ом;  $C_2 = 680$  мкФ. Напряжение на  $R_2$  – 40 В. Вычертите электрическую схему, определите токи в ветвях и в неразветвленной части цепи. Постройте векторную диаграмму, если начальная фаза напряжения источника питания  $\psi_u = 30^\circ$ .

## Лабораторная работа № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА

**Цель работы:** изучить влияние величины и характера нагрузки в одной из фаз приемника на фазное и линейное напряжения, напряжение смещения нейтрали в 3-проводной цепи и на ток в нейтральном проводе в 4-проводной цепи.



### Общие сведения

Система трехфазного переменного электрического тока была предложена в конце XIX века. Благодаря работам Н. Теслы, Г. Феррариса и М. О. Доливо-Добровольского трехфазный ток быстро завоевал общее признание. Генераторы трехфазного тока, двигатели, использующие его энергию, – это наиболее совершенные, экономичные и надежные электрические машины, превосходящие по большинству технико-экономических показателей как машины постоянного тока, так и машины однофазного переменного тока. Неоспоримы преимущества 3-фазного тока при передаче энергии на расстояние (исключая сверхмощные линии электропередачи протяженностью в несколько тысяч километров). В цепях 3-фазного тока путем несложных переключений можно получить различные напряжения и мощности. Поэтому массовая электрификация промышленности началась, по существу, с появления 3-фазного тока.

Вообще  $m$ -фазной цепью называют совокупность электрических цепей, в которых действуют созданные общим источником синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые между собой по фазе на  $2\pi / m$ . Для 3-фазной цепи  $m = 3$ , и сдвиг по фазе между ЭДС, приложенными к отдельным цепям, составляет  $120^\circ$  ( $2\pi / 3$ ).

Отдельные цепи, входящие в состав 3-фазной цепи, принято называть фазами и маркировать буквами «А», «В», «С». Тогда, если принять  $e_A = E_m \sin \omega t$  (т. е. начальная фаза  $\Psi_A = 0$ ), то  $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ , а  $e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$ .

В комплексном выражении  $\dot{E}_A = Ee^{j0^\circ}$ ;  $\dot{E}_B = Ee^{-j120^\circ}$ ;  $\dot{E}_C = Ee^{-j240^\circ} = Ee^{j120^\circ}$ .

Безразлично, какая из фаз будет принята за первую; важно только, что ЭДС следующей по порядку фазы от нее отстает, а ЭДС третьей фазы – опережает. При этом соблюдается порядок чередования фаз  $A-B-C$  (или  $B-C-A$ , или  $C-A-B$ ).

Очевидно,  $e_A + e_B + e_C = 0$  и  $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ .

Приемники соединяются по схеме звезда в том случае, когда их номинальное напряжение равно фазному напряжению источника. Соединение по схеме звезда – это такая схема, при которой три конца фазных приемников (или фазных обмоток источника) соединяются в общую точку («нейтраль»), а три начала выводятся в линии. Естественно, понятия «начало» и «конец» являются условными и применяются только для определения направления ЭДС (или противоЭДС) в катушках. При отсутствии ЭДС (противоЭДС) маркировка начал и концов не имеет смысла.

На рис. 27 показано соединение по схеме звезда как источника, так и приемника энергии.

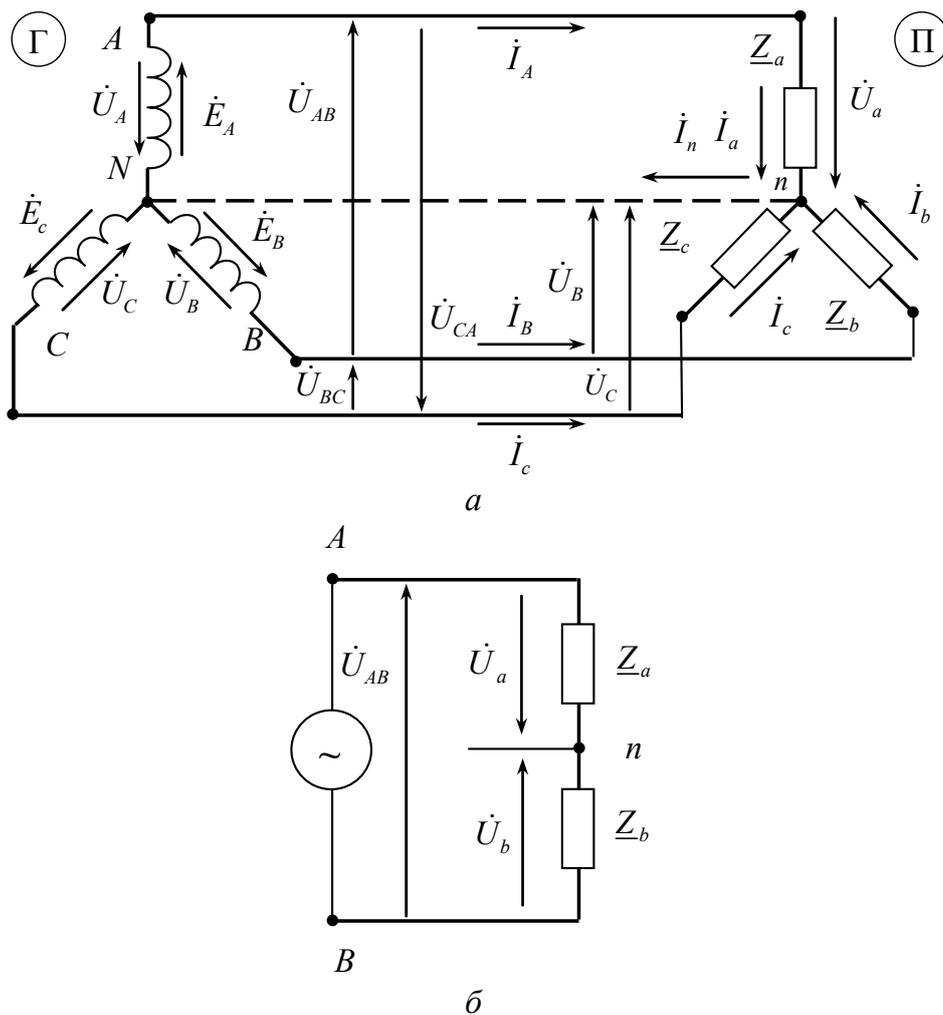


Рис. 27. Соединение по схеме звезда источника и приемника

Ток, протекающий по фазе электроприемника, называется *фазным*, а ток в линейном проводе между источником и приемником – *линейным*. На рис. 27 видно, что при соединении по схеме звезда цепь фазного тока  $\dot{I}_a$  – это продолжение цепи линейного тока, т. е. линейный ток равен фазному.

Напряжение между началом каждой фазы и нулевой точкой называется *фазным*, а между выводами разноименных фаз – *линейным*. Так, на рис. 27, а фазные напряжения:  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ , линейные (междуфазные) напряжения:  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ . В общем случае  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$ ,  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$ , что непосредственно вытекает из рис. 27, б.

При анализе 3-фазной цепи исходят из того, что источник всегда является симметричным ( $|\dot{E}_A| = |\dot{E}_B| = |\dot{E}_C|$ ), а приемник может быть как симметричным ( $Z_a = Z_b = Z_c$ ), так и несимметричным. Очевидно, что при симметричном приемнике токи в фазах равны:  $|\dot{I}_a| = |\dot{I}_b| = |\dot{I}_c|$ . В этом случае разность потенциалов между нулевыми точками источника и приемника  $V_N - V_n = 0$ .

При соединении по схеме звезда при отсутствии нейтрального провода несимметрия фазных нагрузок приводит к перераспределению потенциалов в цепи, между точками  $N$  и  $n$  появляется разность потенциалов, называемая смещением нейтрали  $\dot{U}_{nN}$  (рис. 28).

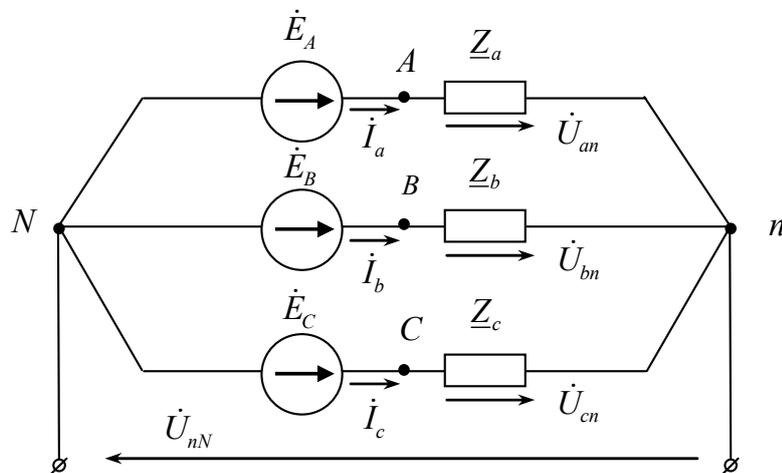


Рис. 28. Соединение по схеме звезда

Как видно из рис. 28, в соответствии с законом Ома для активной ветви:

$$\dot{E}_A = \underline{Z}_a \dot{I}_a + \dot{U}_{nN},$$

т. е.

$$\dot{U}_{nN} = \dot{E}_A - \dot{U}_{an} = \dot{E}_B - \dot{U}_{bn} = \dot{E}_C - \dot{U}_{cn},$$

где  $\dot{U}_{an} = \underline{Z}_a \dot{I}_a$ ,  $\dot{U}_{bn} = \underline{Z}_b \dot{I}_b$ ,  $\dot{U}_{cn} = \underline{Z}_c \dot{I}_c$ .

В соответствии с методом узловых напряжений (метод двух узлов) получим выражение для напряжения смещения нейтрали  $\dot{U}_{Nn}$ :

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где  $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$ ,  $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b$ ,  $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$  – комплексные проводимости фазных цепей.

При симметричной нагрузке проводимости равны, и т. к

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0, \quad \dot{U}_{Nn} = 0,$$

то

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A = \dot{U}_{an}; \quad \dot{E}_B = \dot{U}_B = \dot{U}_{bn}; \quad \dot{E}_C = \dot{U}_C = \dot{U}_{cn}$$

(для упрощения внутренним сопротивлением фаз источника и сопротивлением линейных проводов пренебрегаем): фазные напряжения на зажимах приемника образуют симметричную систему, они равны по величине и сдвинуты по фазе ровно на  $120^\circ$ . Поэтому

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0; \quad \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Векторная диаграмма такой цепи показана на рис. 29.

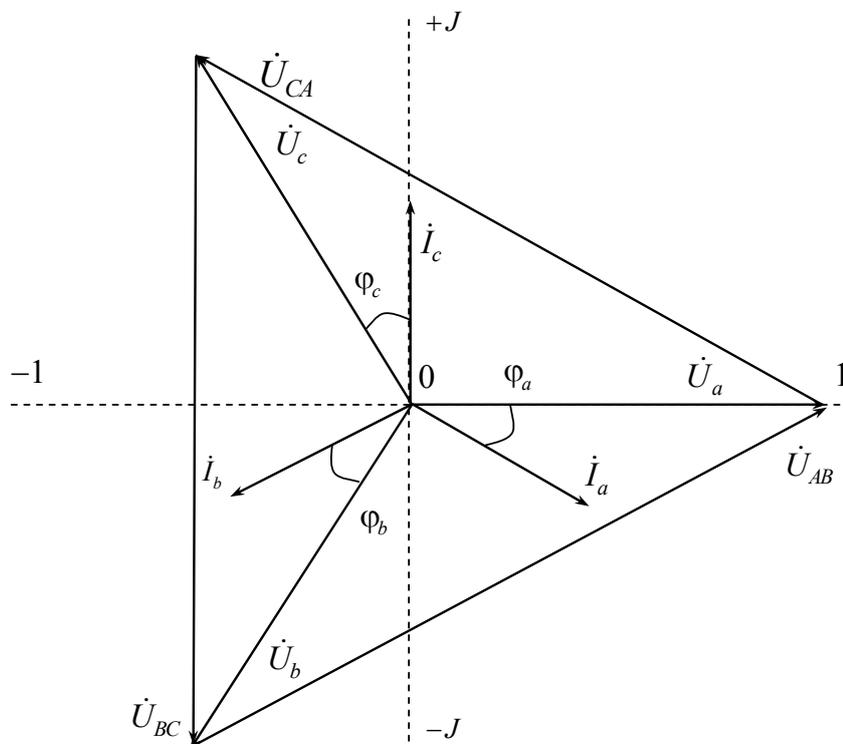


Рис. 29. Векторная диаграмма цепи приемника с симметричной нагрузкой

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c; \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c.$$

Как и в однофазной цепи, угол  $\varphi$  определяется соотношением активного и реактивного сопротивлений в каждой фазе. Так,  $\varphi_A = \arctg(X_a/R_a)$  и т. д.

Векторы линейных напряжений ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ) построены как геометрические разности соответствующих фазных. Нетрудно видеть, что по модулю они больше фазных в  $\sqrt{3}$  раз,

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

При несимметричной нагрузке  $\dot{U}_{Nn} \neq 0$ , и хотя  $\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C$ , фазные напряжения  $\dot{U}_{an}, \dot{U}_{bn}, \dot{U}_{cn}$  не равны между собой, они существенно различаются в зависимости от  $\dot{U}_{Nn}$ , что представляет серьезные неудобства для потребителей энергии. Электрическое состояние такой цепи принято иллюстрировать топографической (потенциальной) векторной диаграммой, на плоскости которой координаты каждой точки соответствуют величине потенциалов изображаемых точек электрической цепи (рис. 30). В принятом масштабе расстояние между точками топографической диаграммы равно разности потенциалов (напряжению) между изображаемыми точками электрической цепи (например, цепи на рис. 27, а).

Точка  $N$ , изображающая нейтраль источника энергии, находится на рис. 30 в центре симметрии равностороннего треугольника линейных напряжений.

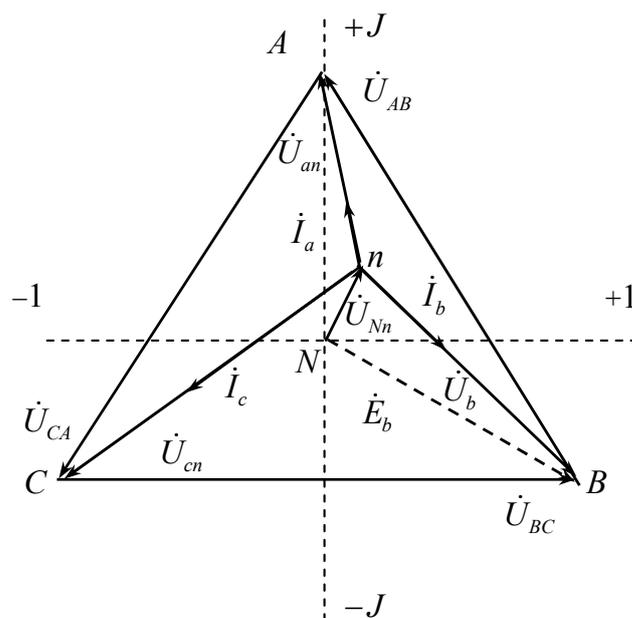


Рис. 30. Векторная диаграмма цепи приемника с несимметричной нагрузкой

Точка  $n$ , эквипотенциальная  $N$  в случае симметричной нагрузки, здесь смещается в соответствии с величиной и направлением вектора  $\dot{U}_{Nn}$ . Векторы, соединяющие точку  $n$  с вершинами  $A, B, C$ , являются фазными напряжениями  $\dot{U}_{an}, \dot{U}_{bn}, \dot{U}_{cn}$ . Здесь же построена векторная диаграмма токов в предположении активного характера нагрузки по фазам ( $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = 0$ ), По-прежнему

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0,$$

но

$$\dot{U}_{an} + \dot{U}_{bn} + \dot{U}_{cn} \neq 0.$$

Преобразуя выражение, можно показать что

$$\dot{U}_{an} + \dot{U}_{bn} + \dot{U}_{cn} = -3\dot{U}_{Nn}.$$

Существуют электроустановки с заведомо несимметричной нагрузкой (жилые дома, столовые, лаборатории, электросварочные участки и т. п.). Для того чтобы обеспечить симметрию фазных напряжений в таких установках, нужно уравнивать потенциалы нулевых точек  $N$  и  $n$ , чтобы  $\dot{U}_{Nn} = 0$ . Это достигается прокладкой нейтрального (четвертого) провода в 3-фазной цепи между точками  $N$  и  $n$  (см. рис. 27, а).

Возникает переток зарядов по нейтральному проводу – ток  $\dot{I}_n$ , причем, как видно из рис. 27, а, по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

При наличии нейтрального провода  $\dot{U}_{Nn} = 0$ , фазные напряжения становятся равны между собой, векторная диаграмма напряжений повторяет рис. 29, а на векторной диаграмме токов появляется ток  $\dot{I}_n$ .

Активная мощность 3-фазной цепи складывается из мощностей отдельных фаз:

$$P_3 = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c.$$

В случае симметричной нагрузки

$$P_3 = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

Если воспользоваться не фазными, а линейными значениями токов и напряжений, то при симметричной нагрузке

$$P_3 = \sqrt{3}UI \cos \varphi.$$

Аналогичные выражения определяют реактивную и полную мощность 3-фазной цепи. Средневзвешенный коэффициент мощности

$$\cos \varphi_3 = P_3 / \sqrt{P_3^2 + Q_3^2}.$$



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить материал по пособиям, указанным в списке литературы данного издания.
2. Подготовить бланк отчета о лабораторном занятии.
3. По заданному линейному напряжению  $U = 38$  В и параметрам приемников согласно своему варианту (табл. 10) для цепи с нейтральным проводом рассчитать фазные и линейные напряжения и токи приемников, ток нейтрального провода, активные, реактивные и полные мощности. Полученные результаты записать в табл. 11.

Таблица 10

Вариант	1	2	3	4	5
$\underline{Z}_a$ , Ом	308	$40 + j116$	$-j300$	295	$4 + j192$
$\underline{Z}_b$ , Ом	$40 + j118$	300	$19 + j116$	$-j300$	400
$\underline{Z}_c$ , Ом	$-j300$	$-j300$	300	$18 + j813$	$-j300$
Вариант	6	7	8	9	10
$\underline{Z}_a$ , Ом	$-j300$	400	$4 + j198$	95	$-j90$
$\underline{Z}_b$ , Ом	$40 + j21$	$-j300$	400	$-j90$	$40 + j45$
$\underline{Z}_c$ , Ом	300	$43 + j20$	$-j300$	$84 + j113$	30

Таблица 11

Вид операции	$U$ , В	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{nN}$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$I_c$ , А	$I_n$ , А	$P$ , Вт	$Q$ , вар	$S$ , ВА
Вычислено												

4. По результатам расчетов построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости. Полный расчет домашнего задания с векторной диаграммой приложить к отчету о лабораторной работе.

5. Используя программу № 4, получить результаты расчета.



## Порядок выполнения работы

1. Соберите схему исследования трехфазной цепи без нейтрального провода (рис. 31).

2. Включите в две фазы одинаковую нагрузку по заданию преподавателя. Изменяя нагрузку в третьей фазе от нуля («обрыв фазы») до максимума, снимите показания приборов и запишите их в табл. 12.

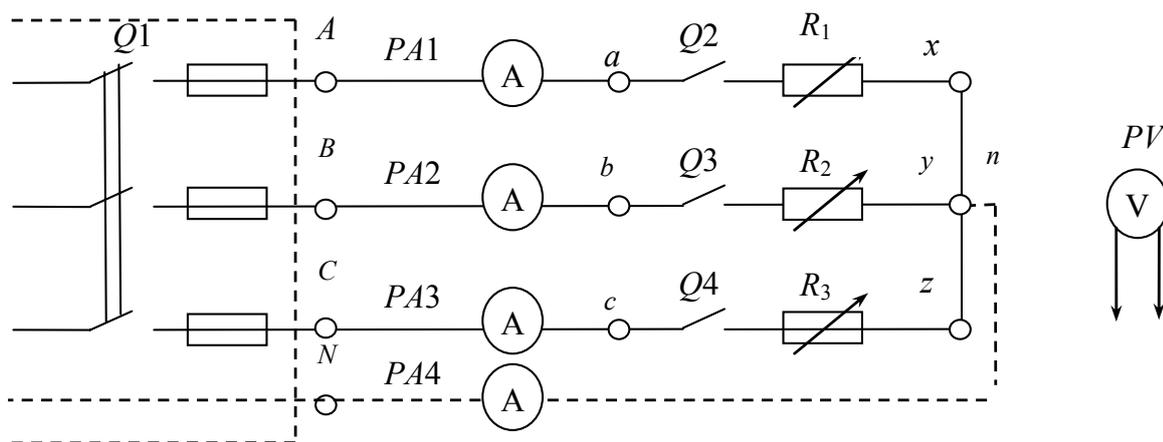


Рис. 31. Схема электрической цепи лабораторной установки без нейтрального провода

Таблица 12

Количество приемников	Измерено									Вычислено			
	$U, В$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{nN}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_n, А$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$P_3, Вт$
Схема без нейтрального провода													
0									—				
1									—				
2									—				
3									—				
4									—				
5									—				
Схема с нейтральным проводом													
0					—								
1					—								
2					—								
3					—								
4					—								
5					—								

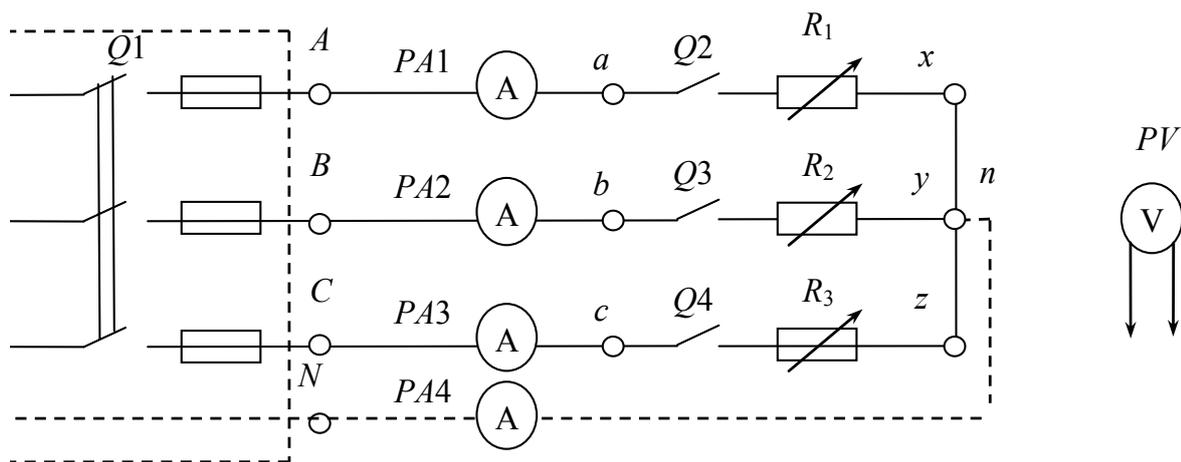


Рис. 32. Схема электрической цепи лабораторной установки с нейтральным проводом

3. Повторите опыт при включенном нейтральном проводе (рис. 32).

4. Включите в цепь по схеме рис. 32 с нейтральным проводом между зажимами  $a - x$ ,  $b - y$ ,  $c - z$  приемники согласно табл. 10. В качестве активного приемника на универсальном лабораторном стенде используйте нагрузку любой фазы, в качестве активно-индуктивного приемника – реальную катушку на 2400 витков, емкостного – конденсаторы на стенде С2 или С3. Измерьте и запишите в табл. 13 результаты измерений и сравните их с результатами расчета в табл. 10.

Таблица 13

Вид операции	$U$ , В	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{nN}$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$I_c$ , А	$I_n$ , А	$P$ , Вт	$Q$ , вар	$S$ , ВА
Измерено												

5. Рекомендации по построению векторных диаграмм.

По результатам измерений в п. 3 (для активной нагрузки) постройте топографические векторные диаграммы, совмещенные с векторными диаграммами токов: для цепи без нейтрального провода – в режимах обрыва фазы, симметричной нагрузки и максимальной нагрузки в регулируемой фазе; для цепи с нейтральным проводом – в режиме обрыва фазы. Укажите масштаб построений (по току и напряжению).

Топографическую диаграмму можно строить методом засечек, откладывая из вершин равностороннего треугольника линейных напряжений засечки радиусом, равным в принятом масштабе измеренным значениям фазных напряжений. Точка пересечения трех засечек

соответствует нейтрали  $n$ ; соединяя ее с центром симметрии треугольника (точка  $N$ ) и его вершинами (точки  $A, B, C$ ), получают векторы  $\dot{U}_{nN}, \dot{U}_{an}, \dot{U}_{bn}, \dot{U}_{cn}$ . Векторы токов проведите из точки  $n$  по отношению к соответствующим фазным напряжениям. Выполните сравнительный анализ полученных результатов и сформулируйте краткие выводы.



## Контрольные вопросы

1. Каковы особенности и достоинства 3-фазного тока?
2. Что называют симметричной и несимметричной нагрузкой в трехфазной цепи?
3. Какая схема соединения трехфазных приемников называется «звездой»?
4. Что такое фазные и линейные токи и напряжения при соединении в звезду и каковы соотношения между ними при симметричной и несимметричной нагрузках?
5. Как определяется напряжение смещения нейтрали при соединении нагрузки в звезду?
6. Какова роль нейтрального провода в трехфазной цепи?
7. Как вычислить мощность, потребляемую трехфазным приемником?
8. Достоинства трехфазных систем.
9. Напишите формулу  $U_{nN}$  через проводимости фаз.
10. Напишите, чему равны напряжения  $U_a, U_b, U_c$  при несимметричной нагрузке, включенной в трехпроводную сеть.
11. Как определяются мощности трехфазного приемника?
12. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 220$  В подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме: а) звезда с нейтральным проводом; б) звезда без нейтрального провода; сопротивления фаз приемника  $R_a = 10$  Ом,  $R_b = 3$  Ом,  $X_b = 4$  Ом,  $X_c = 10$  Ом. Определите линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.
13. Почему в нейтральном проводе всегда отсутствует предохранитель?

## Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ПО СХЕМЕ ТРЕУГОЛЬНИК

**Цель работы:** изучить цепь трехфазного тока при соединении приемника по схеме треугольник в симметричном и несимметричном режимах; при активной и реактивной нагрузках.



### Общие сведения

Соединением фаз в треугольник называется такое соединение, при котором конец первой фазы соединяют с началом второй фазы, конец второй фазы – с началом третьей, конец третьей с началом первой. К общим точкам соединения начал и концов присоединяют линейные провода. Два способа графического представления соединения по схеме треугольник показаны на рис. 33.

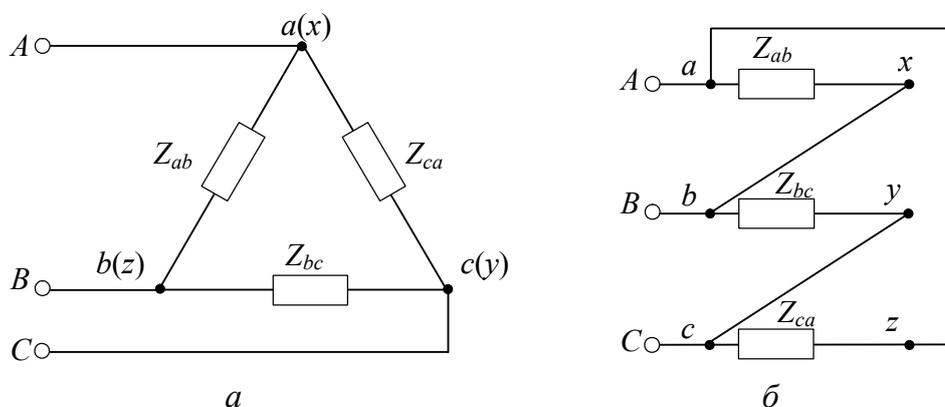


Рис. 33. Соединение приемника по схеме «треугольник»

Важной особенностью соединения приемников по схеме треугольник является независимость режима работы каждой фазы от других фаз. При изменении сопротивления в одной из фаз будут меняться ток данной фазы и линейные токи в проводах, соединенных с этой фазой. Токи в двух других фазах при этом не изменятся. Поэтому схема соединения приемников треугольником широко используется при несимметричной нагрузке фаз.

Рассмотрим схему соединения фаз генератора в звезду и фаз приемника электрической энергии в треугольник (рис. 34).

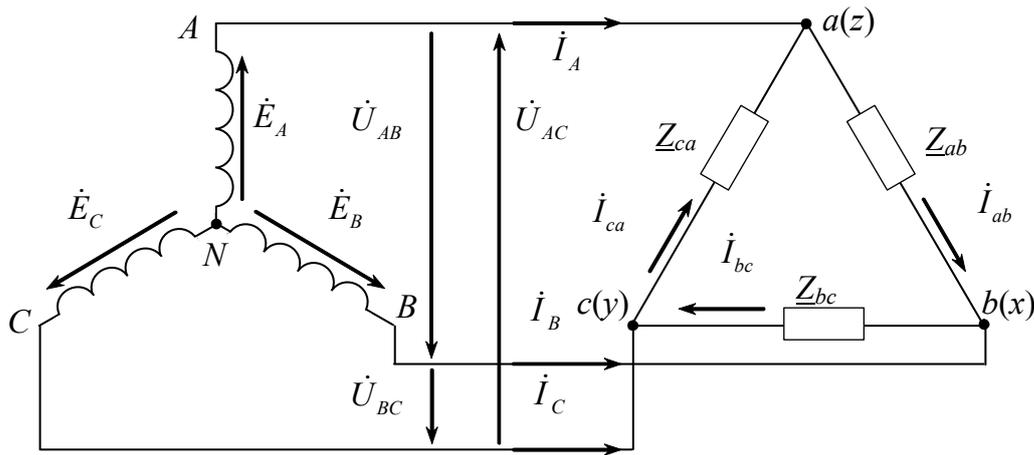


Рис. 34. Соединение генератора и приемника по схеме треугольник

Из схемы видно, что если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то фазные напряжения приемника будут равны соответствующим линейным напряжениям генератора, то есть  $U_\phi = U_\Delta$ . Фазное напряжение при подключении приемника по схеме треугольник больше в  $\sqrt{3}$  раз, чем фазное напряжение при подключении приемника по схеме звезда.

Принятым условным положительным направлениям линейных напряжений (рис. 34) соответствуют условные положительные направления токов; токи в фазах равны:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Для узлов  $a, b, c$  (рис. 34) линейные токи по первому закону Кирхгофа равны:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Для симметричной нагрузки  $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$  и, следовательно, фазные токи  $\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca}$ . Тогда векторы между фазными токами и напряжениями сдвинуты на одинаковый угол  $\varphi$ .

На рис. 35 приведены векторные диаграммы напряжений и токов при соединении треугольником с активно-индуктивной симметричной нагрузкой.

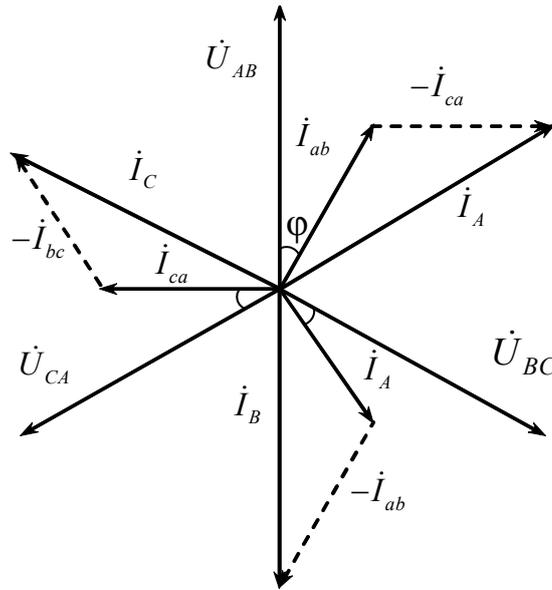


Рис. 35. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении треугольником (симметричная нагрузка фаз активно-индуктивная)

Из диаграммы следует, что при симметричной нагрузке соотношение между фазными и линейными токами

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

Расчет токов ведут для одной фазы:

$$I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{ф}}} \text{ и } I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

В случае несимметричной нагрузки, например увеличения нагрузки в фазе «ab» ( $Z_{ab} \neq Z_{bc} = Z_{ca}$ ), ток в фазе «ab» возрастает, в двух других фазах «bc» и «ca» будет прежним, то есть  $I_{ab} \neq I_{bc} = I_{ca}$ . На рис. 36, а приведена векторная диаграмма этого случая.

При увеличении сопротивления фазы «bc» до бесконечности, что соответствует обрыву этой фазы, ток в ней  $I_{bc} = 0$  и уравнения для токов запишутся в виде

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = -I_{ab}; \quad I_C = I_{ac}.$$

Векторная диаграмма этого случая дана на рис. 36, б.

Мощности приемников для соединения треугольником. Активная мощность каждой фазы при соединении нагрузки треугольником:

$$P_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi.$$

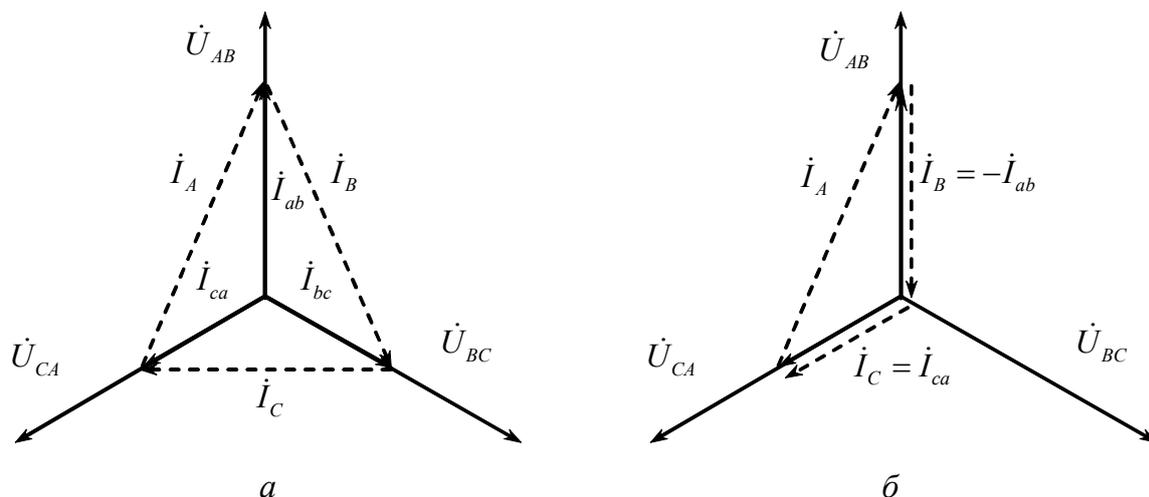


Рис. 36. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении треугольником (симметричная нагрузка фаз активно-индуктивная)

Активная, реактивная и полная мощности приемников трехфазной цепи при несимметричной нагрузке:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}; \quad Q = \pm Q_{ab} \pm Q_{bc} \pm Q_{ca}; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При симметричной нагрузке активная и реактивная мощности приемников трехфазной цепи:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi; \quad Q = Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi;$$

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi.$$

Полная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке

$$S = 3S_{\phi} \text{ или } S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}.$$

Полная мощность трехфазной цепи при несимметричной нагрузке

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



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить теоретический материал по учебнику.
2. Подготовить бланк отчета о лабораторной работе.
3. По заданному линейному напряжению  $U_{л} = 127 \text{ В}$  и параметрам трехфазных приемников, соединенных по схеме треугольником,

согласно варианту по табл. 14 определить: фазные и линейные токи; реактивные и полные мощности.

Таблица 14

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$Z_{ab}, \text{ Ом}$	75	75	75	32	32	32	32	$32j$
$Z_{bc}, \text{ Ом}$	75	75	75	75	$-32j$	$32j$	32	32
$Z_{ca}, \text{ Ом}$	$75j$	$-75j$	75	75	32	32	75	$-75j$

4. По результатам расчетов построить в масштабе векторную диаграмму токов на комплексной плоскости. Расчет домашнего задания и векторную диаграмму приложить к отчету о лабораторной работе.

5. Используя программу № 4, получить результаты расчета.



### Порядок выполнения работы

1. Соберите трехфазную цепь, подключив активную нагрузку по схеме треугольник (рис. 37). После проверки схемы преподавателем установите симметричную нагрузку фаз и включите стенд. Изменяя нагрузку в одной из фаз, снимите показания приборов и запишите их в табл. 15.

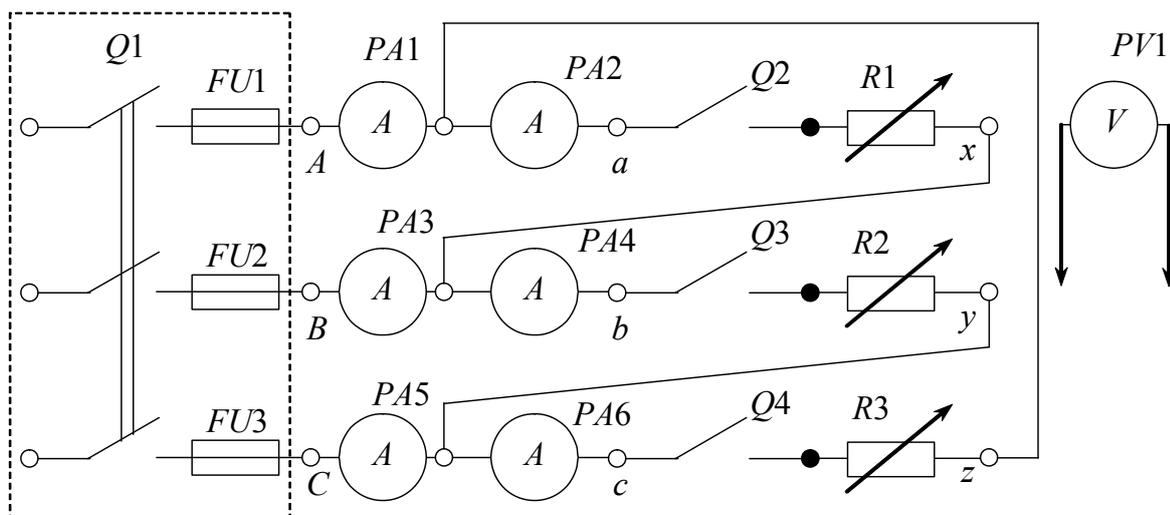


Рис. 37. Схема электрической цепи лабораторной установки трехфазной цепи с активной нагрузкой по схеме треугольник

2. Подключите в одну из фаз приемника активно-индуктивную нагрузку (рис. 38). В качестве активно-индуктивного приемника используйте реальную катушку индуктивности на 2400 витков. Снимите показания приборов и запишите их в табл. 15.

Таблица 15

Характер нагрузки	Измерено							Вычислено								
	$U_{л}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_{ab}, А$	$I_{bc}, А$	$I_{ca}, А$	$Z_{ab}, Ом$	$Z_{bc}, Ом$	$Z_{ca}, Ом$	$P_a, Вт$	$P_b, Вт$	$P_c, Вт$	$P, Вт$	$Q, вар$	$S, ВА$
Активная (симметричная)															-	
Активная (несимметричная)															-	
Активно-индуктивная нагрузка																
Активно-емкостная нагрузка																

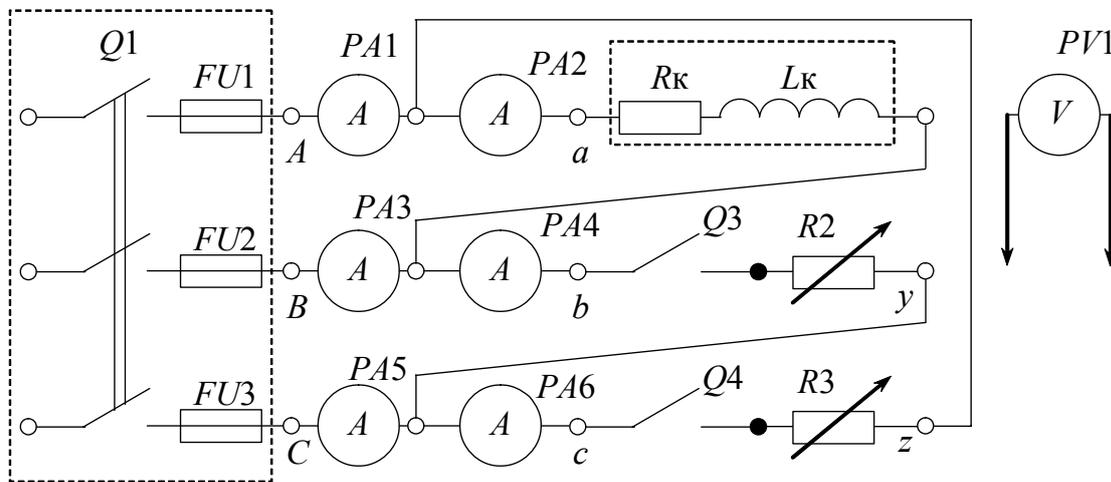


Рис. 38. Схема электрической цепи лабораторной установки трехфазной цепи с активно-индуктивной нагрузкой по схеме треугольник

3. Подключите в одну из фаз приемника активно-емкостную нагрузку (рис. 39). В качестве активной составляющей используйте нагрузку соответствующей фазы на универсальном лабораторном стенде, а в качестве емкостной – конденсаторы С2 или С3 на стенде. Снимите показания приборов и запишите их в табл. 15.

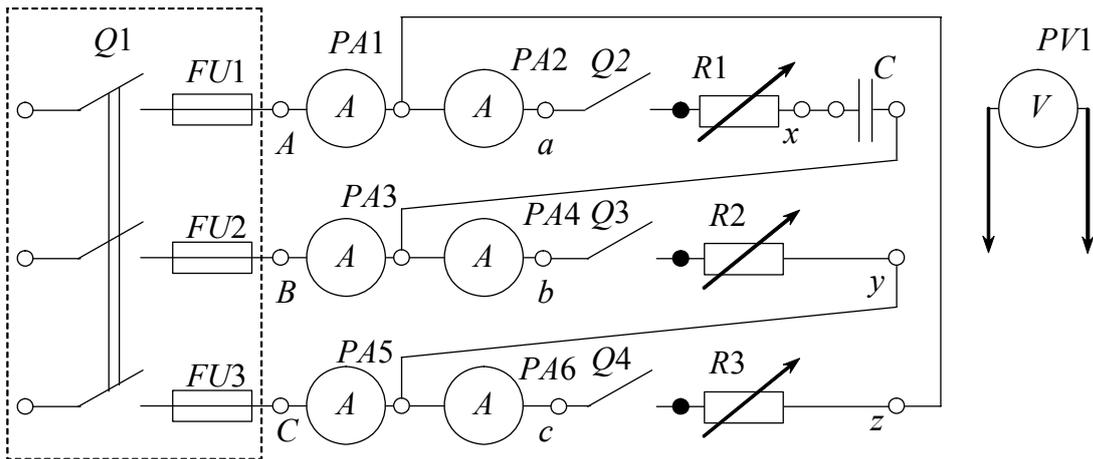


Рис. 39. Схема электрической цепи лабораторной установки трехфазной цепи с активно-емкостной нагрузкой по схеме треугольник

4. По результатам измерений вычислите значения величин, приведенных в табл. 15.

5. Постройте топографические векторные диаграммы напряжений и токов: для цепи с активной симметричной нагрузкой; для цепи с активной несимметричной нагрузкой.

### Рекомендации по построению векторных диаграмм

Построение векторных диаграмм для приемника, включенного по схеме «треугольник», следует начинать с построения звезды фазных напряжений  $U_a, U_b, U_c$  (она же является и звездой линейных напряжений  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , так как для треугольника фазные и линейные напряжения равны). Векторы фазных токов для активной нагрузки  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  откладываются совпадающими по фазе с векторами соответствующих фазных напряжений. Векторы линейных токов  $I_A, I_B, I_C$  находятся в соответствии с уравнениями для токов.

### ? Контрольные вопросы

1. Какое соединение приемников называется треугольником?
2. Как связаны линейные и фазные напряжения при включении приемника по схеме треугольник?
3. Как связаны линейные и фазные токи при включении приемника по схеме треугольник?

4. Как изменятся фазные напряжения при изменении нагрузки в одной из фаз, если приемник включен по схеме треугольник?

5. Во сколько раз изменяются фазные и линейные токи и напряжения при переключении симметричной нагрузки со звезды на треугольник?

6. Во сколько раз изменяются мощности при переключении симметричной нагрузки со звезды на треугольник?

7. Зависит ли мощность трехфазного приемника от схемы его включения?

8. Вычертите векторную диаграмму напряжений и токов для трехфазного приемника, соединенного по схеме треугольник, если в первую фазу включен элемент с параметром  $L$ , во вторую – с параметром  $C$ , в третью – с параметром  $R$ .

9. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 220$  В подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме треугольник. Сопротивления фаз приемника  $R_a = 10$  Ом,  $R_b = 3$  Ом,  $X_b = 4$  Ом,  $X_c = 10$  Ом. Определите линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

10. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 220$  В подключен симметричный трехфазный приемник, активная потребляемая мощность которого  $P = 5$  кВт,  $\cos\varphi = 0,6$ . Определите токи приемника при подключении приемника по схеме треугольник. Определите сопротивление фазы приемника. Постройте совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений.

11. К чему приведет обрыв одного линейного провода трехпроводной цепи в симметричном приемнике, соединенном по схеме треугольник?

12. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 380$  В подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме треугольник. Сопротивления фаз приемника  $R_a = 38$  Ом,  $R_b = 38$  Ом,  $R_c = 38$  Ом. Определите линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

# Лабораторная работа № 6 ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

**Цель работы:** изучить методы измерения активной и реактивной мощности в трехфазных цепях.



## Общие сведения

При симметричной нагрузке фаз достаточно измерить мощность одной фазы и полученный результат утроить:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3}UI \cos \varphi;$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi};$$

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где  $P_{\phi}$  – активная мощность одной фазы, измеренная с помощью ваттметра (рис. 40, а, б).

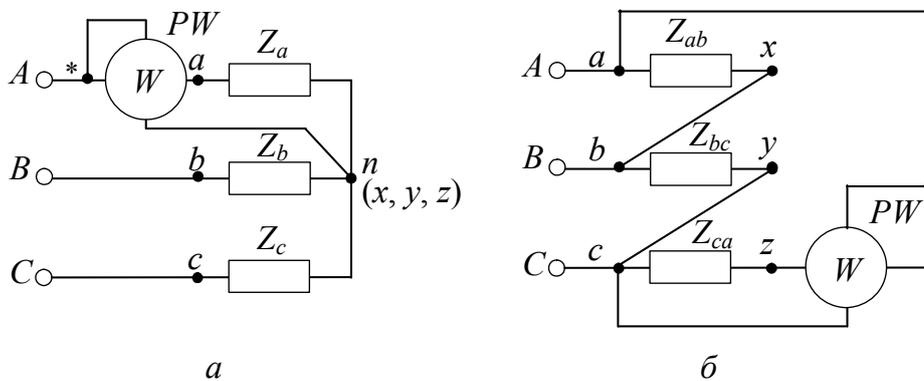


Рис. 40. Схема измерения активной мощности одной фазы с помощью ваттметра

Реактивную мощность симметричной трехфазной цепи также можно определить с помощью обычного ваттметра.

Как видно из рис. 41, параллельная обмотка ваттметра включается на «чужие фазы». Показание ваттметра для данной схемы

$$P_W = U_{BC}I_A \cos(\bar{I}_A \bar{U}_{BC}) = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}.$$

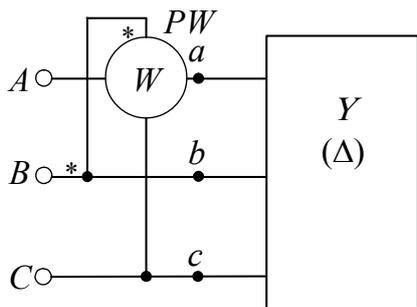


Рис. 41. Схема измерения реактивной мощности одной фазы с помощью ваттметра

Для определения реактивной мощности трехфазной цепи достаточно показание ваттметра увеличить в  $\sqrt{3}$ :

$$Q = \sqrt{3}P_w = \sqrt{3}UI \sin \varphi.$$

Для измерения активной мощности при несимметричной нагрузке в четырехпроводной схеме («звезда» с нейтральным проводом) включаются три ваттметра. Активная мощность трехфазного приемника определяется сложением показаний всех ваттметров:

$$P = P_a + P_b + P_c.$$

Для измерения реактивной мощности при несимметричной нагрузке ваттметры включаются по схеме рис. 42.

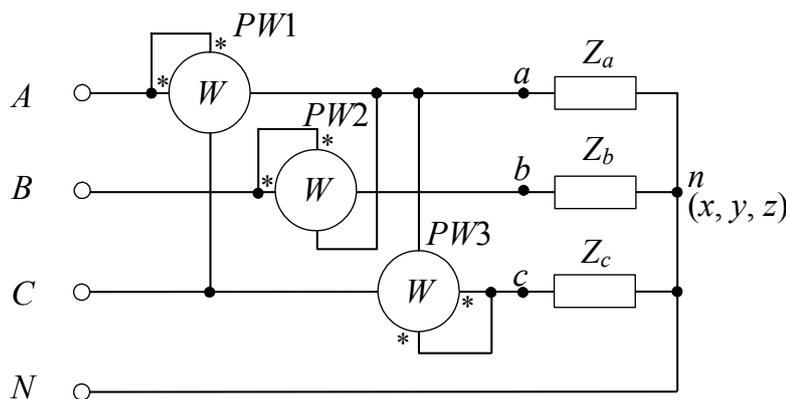


Рис. 42. Схема измерения реактивной мощности при несимметричной нагрузке

Показание каждого ваттметра меньше в  $\sqrt{3}$  раз 3-фазной реактивной мощности. Поэтому для получения 3-фазной реактивной мощности достаточно сумму показаний всех ваттметров разделить на  $\sqrt{3}$ :

$$Q = \frac{(P_a + P_b + P_c)}{\sqrt{3}}.$$

Самым распространенным методом измерения активной мощности в трехпроводных цепях при любой асимметрии нагрузки является метод двух ваттметров (рис. 43). Активная мощность трехфазных цепей равна алгебраической сумме показаний ваттметров:  $P = P_1 + P_2$ .

Показания ваттметров зависят от угла  $\varphi = \arctg X/R$ . При активной нагрузке ( $\varphi = 0$ ) показания обоих ваттметров одинаковы:

$$P_1 = P_2 = U_{л} I_{л} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} I_{л};$$

$$P = 2P_1 = \sqrt{3} U_{л} I_{л}.$$

В случае  $\varphi \neq 0^\circ$  показания ваттметров различны, причем если  $\varphi = 60^\circ$ , то  $P_1 = 0$ , а  $P_2 = P$ ; если  $\varphi > 60^\circ$ , то угол  $(\varphi + 30^\circ) > 90^\circ$ , показание одного ваттметра станет отрицательным ( $P_1 < 0$ ), и его стрелка отклонится влево от нуля. Для отсчета показания этого ваттметра необходимо переключить зажимы обмотки тока и обмотки напряжения, а показание прибора со знаком «-»:

$$P = -P_1 + P_2.$$

Метод двух ваттметров позволяет измерить и реактивную мощность цепи:

$$Q = \sqrt{3}(P_2 - P_1) = \sqrt{3}UI \sin \varphi.$$

При симметричной нагрузке по показаниям ваттметров можно выяснить характер нагрузки:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{(P_2 - P_1)}{(P_2 + P_1)}.$$

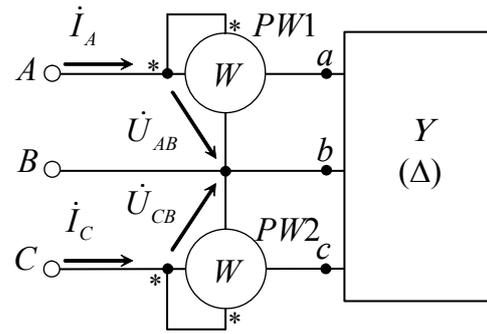


Рис. 43. Схема измерения активной мощности в трехпроводных цепях при любой асимметрии нагрузки методом двух ваттметров



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить теоретический материал по учебнику. Подготовить бланк отчета о лабораторной работе.

2. Для электрической цепи, схема и параметры которой приведены в табл. 16, рассчитать токи  $I_A$ ,  $I_C$ , показания ваттметров, активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности симметричного приемника, соединенного звездой. Линейное напряжение сети  $U = 220$  В. Результаты расчета внести в табл. 17. В качестве емкостного 3-фазного приемника включить в схему конденсаторы  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  универсального стенда.

Таблица 16

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Схема цепи (рисунок)	40, а	42	43	40, а	42	43	40, а	43	40, б	42
$R_{\phi}$ , Ом	300	300	300	300	400	300	400	400	300	400
$X_{\phi}$ , Ом	-300	300	-300	-300	-300	-300	-300	-300	300	-300

3. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.



### Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме звезда (рис. 40, а). Измерьте и запишите в табл. 17 значения напряжения  $U_{\text{л}}$ , тока  $I_{\text{л}}$ , мощности  $P_{\text{л}}$  для активной и активно-емкостной симметричных нагрузок. По результатам измерений рассчитайте активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности цепи.

Таблица 17

Характер нагрузки	Измерено			Вычислено		
	$U_{\text{л}}$ , В	$I_{\text{л}}$ , А	$P_{\text{л}}$ , Вт	$P$ , Вт	$Q$ , вар	$\cos \varphi$
Активная						
Активно-емкостная						

2. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 41. Измерьте и запишите в табл. 18 показания приборов для указанного в таблице характера симметричной нагрузки. Рассчитайте реактивную мощность цепи  $Q$ .

Таблица 18

Характер нагрузки	Измерено			Вычислено
	$U_{\text{л}}$ , В	$I_{\text{л}}$ , А	$P_{\text{л}}$ , Вт	$Q$ , вар
Активная				
Активно-емкостная				
Емкостная				

3. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 43. Измерьте и запишите в табл. 19 показания приборов для указанного в таблице характера нагрузки. Рассчитайте активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности цепи.

Таблица 19

Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$I_{\text{л}}, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$P, \text{Вт}$	$Q, \text{вар}$	$\cos \varphi$
Активная симметричная							
Активная несимметричная							
Активно-емкостная симметричная							
Емкостная симметричная							

4. Сравните результаты измерений с расчетными значениями, полученными в домашнем задании для соответствующей варианту цепи.

## Контрольные вопросы

1. По каким формулам рассчитывают активную и реактивную мощности симметричной трехфазной цепи?
2. Какие методы используют для измерения активной мощности в трехфазных цепях?
3. Как можно определить реактивную мощность симметричной трехфазной цепи?
4. Когда применяются методы одного ваттметра, двух ваттметров, трех ваттметров?
5. Обоснуйте возможность измерения активной мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров.
6. При каком условии и как можно определить реактивную мощность трехфазной цепи методом двух ваттметров?
7. Почему ваттметр  $PW1$  (схема на рис. 42) дает отрицательное показание при индуктивной нагрузке?
8. В каком случае один ваттметр (схема на рис. 43) покажет нуль, а второй – мощность всей трехфазной цепи?
9. Каково устройство и принцип действия электродинамического ваттметра?
10. Поясните условные обозначения на шкалах ваттметров.
11. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$  подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме: а) звезда с нейтральным проводом;

б) звезда; сопротивления фаз приемника  $R_a = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_b = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_c = 10 \text{ Ом}$ . Определить линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

12. К трехфазной линии с  $U_{\text{л}} = 127 \text{ В}$  подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме треугольник. Сопротивления фаз приемника  $R_a = 17 \text{ Ом}$ ,  $R_b = 17 \text{ Ом}$ ,  $X_c = 17 \text{ Ом}$ . Определить линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

# Лабораторная работа № 7

## РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**Цель работы:** изучить способы расширения пределов измерения электроизмерительных приборов.



### Общие сведения

В цепях постоянного тока для расширения пределов измерения применяют добавочные резисторы и шунты совместно с прибором магнитоэлектрической системы.

Добавочные резисторы, включенные последовательно с измерительным механизмом, образуют делитель напряжения. Они изготавливаются из манганиновой проволоки.

Добавочные резисторы бывают щитовыми и переносными, калиброванными и ограничено взаимозаменяемыми, т. е. такими, которые предназначены для приборов определенного типа, имеющих одинаковые электрические параметры. Добавочные резисторы применяются для напряжений до 30 кВ постоянного и переменного тока частот от 10 Гц до 20 кГц.

По точности добавочные резисторы разделяются на классы: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0.

Для измерения напряжения применяется схема, изображенная на рис. 44.

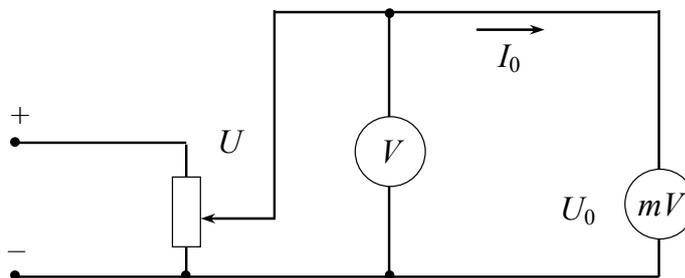


Рис. 44. Схема подключения магнитоэлектрического прибора с добавочным сопротивлением

Ток полного отклонения рамки прибора

$$I_0 = \frac{U}{R_0 + R_D},$$

где  $U$  – измеряемое напряжение;  $R_0$  – сопротивление измерительного механизма;  $R_D$  – добавочное сопротивление из манганина, отсюда

$$R_D = \frac{U - I_0 R_0}{I_0} = \frac{U_0}{I_0} \cdot \left( \frac{U}{U_0} - 1 \right) = R_0 (m - 1),$$

где  $m$  – коэффициент расширения предела измерения прибора по напряжению.

Приборами магнитоэлектрической системы прямого включения в цепь измеряют малые токи (микро- и миллиамперметры с пределами измерения до 50 мА).

Для измерения больших значений токов применяют шунты – специальные резисторы  $R_{ш}$ , включенные в цепь измеряемого тока параллельно с измерительным прибором (рис. 45).

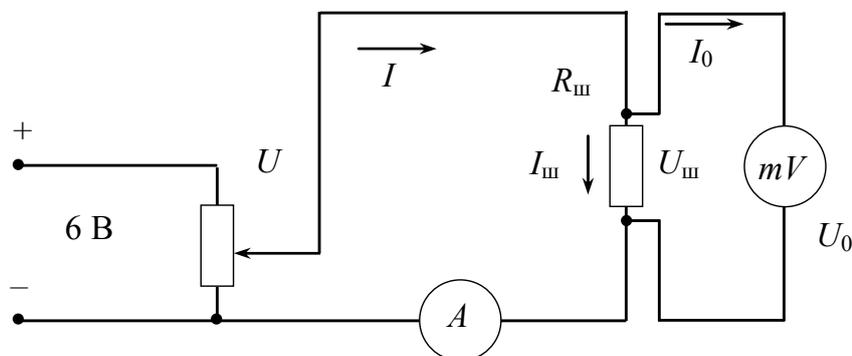


Рис. 45. Схема подключения магнитоэлектрического прибора с шунтом

Шунты изготавливаются из манганина. На небольшие токи (до 30 А) шунты обычно размещаются в корпусе прибора (внутренние шунты); на большие токи (до 7500 А) применяются наружные шунты, которые имеют две пары зажимов: токовые и потенциальные. Токовые зажимы служат для включения шунта в цепь с измеряемыми параметрами; к потенциальным зажимам, сопротивление между которыми равно  $R_{ш}$ , подключают измерительный механизм прибора.

Наружные (взаимозаменяемые) шунты разделяются на классы точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5.

Условием параллельной работы шунта и измерительного прибора является равенство напряжений  $U_{ш} = U_0$ . Эти напряжения, согласно государственному стандарту, имеют значения 30, 45, 60, 75 мВ.

Измеряемый ток в цепи определяется по первому закону Кирхгофа:

$$I' = I_{\text{ш}} + I_0,$$

отсюда

$$\frac{I'}{I_0} = \frac{I_{\text{ш}}}{I_0} + 1 \text{ или } n = 1 + \frac{R_0}{R_{\text{ш}}}.$$

Таким образом, сопротивление шунта можно определить по формуле

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_0}{n - 1},$$

где  $n$  – коэффициент шунтирования.

В цепях переменного тока низкого напряжения расширение пределов по напряжению осуществляется с помощью добавочных сопротивлений, а по току – секционированием катушек приборов и применением измерительных трансформаторов тока.

В установках высокого напряжения включение измерительных приборов осуществляется через измерительные трансформаторы тока и напряжения (рис. 46).

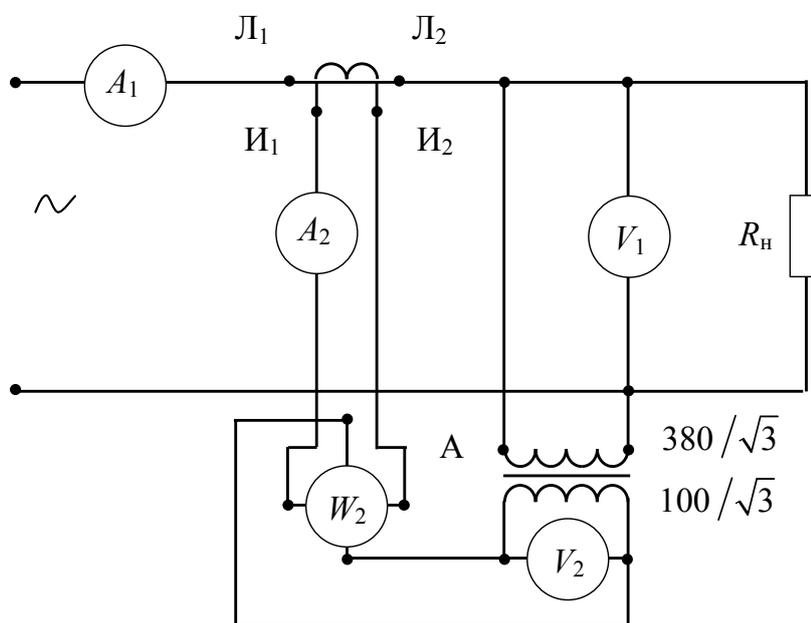


Рис. 46. Схема включения приборов с измерительными трансформаторами

Измерительные трансформаторы подразделяются на лабораторные и стационарные. Они выпускаются на область номинальных частот от 25 Гц до 10 кГц.

Лабораторные измерительные трансформаторы тока производятся на различные номинальные значения первичного тока, лежащие в пределах от 0,1 А до 30 кА, и номинальные значения вторичного тока 5 А. Для них установлены классы точности: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2. Стационарные измерительные трансформаторы тока изготавливаются на номинальные первичные токи от 1 А до 40 кА и номинальные вторичные токи – 1; 2; 2,5; 5 А. Для них установлены классы точности: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 10,0.

Стационарные измерительные трансформаторы напряжения делятся на классы точности: 0,5; 1,0 и 3,0, а лабораторные – на классы: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Стационарные трансформаторы напряжения изготавливаются на номинальные напряжения от 127 В до 35 кВ при вторичном напряжении 150, 100 и  $100/\sqrt{3}$  В.

Значения электрических величин с первичной стороны определяются как

$$U'_1 = U_2 K_{UH}; \quad I'_1 = I_2 K_{IH}; \quad P'_1 = P_2 K_{UH} K_{IH},$$

где  $K_{IH}$  и  $K_{UH}$  – номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения.

Погрешности, вносимые в измерение трансформаторами, определяются как

$$\delta_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} \cdot 100\%; \quad \delta_U = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\%.$$



### Домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию

1. Изучить литературу по теме занятия.
2. Подготовить бланк отчета о лабораторной работе, вычертить схемы рис. 44, 45, 46. Изучить цель работы и порядок ее выполнения.



### Порядок выполнения работы

1. Произведите увеличение предела измерения магнитоэлектрического прибора в « $m$ » раз по напряжению (по заданию преподавателя). Рассчитайте значение добавочного резистора  $R_d$ . Соберите схему, изображенную на рис. 44. Определите погрешность, вносимую добавочным резистором:

$$\delta_U = \frac{U'_V - U_{RD}}{U_{RD}} \cdot 100\%.$$

где  $U'_V$  – показание вольтметра;  $U_{RD}$  – показание прибора с добавочным резистором  $R_d$ . Результаты расчетов и наблюдений запишите в табл. 20.

Таблица 20

$U_0$ , В	$C_U$ , В/дел	$R_0$ , Ом	$m$	$R_d$ , Ом	$U'$ , В	$U$ , В	$C'_U$ , В/дел	$\delta_U$ , %

2. Произведите увеличение предела измерения данного прибора в « $n$ » раз по току. Рассчитайте необходимое для этого значение сопротивления шунта  $R_{ш}$ . Соберите схему, изображенную на рис. 45. Установите реостатом необходимое значение тока по амперметру.

$$I = nI_0.$$

Определите погрешность, вносимую шунтом:

$$\delta_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} \cdot 100\%.$$

где  $I_1$  – показание амперметра;  $I'$  – показание прибора с шунтом. Результаты расчетов и наблюдений запишите в табл. 21.

Таблица 21

$I_0$ , А	$C_I$ , А/дел	$R_0$ , Ом	$n$	$R_{ш}$ , Ом	$I$ , А	$I'$ , А	$C'_I$ , А/дел	$\delta_I$ , %

3. Соберите схему, изображенную на рис. 46. Определите погрешности, вносимые измерительными трансформаторами тока и напряжения. Результаты расчетов и наблюдений запишите в табл. 22.

Таблица 22

$U_2$ , В	$I_2$ , А	$P_2$ , Вт	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$K_{UH}$	$K_{IH}$	$U'_1$ , В	$I'_1$ , А	$P'_1$ , Вт	$\delta_U$ , %	$\delta_I$ , %	$\delta_P$ , %



## Контрольные вопросы

1. Почему не применяются шунты в цепях переменного тока?
2. Какие еще способы решения пределов измерения приборов применяются?
3. Какие номинальные параметры имеют шунты и добавочные сопротивления согласно государственному стандарту?
4. Почему не применяются добавочные сопротивления в высоковольтных цепях переменного тока?
5. Какие значения тока и напряжения можно измерить с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения?
6. Конструктивные особенности измерительных трансформаторов.
7. Какие значения тока и напряжения можно измерить с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения?
8. От каких факторов зависит дополнительная погрешность, вносимая измерительными трансформаторами?
9. При каких измерениях сказывается влияние угловой погрешности?
10. По каким параметрам выбираются измерительные трансформаторы напряжения и тока?
11. Как изменится магнитный поток трансформатора тока при обрыве его вторичной цепи? Каковы последствия?
12. Чем опасен режим холостого хода измерительного трансформатора тока?

# Приложение 1

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Все графические методы расчета цепей синусоидального тока не обеспечивают точного расчета электрических цепей, кроме того, они сложны и трудоемки.

Наиболее простым и точным методом расчета электрических цепей синусоидального тока является комплексный метод, основанный на теории комплексных чисел.

Синусоидальная величина изображается вращающимся вектором на комплексной плоскости с осями  $\pm 1$  и  $\pm j$ , где символ  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

За положительное направление вращения вектора принято направление против часовой стрелки. За время, равное одному периоду, вектор совершает один оборот.

На рисунке изображен вектор комплексного тока  $\dot{I}$ , которому соответствует комплексное число

$$\dot{I} = I e^{+j\psi_i},$$

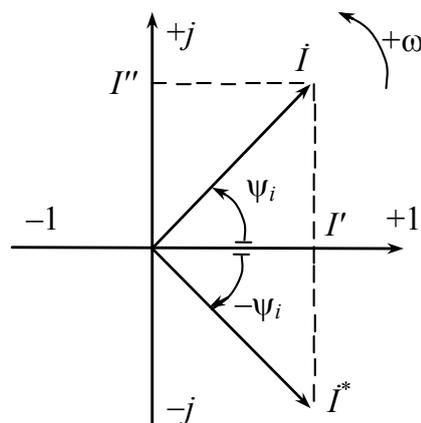
где  $I$  – модуль действующего значения тока, равный длине вектора:

$$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2},$$

где  $I' = I \cos \psi_i$  – действительная составляющая тока;  $I'' = I \sin \psi_i$  – мнимая составляющая;  $\psi_i = \arctg (I'' / I')$  – аргумент тока, равный начальной фазе, т. е. угол между вектором и действительной полуосью  $+1$  при  $t = 0$ . Аргумент положительный, если вектор отложен в направлении против движения часовой стрелки, и отрицательный – если по часовой.

Комплексные значения синусоидальных величин обозначают  $\dot{I}, \dot{U}, \dot{E}$ , несинусоидальных –  $\underline{Z}, \underline{Y}$ .

Над комплексными числами можно производить все алгебраические действия (при сложении и вычитании удобнее использовать



Составляющие  
комплексного числа  
на комплексной плоскости

алгебраическую форму, а при умножении, делении, возведении в степень, извлечении корня – показательную).

Алгебраическая форма записи:

$$\dot{I} = I' + jI''.$$

Тригонометрическая форма записи:

$$\dot{I} = I \cos \psi_i + j \sin \psi_i.$$

Показательная форма записи:

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}.$$

Переход из одной формы записи в другую осуществляется по формуле Эйлера через тригонометрическую форму записи:

$$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha.$$

Например,

$$\dot{I} = 10e^{j37^\circ} = 10 \cos 37^\circ + j10 \sin 37^\circ = 10 \cdot 0,8 + j10 \cdot 0,6 = 8 + j6;$$

$$\dot{I} = 8 + j6 = \sqrt{8^2 + 6^2} e^{+j \arctg \frac{6}{8}} = 10e^{+j37^\circ}, \text{ А.}$$

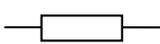
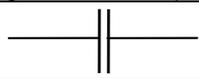
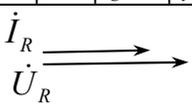
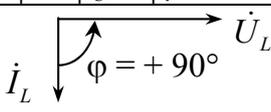
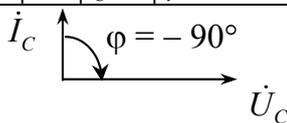
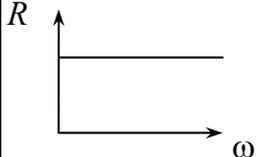
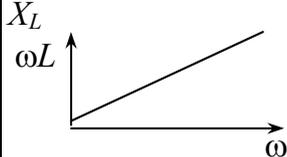
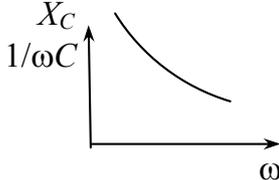
При работе с комплексными числами ( $\dot{I}$ ) используют и сопряженные комплексные величины ( $\dot{I}^*$ ), имеющие одинаковые модули и одинаковые по величине, но противоположные по знаку аргументы:

$$\dot{I} = 10e^{j37^\circ}, \text{ А; } \dot{I}^* = 10e^{-j37^\circ}, \text{ А.}$$

$$\text{Произведение } \dot{I} \cdot \dot{I}^* = 10e^{j37^\circ} \cdot 10e^{-j37^\circ} = 100e^{j0^\circ}, \text{ А.}$$

## Приложение 2

# ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Двухполюсник	Резистор (резистивное сопротивление)	Катушка (индуктивное реактивное сопротивление)	Конденсатор (емкостное реактивное сопротивление)
Обозначение			
Связь между мгновенными значениями $u$ и $i$	$i = u_R / R$	$u_L = L di / dt$	$i_C = C du_C / dt$
Если задано,	$u_R = U_{\max} \sin \omega t$	$u_L = U_{\max} \sin \omega t$	$u_C = U_{\max} \sin \omega t$
то имеем:	$i = I_{\max} \sin \omega t / R$	$i = U_{\max} \sin(\omega t - \pi / 2) / \omega L = I_{\max} \sin(\omega t - \pi / 2)$	$i = \omega C U_{\max} \cos \omega t = I_{\max} \sin(\omega t + \pi / 2)$
Действующее значение тока	$I = U_R / R$	$I = U_L / \omega L$	$I = \omega C U_C$
Сопротивление (реактивное сопротивление)	$R$	$X_L = \omega L$	$X_C = 1 / \omega C$
Сдвиг фаз	$\varphi = \psi_U - \psi_i = 0^\circ$	$\varphi = \psi_U - \psi_i = -90^\circ$	$\varphi = \psi_U - \psi_i = +90^\circ$
Сдвиг по фазе			
Комплексное сопротивление	$\underline{Z} = R = Re^{j0^\circ}$	$\underline{Z} = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$	$\underline{Z} = -jX_C = X_C e^{j-90^\circ}$
Расчет комплексным методом	$\dot{i} = \dot{U}_R / R$	$\dot{i} = -j \dot{U}_L / \omega L$	$\dot{i} = j \omega C \dot{U}_C$
Зависимость сопротивления от частоты			

## Приложение 3 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КОМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ

### Задача 1

Определить ток и напряжения на участках цепи (рис. ПЗ.1), если известны следующие данные:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= 220 \text{ В}; R = 8 \text{ Ом}; \\ X_L &= 6 \text{ Ом}; \Psi_U = 0. \end{aligned}$$

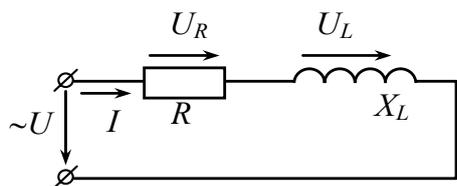


Рис. ПЗ.1. Цепь с последовательным включением  $R$  и  $X_L$

*Решение.*  
Комплексное сопротивление цепи, Ом:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{экв}} &= R + jX_L = 8 + j6 = \\ &= \sqrt{R^2 + X_L^2} e^{j \arctg \frac{X_L}{R}} = z_{\text{экв}} e^{j \arctg \frac{X_L}{R}} = 10 e^{j37^\circ}. \end{aligned}$$

Ток цепи, А:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{220 e^{j0^\circ}}{10 e^{j37^\circ}} = 22 e^{j(0-37)^\circ} = 22 e^{-j37^\circ}.$$

Начальная фаза тока  $\psi_i = -37^\circ$ ; показания амперметра 22 А.

Напряжения участков цепи:

$$\dot{U}_R = R \dot{I} = 8 e^{j0^\circ} \cdot 22 e^{-j37^\circ} = 176 e^{-j37^\circ};$$

$$\dot{U}_L = jX_L \dot{I} = 6 e^{j90^\circ} \cdot 22 e^{-j37^\circ} = 132 e^{j(90^\circ + (-37^\circ))} = 132 e^{j53^\circ}.$$

На резисторе  $R$  показания вольтметра – 176 В. На катушке  $X_L$  показания вольтметра – 132 В.

### Задача 2

Определить ток, напряжения на участках цепи и мощности электрической цепи при последовательном соединении  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов (рис. ПЗ.2), если известны следующие данные:

$$\dot{U} = 220 \text{ В}; R = 8 \text{ Ом}; X_L = 6 \text{ Ом}; X_C = 12 \text{ Ом}; \psi_U = 0.$$

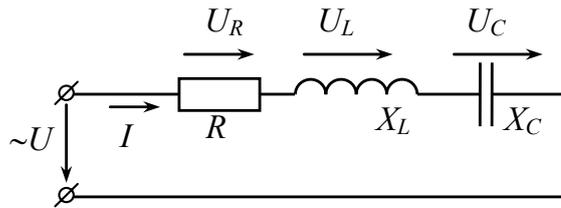


Рис. ПЗ.2. Пример к расчету цепи с последовательным включением  $R, X_L, X_C$

*Решение.*

Определяем комплексное сопротивление цепи, Ом:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{экв}} &= R + j(X_L - X_C) = 8 + j(6 - 12) = \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}} = z_{\text{экв}} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}} = 10 e^{-j37^\circ}; \\ \arctg(X_L - X_C) / R &= \arctg(6 - 12) / 8 = -37^\circ. \end{aligned}$$

Определяем комплексный ток, А:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U} e^{j0^\circ}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}}} = \frac{220 e^{j0^\circ}}{10 e^{-j37^\circ}} = 22 e^{j(0 - (-37))^\circ} = 22 e^{j37^\circ}.$$

Определяем комплексные напряжения на участках цепи, В:

$$\begin{aligned} \dot{U}_R &= R \dot{i} = 8 e^{j0^\circ} \cdot 22 e^{j37^\circ} = 176 e^{j(0+37)^\circ} = 176 e^{j37^\circ}; \\ \dot{U}_L &= jX_L \dot{i} = 6 e^{j90^\circ} \cdot 22 e^{j37^\circ} = 132 e^{j(90+37)^\circ} = 132 e^{j127^\circ}; \\ \dot{U}_C &= -jX_C \dot{i} = 12 e^{-j90^\circ} \cdot 22 e^{j37^\circ} = 132 e^{j(-90+37)^\circ} = 132 e^{-j53^\circ}. \end{aligned}$$

Определяем комплексную полную мощность цепи, ВА:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{U} \dot{i}^* = 220 e^{j0^\circ} \cdot 22 e^{-j37^\circ} = 4840 e^{-j37^\circ} = \\ &= 4840 \cos 37^\circ - j4840 \sin 37^\circ = 3872 - j2904. \end{aligned}$$

Активная мощность  $P = 3872$  Вт.

Реактивная (емкостная) мощность:  $Q = -2904$  вар.

### **Задача 3**

Определить токи ветвей для схемы, приведенной на рис. ПЗ.3, если известны следующие данные:

$$u(t) = 183 \sin(314t + 0); R_1 = 8 \text{ Ом}; R_2 = 12 \text{ Ом}; X_L = 6 \text{ Ом}; X_C = 5 \text{ Ом}.$$

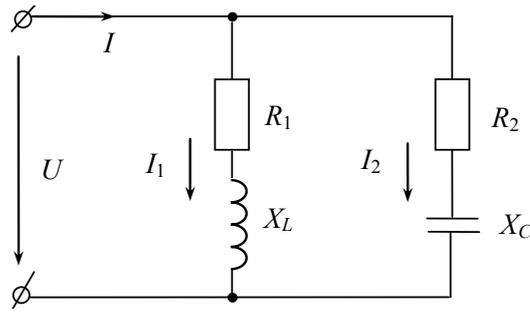


Рис. ПЗ.3. Цепь с параллельно-последовательным включением ветвей с  $R-L$  и  $R-C$

Решение.

Комплексное действующее входное напряжение цепи, В:

$$\dot{U} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{183}{\sqrt{2}} = \frac{183}{1,41} = 130.$$

Комплексные токи параллельных ветвей, А:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{\dot{U}e^{j0^\circ}}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2} e^{j \arctg \frac{X_L}{R_1}}} = \frac{130e^{j0^\circ}}{10e^{j37^\circ}} = 13e^{-j37^\circ} = (10 - j7,8) \text{ А.}$$

Следовательно,  $i_1(t) = 13\sqrt{2} \sin(\omega t - 37^\circ)$ ;

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_2} = \frac{\dot{U}e^{j0^\circ}}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2} e^{j \arctg \frac{X_C}{R_2}}} = \frac{130e^{j0^\circ}}{10e^{-j22^\circ}} = 10e^{j22^\circ} = (9 + j3,74) \text{ А,}$$

т.е.  $i_2(t) = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + 22^\circ)$ .

Сумма комплексных токов параллельных ветвей, А:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (10 - j7,8) + (9 + j3,74) = 19,7 - j4,076 = 20e^{-j11,5^\circ}.$$

Полученному комплексному току соответствует синусоидальный ток:

$$i(t) = 20\sqrt{2} \sin(\omega t - 11,5^\circ) = 28\sin(314t - 11,5^\circ) \text{ А.}$$

#### Задача 4

В четырехпроводную сеть с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ ,  $\psi_{Ua} = 0$ , включен трехфазный приемник, соединенный по схеме звезда с нейтральным проводом. Комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_a = 3 + j4; \quad \underline{Z}_b = 3 + j5,2; \quad \underline{Z}_c = 4 + j3.$$

Найти комплексные токи в линейных и нейтральном проводах.

*Решение.*

Фазное напряжение, В:

$$\dot{U}_\phi = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127.$$

Комплексные фазные напряжения, В:

$$\dot{U}_a = 127e^{j0^\circ}; \quad \dot{U}_b = 127e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_c = 127e^{-j240^\circ} = 127e^{+j120^\circ}.$$

Комплексные линейные токи равны соответственно комплексным фазным токам, А:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127e^{j0^\circ}}{\sqrt{3^2 + 4^2} e^{j \arctg \frac{4}{3}}} = \frac{127e^{j0^\circ}}{5e^{j53^\circ}} = 25,4e^{-j53^\circ};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{\sqrt{3^2 + 5,2^2} e^{j \arctg \frac{5,2}{3}}} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{6e^{j60^\circ}} = 21,2e^{-j180^\circ};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{\sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctg \frac{3}{4}}} = \frac{127e^{j120^\circ}}{5e^{j37^\circ}} = 25,4e^{j83^\circ}.$$

Комплексный ток в нейтральном проводе, А:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 25,4e^{-j53^\circ} + 21,2e^{-j180^\circ} + 25,4e^{j83^\circ}; \\ \dot{I}_N &= (25,4 \cos(-53^\circ) + j25,4 \sin(-53^\circ)) + (21,2 \cos(-180^\circ) + \\ &+ j21,2 \sin(-180^\circ)) + (25,4 \cos 83^\circ + j25,4 \sin 83^\circ) = \\ &= -2,81 + j4,9 = 5,9e^{j120^\circ}. \end{aligned}$$

## Приложение 4

# ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

**Общие положения.** Электробезопасность – это система организационно-технических мероприятий и средств, защищающих человека от поражающего действия электрического тока.

В любом учебном заведении с широким применением электроприборов опасность электротравматизма всегда вероятна.

Знание основных правил пользования электроустановками является первоочередной обязанностью преподавателей, администрации и студентов.

Тело человека является хорошим проводником электрического тока, поэтому последний может оказать на него термическое, электролитическое и биологическое воздействие. Опасность воздействия электричества на человека зависит от величины, длительности и других параметров тока, а также от индивидуальных свойств и состояния организма.

При рассмотрении случаев поражения электрическим током можно выделить два характерных вида. Первый относится к электрическому удару, а второй – к местным электрическим травмам.

Второй вид включает в себя поражение током тканей и органов, в том числе ожоги, металлизация кожи, механические повреждения, ослепление и др.

Величина тока, проходящего по человеку, зависит от напряжения сети и сопротивления его тела. Сопротивление тела есть величина, изменяющаяся от 8000 до 100 000 Ом, а во влажном состоянии оно менее 1000 Ом.

Считается безопасным для человека напряжение менее 36 В, а в помещениях особо опасных – 12 В.

Основными причинами поражения электрическим током являются:

- случайное прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением (оголенным проводам, контактам электроаппаратуры, шинам и т. д.);
- неожиданное возникновение напряжения там, где в нормальных условиях его быть не должно;
- появление напряжения на отключенных частях электрооборудования (по причине ошибочного включения, наведения напряжения соседними установками и т. д.);

– возникновение напряжения на поверхности земли в результате замыкания провода с землей, неисправности заземляющих устройств и т. д.

Для предупреждения поражений электрическим током следует строго выполнять правила устройств электроустановок (ПУЭ), правила технической эксплуатации (ПТЭ), правила по технике безопасности (ПТБ). К выполнению работ на электроустановках допускаются лица, прошедшие обучение и имеющие соответствующее удостоверение.

### **Требования к помещениям кабинетов, мастерских.**

Для безопасных и здоровых условий учебы и работы студентов необходимо иметь помещение нормальных размеров, отвечающее санитарно-гигиеническим нормам.

Площади помещений должны удовлетворять требованиям ВСН-50-86, номенклатуре типов зданий. Помещения должны быть светлыми, сухими и теплыми, с ровными, нескользкими полами без выбоин и щелей; поверхности стен, потолков и дверей – гладкими и матовыми; радиаторы и трубопроводы отопительной и водопроводной систем оборудованы диэлектрическим (деревянным) ограждением.

Площадь кабинетов (лабораторий) должна быть в пределах 54–72 м<sup>2</sup>, высота помещений – 3,3 м. Площади учебно-производственных мастерских зависят от их назначения и оборудования.

Площадь, приходящаяся на одного обучаемого, должна быть не менее 4 м<sup>2</sup>, объем – не менее 15 м<sup>3</sup>.

Температура в кабинетах и лабораториях должна быть не ниже 16–18°С.

Во всех лабораториях должны быть аптечки с комплектом медикаментов для оказания первой медицинской помощи.

Наименьшая освещенность в лабораториях должна быть при люминесцентных лампах – 300 лк; лампах накаливания – 150 лк.

**Электрическая сеть.** К кабинетам и мастерским обычно подходит четырехпроводная сеть напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью, и подключается она к распределительному щитку (РЩ). Корпус щита должен быть обязательно заземлен. На щите смонтированы предохранители, служащие для защиты сети от перегрузок и коротких замыканий. Включение и отключение щита производится рубильником или главным автоматом.

Далее следуют групповые коммутирующие устройства. Ими могут быть отходящие рубильники с предохранителями, просто предохранители или автоматы.

Электропроводка к рабочим столам или электрооборудованию должна быть выполнена таким образом, чтобы полностью исключалась возможность нарушения изоляции, обрыва проводов, коротких замыканий и т. д. Для защиты от механических повреждений проводка должна быть надежно защищена. С этой целью ее делают скрытой или закрывают уголками, швеллером, металлорукавом и т. д. Обычно прокладку силовой электропроводки выполняют отдельно от осветительной.

При выборе марки проводов учитывают характер помещения, способ прокладки, параметры электрического тока. Поперечное сечение токопроводящих должно соответствовать токовой нагрузке.

Присоединение проводов и кабелей к электрооборудованию может быть постоянным и временным. В первом случае подводящие провода присоединяются к клеммам прибора или местного коммутационного устройства (например, стенда), во втором – используются штепсельные розетки. Здесь подключение самих электроприборов осуществляется гибкими проводами.

**Правила по технике безопасности при проведении лабораторных работ, демонстрационных опытов.** Во время проведения лабораторных работ преподаватель обязан обучить студентов правильному и безопасному обращению с оборудованием лаборатории, постоянно следить за выполнением ими мер электробезопасности. Началу каждой самостоятельной лабораторной работы должен предшествовать инструктаж по технике безопасности и оформление его в специальном журнале.

Студент должен знать, как подготовиться к лабораторной работе, как ее провести и чем завершить.

Обычно подготовка к работе сводится к ознакомлению с оборудованием, приборами, схемами, характером работы. Здесь должен быть проведен беглый опрос студентов с целью выяснения у них качества подготовки.

Далее следует лабораторное занятие. Студенты собирают схему, комплектуют контрольно-измерительные приборы, производят своеобразное моделирование будущей установки. Напомним, что все эти операции они проводят без подключения к электрической сети.

После проверки преподавателем установки или схемы дается команда на включение сети. Если при этом обнаруживаются какие-то неполадки (зашкаливание приборов, потрескивание контактов и т. п.), установку следует немедленно отключить от сети, найти причины неполадки и устранить их.

Во время лабораторных исследований не следует касаться монтажных проводов, клемм, измерительных приборов.

По окончании эксперимента или демонстрационного опыта лабораторную установку вначале отключают от сети, а затем лишь разбирают.

Завершается лабораторная работа составлением отчета, уборкой приборов и всего рабочего места.

Если в процессе занятий произошло поражение студента электрическим током, то необходимо немедленно отключить напряжение. Пункт включения и отключения сети должен быть известен всем студентам.

### **Первая помощь при поражении электрическим током.**

Если пострадавший не в состоянии сам освободиться от действия электрического тока, ему необходима немедленная помощь. Освобождая пострадавшего, необходимо принять меры безопасности, чтобы самому не попасть под напряжение. Если это возможно, следует отключить электроустановку ближайшим выключателем. При отсутствии такой возможности – разорвать или перерезать провода, пользуясь при этом инструментами с изолированными ручками.

При невозможности отключения электроустановки необходимо отделить пострадавшего от токоведущих частей. Это можно сделать, оттащив пострадавшего за его одежду, при этом нельзя касаться тела пострадавшего. Можно воспользоваться также и другими изолирующими предметами.

После освобождения пострадавшего от действия тока необходимо немедленно оказать ему доврачебную помощь в соответствии с его состоянием. Если пострадавший не потерял сознание, его нужно отвести в удобное для отдыха помещение, успокоить, дать выпить воды, предложить полежать. Если при этом у пострадавшего обнаружены травмы, – оказать на месте соответствующую помощь и вызвать врача. При необходимости надо направить пострадавшего на медицинский пункт.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит нормально и у него прослушивается пульс, нужно немедленно

вызвать врача, до его прибытия оказать помощь на месте – привести пострадавшего в сознание: давать нюхать нашатырный спирт, слегка смочить лицо водой, обеспечить доступ свежего воздуха.

Если пострадавший находится в тяжелом состоянии, т. е. не дышит или дышит тяжело, прерывисто, необходимо, не теряя времени, приступить к искусственному дыханию. Одновременно нужно вызвать врача.

Подготовка к искусственному дыханию:

– освободить пострадавшего от стесняющей одежды – расстегнуть ворот, развязать шарф, освободить пояс и т. д., положить пострадавшего на спину, под лопатки – валик из свернутой одежды. Положить одну руку под шею пострадавшему и, нажав другой рукой на лоб, максимально запрокинуть голову назад, при этом рот раскроется, язык освободит гортань. Освободить рот пострадавшего от посторонних предметов, вынуть, зубные протезы.

Выполнение искусственного дыхания способом «изо рта в рот»:

– Оказывающий помощь подкладывает одну руку под шею пострадавшего, другой рукой нажимает на лоб, запрокидывая голову, максимально назад, и одновременно зажимает нос пострадавшего. Сделав два-три глубоких вдоха и выдоха, затем глубокий вдох, прикладывают рот ко рту пострадавшего и производят вдувание воздуха в легкие пострадавшего. Таким образом следует сделать 10–12 вдуваний в минуту – через каждые 5–6 с – одно вдувание. После каждого вдувания необходимо обязательно освобождать рот и нос пострадавшего для выпуска воздуха из его легких.

При вдувании видно, как расширяется грудная клетка пострадавшего, при выпуске грудная клетка сокращается. При появлении первых слабых вдохов следует приурочить начало искусственного вдоха к моменту начала самостоятельного вдоха пострадавшего. Искусственное дыхание проводится до восстановления собственного глубокого и ритмичного дыхания.

В случае остановки или фибрилляции сердца у пострадавшего для поддержания кровообращения одновременно с искусственным дыханием необходимо проводить наружный (непрямой) массаж сердца. Для этого оказывающий помощь должен расположиться на коленях сбоку пострадавшего. Определив путем прощупывания место надавливания – нижнюю треть грудины, оказывающий помощь должен положить на него руку ладонью вниз. Ладонь другой руки накладывается на первую под прямым углом. Надавливать следует помогая себе наклоном всего корпуса, локтевые суставы должны

быть разогнуты до отказа, руки прямые. Пальцы обеих рук должны быть сведены вместе и не касаться грудной клетки пострадавшего. Повторять надавливание следует не реже 1 раза в секунду. Нельзя надавливать на верхнюю часть грудины, на окончания нижних ребер, так как это может привести к перелому. Нельзя также надавливать ниже грудной клетки на мягкие ткани, чтобы не повредить расположенные здесь органы, в первую очередь печень, и не вызывать рвоту.

Если первую помощь оказывает один человек, он должен после двух глубоких вдуваний в рот или нос пострадавшего произвести 15 надавливаний на грудную клетку, затем снова два вдувания и опять 15 надавливаний. При чередовании искусственного дыхания и массажа сердца пауза должна быть минимальной. Обе манипуляции проводятся с одной стороны.

Если первую помощь оказывают двое, один из них должен проводить массаж сердца, другой – искусственное дыхание, при этом производится одно вдувание, затем пять нажатий на грудную клетку.

Искусственное дыхание нужно проводить до восстановления устойчивого дыхания и деятельности сердца или до первой передачи пострадавшего медицинскому персоналу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев, И. И. Электротехнический справочник / И. И. Алиев. – М.: Радио Софт, 2004. – 384 с.
2. Беневоленский, С. Б. Основы электротехники / С. Б. Беневоленский, С. Л. Марченко. – М.: Физматлит, 2006. – 566 с.
3. Воропаев, Е. Г. Электротехника / Е. Г. Воропаев. – Тула: ТГПИ, 1995.
4. Горошко, В. И. Электротехника, основы электроники и электрооборудование химических производств / В. И. Горошко, И. О. Оробей, Л. М. Давидович. – Минск: БГТУ, 2006. – 246 с.
5. Григораш, О. В. Электротехника и электроника / О. В. Григораш, Г. А. Султанов, Д. А. Нормов. – Ростов-на-Дону; Краснодар: Феникс: Неоглари, 2008. – 462 с.
6. Данилов, И. А. Общая электротехника / И. А. Данилов. – М.: Высшее образование, 2009. – 673 с.
7. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – М.: Академия, 2005. – 394 с.
8. Иванов, И. И. Электротехника / И. И. Иванов, В. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 3-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2005. – 496 с.
9. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 10-е изд. – М.: Академия, 2007. – 538 с.
10. Электротехника и электроника / В. В. Кононенко [и др.]; под ред. В. В. Кононенко. – 4-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. – 778 с.
11. Коровкина, Н. П. Электротехника и основы электроники / Н. П. Коровкина [Электронный ресурс]: тексты лекций для студентов специальностей 1-36 07 01, 1-36 01 08. – 2012. Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники.
12. Рекус, Г. Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями / Г. Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.
13. Электрические цепи / сост.: В. И. Горошко, Н. П. Коровкина, В. К. Мороз. – Минск: БГТУ, 2005. – 56 с.
14. Метрология и радиоизмерения: учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.]; под ред. В. И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2003. – 526 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Выполнение лабораторной работы .....	4
Обработка результатов и оформление отчета .....	7
Лабораторная работа № 1. Ознакомление со свойствами электрических цепей синусоидального тока с R-, L-, C-элементами .....	9
Лабораторная работа № 2. Анализ неразветвленной цепи синусоидального тока .....	21
Лабораторная работа № 3. Анализ разветвленной цепи синусоидального тока .....	30
Лабораторная работа № 4. Исследование цепи трехфазного тока присоединении приемников по схеме «звезда» .....	38
Лабораторная работа № 5. Исследование цепи трехфазного тока при соединении приемников по схеме «треугольник» .....	48
Лабораторная работа № 6. Измерение активной и реактивной мощности в трехфазных цепях .....	56
Лабораторная работа № 7. Расширение пределов измерения электроизмерительных приборов .....	62
Приложение 1. Комплексный метод расчета электрических це- пей синусоидального тока .....	68
Приложение 2. Таблица Основные свойства элементов цепей переменного тока .....	70
Приложение 3. Расчет электрических цепей комплексным методом .....	71
Приложение 4. Техника безопасности при проведении лабораторных работ .....	75
Литература .....	81

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания  
к проведению лабораторных работ

Составители:

**Александров Олег Игоревич**  
**Коровкина Наталья Павловна**  
**Сарока Виктор Викторович**

Редактор *Р. М. Рябая*  
Компьютерная верстка *Е. В. Ильченко*  
Корректор *Р. М. Рябая*

Подписано в печать 21.11.2013. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 4,8. Уч.-изд. 5,0.  
Тираж 450 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
«Белорусский государственный технологический университет»  
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.  
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.