

Ярославский государственный педагогический  
университет им. К. Д. Ушинского

**М.Л. Игольников**

## **Лабораторная работа № 19**

# **Исследование электрической цепи переменного тока**

Ярославль  
2010

## Оглавление

1. Цель работы . . . . .	3
2. Подготовка к лабораторной работе . . . . .	3
3. Краткая теория . . . . .	4
4. Описание экспериментальной установки . . . . .	16
5. Задание и порядок выполнения . . . . .	17
6. Содержание отчёта . . . . .	19

## **Лабораторная работа № 19**

### **Исследование электрической цепи переменного тока**

#### **1. Цель работы**

1. Приобрести практические навыки в проведении измерений в цепях переменного тока.
2. Экспериментально исследовать свойства катушки индуктивности и конденсатора на переменном токе.
3. Экспериментально исследовать свойства последовательной цепи переменного тока с индуктивностью ёмкостью и активным сопротивлением на фиксированной частоте при различных соотношениях реактивных сопротивлений.
4. Проверить справедливость закона Ома для цепи переменного тока.

#### **2. Подготовка к лабораторной работе**

1. Уясните цель и содержание лабораторной работы.
2. Изучите рекомендуемую литературу:
  - Р.В. Телеснин и В.Ф. Яковлев “Курс физики. Электричество” М., 1970 год, §§ 120, 177, 178, 183, 185, 186.
  - С.Г. Калашников “Электричество” М., 1977 год, §§ 217÷221; 223.
  - Настоящее руководство к лабораторной работе.
3. Дайте ответы на контрольные вопросы:
  - Устройство и принцип действия измерительных приборов электромагнитной и электродинамической систем.
  - Гармонический переменный ток и его параметры. Действующее значение переменного тока (напряжения, ЭДС).

- Активное сопротивление в цепи переменного тока.
  - Индуктивность в цепи переменного тока.
  - Ёмкость в цепи переменного тока.
  - Закон Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивное, ёмкостное и активное сопротивления.
  - Работа и мощность в цепи переменного тока.
  - Резонанс напряжений в цепи переменного тока.
  - Способы измерения индуктивности катушки, ёмкости конденсатора и активного сопротивления, используемые в настоящей лабораторной работе.
4. Изучите принципиальную схему лабораторной установки и её работу, ознакомьтесь с приданными к ней приборами, уясните назначение элементов схемы и методику измерений.
5. Повторите правила техники безопасности.

### **ВНИМАНИЕ!**

**Элементы лабораторной установки находятся под напряжениями опасными для жизни.**

## **3. Краткая теория**

Переменным называется ток, который изменяется с течением времени:

$$i = i(t).$$

Мгновенным значением переменного тока называется его значение в фиксированный момент времени.

Периодическим называют такой переменный ток, мгновенные значения которого повторяются через равные промежутки времени:

$$i = i(t) = i(t + kT),$$

где  $k = 0; 1; 2; 3; 4; \dots n$ .

### 3. Краткая теория

---

$T$  — период переменного тока, т.е. наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения тока повторяются в той же последовательности.

Простейшим типом периодического тока является гармонический ток:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

или

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi_1),$$

где  $I_m$  — амплитуда тока;  
 $\omega t + \varphi$  — полная фаза колебания;  
 $\varphi$  — начальная фаза колебания (при  $t = 0$ );  
 $\omega$  — круговая частота (угловая скорость).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \left[ \frac{\text{Рад}}{c} \right],$$

где  $\nu$  — частота переменного периодического тока, численно равная числу периодов в 1 секунду:

$$\nu = \frac{1}{T} [\text{Гц}].$$

Гармонический ток можно представить в виде проекции на вертикальную ось вращающегося вектора (рис. 3.1).

**Действующим** или **эффективным** значением гармонического тока называется значение такого постоянного тока, который протекая через одно и тоже неизменное сопротивление  $R$  за период времени  $T$  выделяет такое же количество тепла, что и рассматриваемый гармонический ток.

Между амплитудным и действующим значением гармонического тока существует простая связь:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично для напряжения и ЭДС:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}.$$

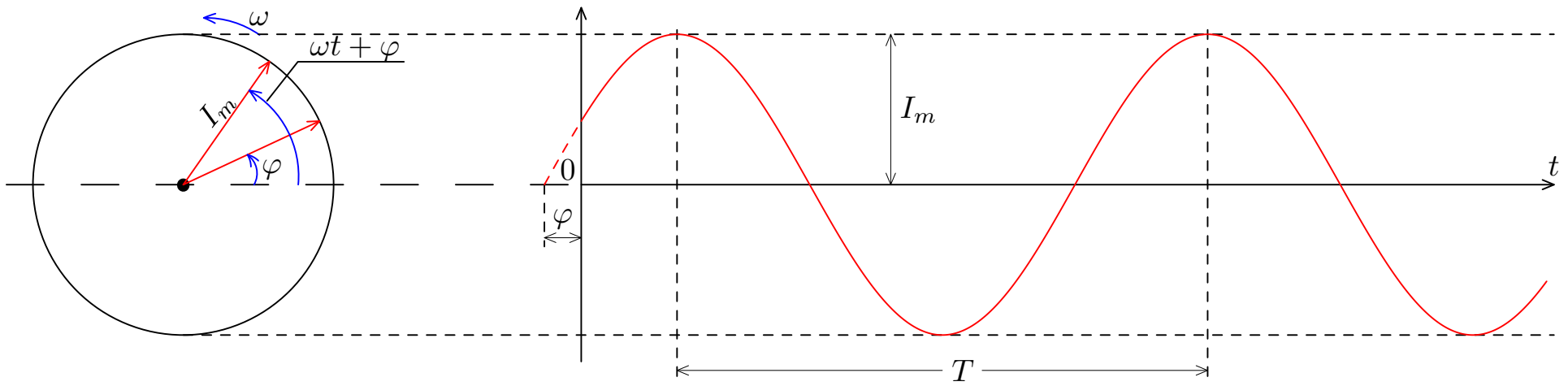


Рис. 3.1

### 3. Краткая теория

---

Для мгновенных значений достаточно медленно изменяющихся переменных ЭДС и токов справедливы основные законы постоянного тока в их наиболее общей форме.

При этом следует иметь в виду, что сопротивление одной и той же электрической цепи для постоянного и переменного токов **не совпадают**. Так один и тот же резистор для постоянного и переменного токов имеет разное электрическое сопротивление.

Основными элементами электрической цепи переменного тока являются активное сопротивление, индуктивность и ёмкость.

**Активное сопротивление** представляет собой элемент электрической цепи, в котором при прохождении тока происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую.

Численное значение активного сопротивления определяется отношением мощности, расходуемой на тепло к квадрату **действующего значения** переменного тока:

$$R = \frac{P}{I^2} [\text{Ом}].$$

Необходимо помнить, что

$$R \neq \rho \frac{l}{S}.$$

В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе (рис. 3.2).

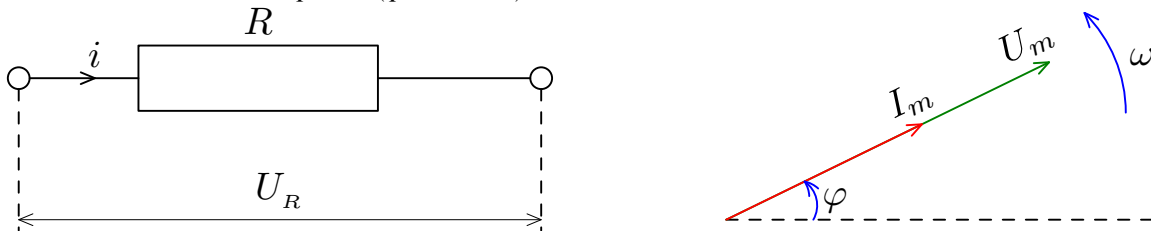


Рис. 3.2

Покажем это.

Пусть:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.1)$$

Тогда на основании закона Ома для участка цепи без ЭДС:

$$iR = U_R. \quad (3.2)$$

Подставляя (3.1) в (3.2) получим:

$$U_R = U_{mR} \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Начальная фаза тока  $\varphi_i = \varphi$ .

Начальная фаза напряжения  $\varphi_u = \varphi$ .

Разность фаз между напряжением и током:

$$\varphi_u - \varphi_i = 0.$$

В цепи с активным сопротивлением мгновенные, амплитудные и действующие значения напряжения и тока связаны законом Ома:

$$U_R = iR; \quad U_{mR} = I_m R; \quad U_R = IR.$$

**Индуктивность**  $L$  — это элемент электрической цепи, способный накапливать энергию магнитного поля.

В цепи переменного тока с индуктивностью напряжение опережает по фазе ток на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 3.3). Покажем это.

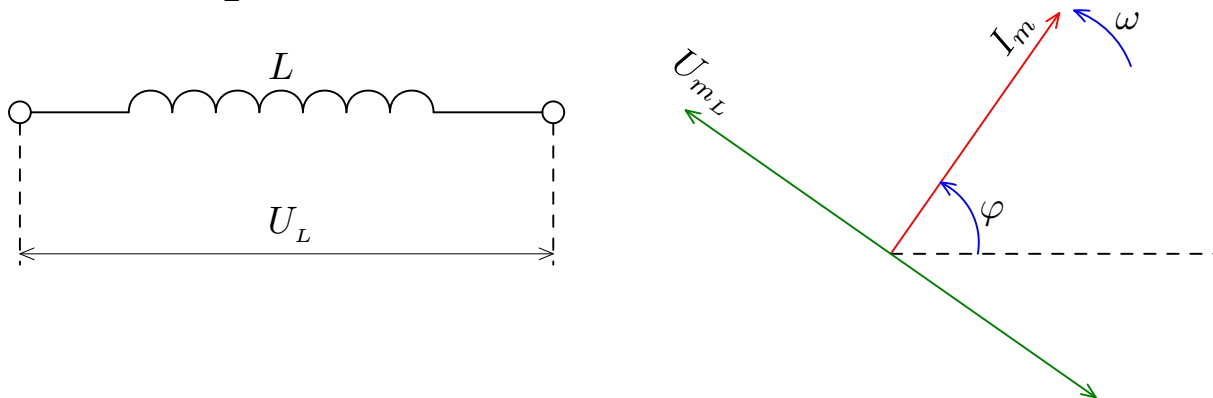


Рис. 3.3

Пусть  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ .

При прохождении переменного тока в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции:

$$I_L = -L \frac{di}{dt}.$$

На основании закона Ома для участка цепи с ЭДС можно записать:

$$iR = U_L + I_L,$$



но  $R = 0$ . Следовательно,

$$U_L + I_L = 0 \quad \text{и} \quad U_L = L \frac{di}{dt},$$

где  $U_L$  — мгновенное напряжение на индуктивности, уравновешивающее ЭДС самоиндукции.

$$U_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \varphi) = U_{mL} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Начальная фаза тока  $\varphi_i = \varphi$ .

Начальная фаза напряжения  $\varphi_u = \varphi + \frac{\pi}{2}$ .

Разность фаз между напряжением и током:

$$\varphi_u - \varphi_i = +\frac{\pi}{2}.$$

ЭДС самоиндукции отстаёт по фазе от тока на угол  $\frac{\pi}{2}$ , так как  $I_L = -U_L$ .

Таким образом, в цепи переменного тока с индуктивностью амплитудные и действующие значения напряжения и тока формально связаны законом Ома:

$$U_{mL} = \omega L I_m = X_L I_m; \quad U_L = \omega L I = X_L I,$$

где  $\omega L = X_L$  — индуктивное сопротивление, измеряемое в [Ом]. Это расчётная величина, которая не имеет физического смысла.

**Ёмкость  $C$**  — это элемент электрической цепи, способный накапливать энергию электрического поля.

В цепи переменного тока с ёмкостью напряжение отстаёт по фазе от тока на угол  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 3.4). Докажем это.

Пусть:

$$U_c = U_{mc} \sin(\omega t + \varphi).$$

Это напряжение приложено к конденсатору от внешнего источника. Оно уравновешивает ЭДС ёмкости (аналогичную ЭДС самоиндукции в

катушке индуктивности), которая возникает при наличии зарядов на обкладках конденсатора.

$$I_c = \frac{q}{C}$$

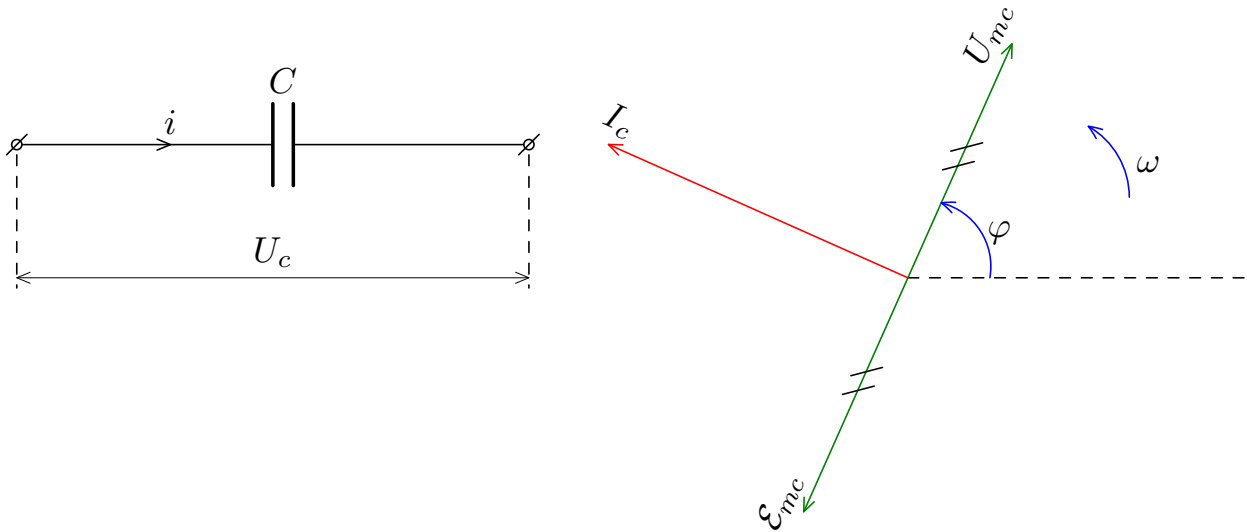


Рис. 3.4

На основании закона Ома для участка цепи с ЭДС можно записать:

$$iR = U_c + I_c,$$

но  $R = 0$ . Следовательно,

$$U_c + I_c = 0, \quad I_c = -U_c$$

За положительное направление тока в соответствии с законом сохранения электрического заряда принимается направление, при котором заряды покидают обкладки конденсатора:

$$i = -\frac{dq}{dt}.$$

Вместе с тем  $q = C \cdot U_c = -CU$ .

Следовательно,

$$i = C \frac{dU_c}{dt}.$$

Подставляя значение  $U_c$ , получим:

$$i = C \frac{dU_c}{dt} = \omega C U_{mc} \cos(\omega t + \varphi) = I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Начальная фаза напряжения  $\varphi_u = \varphi$ .

Начальная фаза тока  $\varphi_i = \varphi + \frac{\pi}{2}$ .

Разность фаз между напряжением и током:

$$\varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}.$$

При этом ЭДС ёмкости опережает по фазе ток на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Таким образом, в цепи переменного тока с ёмкостью амплитудные и действующие значения напряжения и тока формально связаны законом Ома:

$$I_m = \omega C U_{mc} = \frac{U_{mc}}{X_c}; \quad I = \omega C U = \frac{U}{X_c},$$

где  $\frac{1}{\omega C} = X_c$  — ёмкостное сопротивление, измеряемое в [Ом].

Это расчётная величина, которая не имеет физического смысла.

В общем случае в состав цепи переменного тока могут входить и активное сопротивление, и ёмкость, и индуктивность. Все эти элементы могут быть соединены между собой как последовательно, так и параллельно. На рисунке 3.5 показана схема последовательного соединения указанных элементов и соответствующая им векторная диаграмма для тока и напряжений.

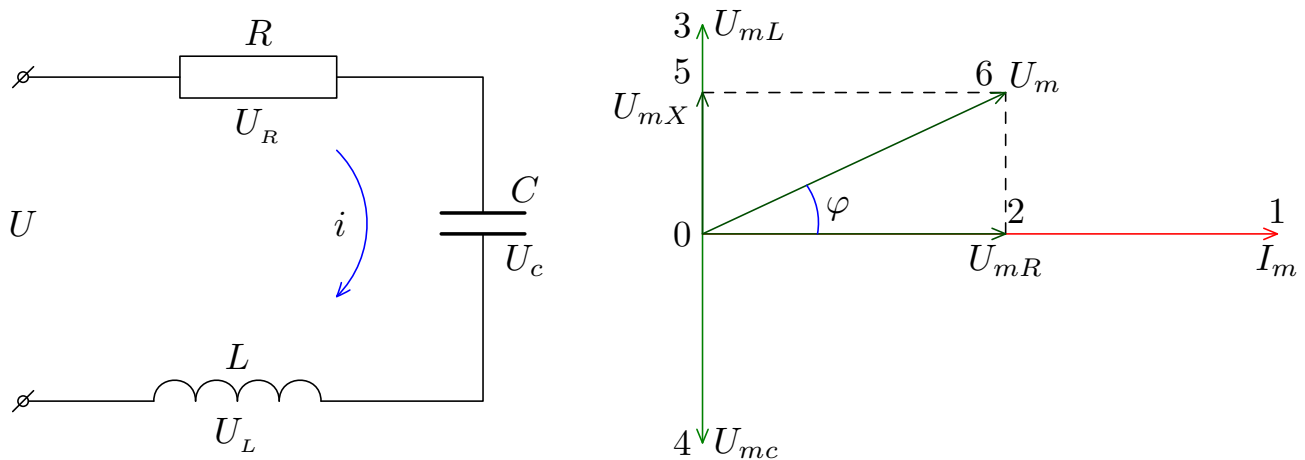


Рис. 3.5

В цепи, состоящей из последовательно соединённых  $R$ ,  $L$  и  $C$  через все элементы протекает один и тот же ток:

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

Падение напряжения на элементах цепи:

$$\begin{aligned} U_R &= U_{mR} \sin \omega t, & \text{где } U_{mR} &= I_m R; \\ U_C &= U_{mC} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), & \text{где } U_{mC} &= I_m X_C; \\ U_L &= U_{mL} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), & \text{где } U_{mL} &= I_m X_L. \end{aligned}$$

Приложенное мгновенное значение напряжения равно сумме мгновенных падений напряжения на отдельных элементах цепи:

$$U = U_R + U_C + U_L = U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Сложение этих гармонических напряжений произведено в векторной форме (рис. 3.5). Порядок построения векторной диаграммы обозначен цифрами.

$U_{mR}$  — активная составляющая напряжения.

$U_{mL} - U_{mC} = U_{mx}$  — реактивная составляющая напряжения.

Из векторной диаграммы следует, что

$$U_m^2 = U_{mR}^2 + U_{mx}^2 = U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2 = I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2,$$

откуда:

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I_m \cdot Z,$$

где

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

$Z$  — полное сопротивление цепи;

$R$  — активная составляющая сопротивления цепи;

$X$  — реактивная составляющая сопротивления цепи.

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

Условились индуктивное сопротивление считать положительным, а ёмкостное — отрицательным.

### 3. Краткая теория

Поэтому реактивное сопротивление цепи  $X$  в зависимости от знака может иметь либо индуктивный характер ( $X_L > X_c$ ), либо ёмкостный характер ( $X_L < X_c$ ).

Реактивные сопротивления  $X_L$ ,  $X_c$  и  $X$  зависят от частоты. Соответствующие графики приведены на рисунке 3.6.

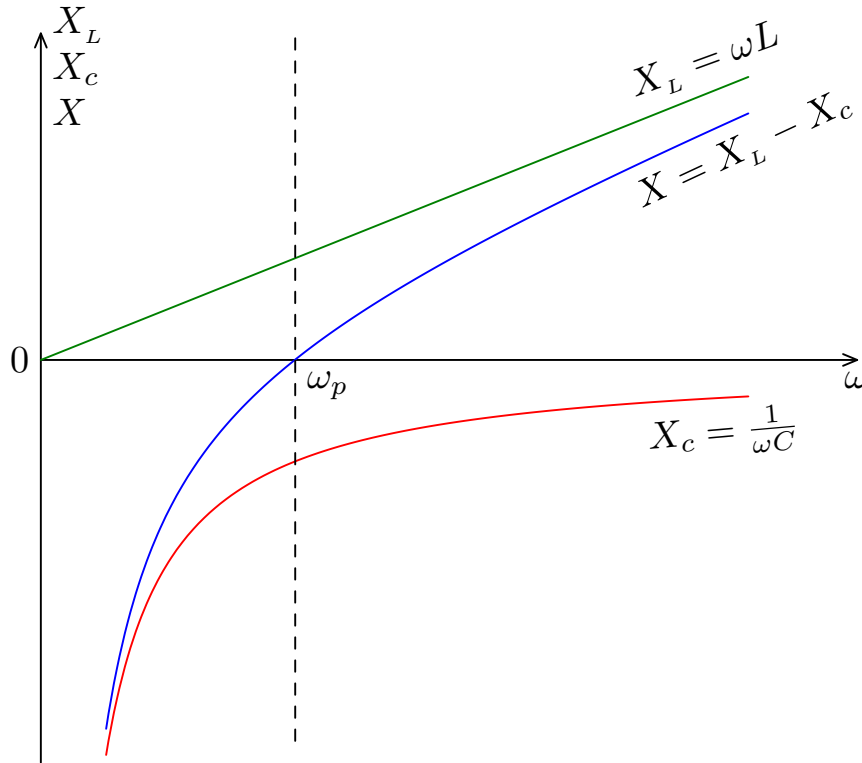


Рис. 3.6

В зависимости от знака реактивного сопротивления треугольники напряжений могут иметь вид:

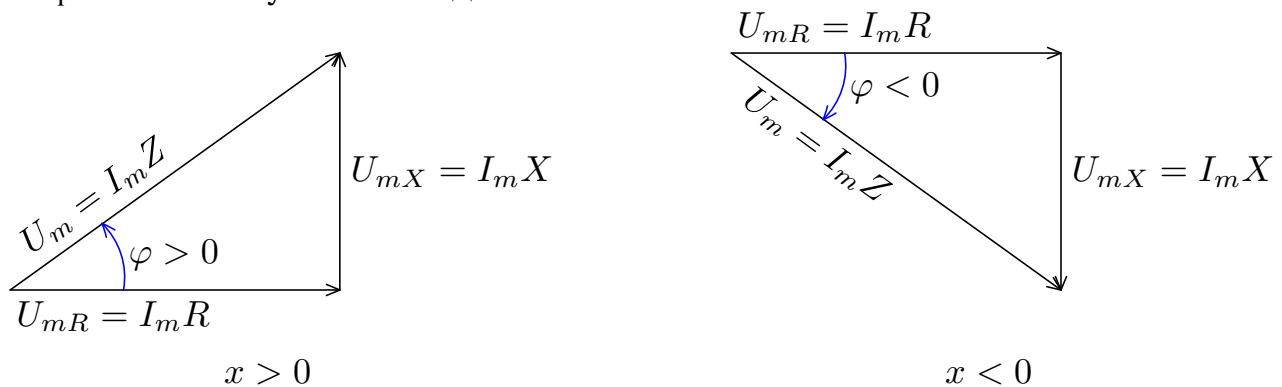


Рис. 3.7

Угол  $\varphi$  положителен при отстающем и отрицателен при опережающем токе.

Если все стороны треугольников напряжений (рис. 3.7) разделить на амплитуду тока, то получатся соответствующие треугольники сопротивлений (рис. 3.8).

Угол  $\varphi$  всегда отсчитывается от  $R$  к  $Z$ .

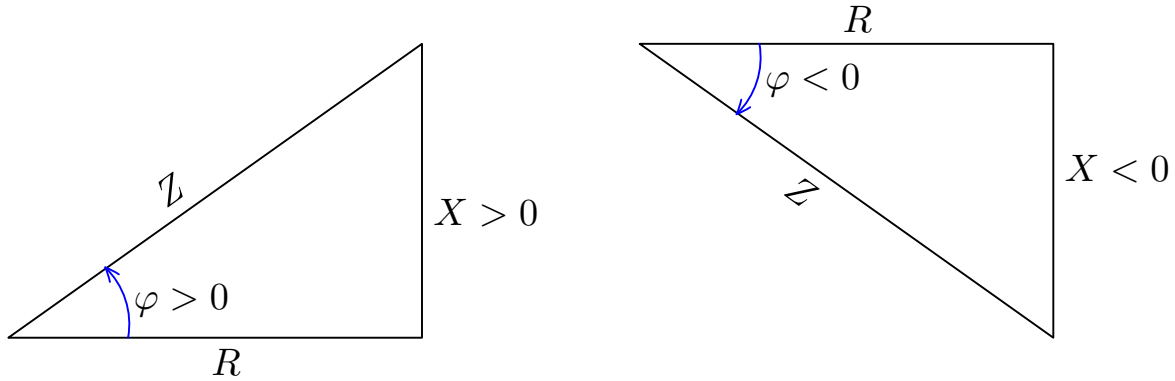


Рис. 3.8

Из треугольников сопротивлений (рис. 3.8) следует ряд важных соотношений:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad R = Z \cdot \cos \varphi; \quad X = Z \cdot \sin \varphi;$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

На частоте  $\omega = \omega_p$  полное реактивное сопротивление цепи становится равным нулю и цепь из  $R$ ,  $L$  и  $C$  ведёт себя как чисто активное сопротивление:

$$R = R_L + R_c + R_o,$$

- где  $R_L$  — активное сопротивление катушки индуктивности;  
 $R_c$  — активное сопротивление конденсатора;  
 $R_o$  — активное сопротивление внешнего резистора.

Состояние электрической цепи на частоте  $\omega_p$  носит название резонанса напряжений.

Работа в цепи переменного тока за время одного периода выражается формулой:

$$A = UIT \cdot \cos \varphi,$$

где  $U$  и  $I$  — действующие (эффективные) значения напряжения и тока.

Средняя за период мощность называется активной мощностью:

$$p = \frac{A}{T} = UI \cos \varphi = I^2 \cdot Z \cdot \cos \varphi = I^2 R.$$

### 3. Краткая теория

---

Она расходуется в активном сопротивлении цепи переменного тока.

Наряду с изложенным необходимо иметь в виду, что любая реальная катушка индуктивности как и любой реальный конденсатор при работе в цепи переменного тока имеют не только реактивные, но и активные сопротивления. На рисунке 3.9 показаны реальные катушка индуктивности и конденсатор и их эквивалентные схемы:

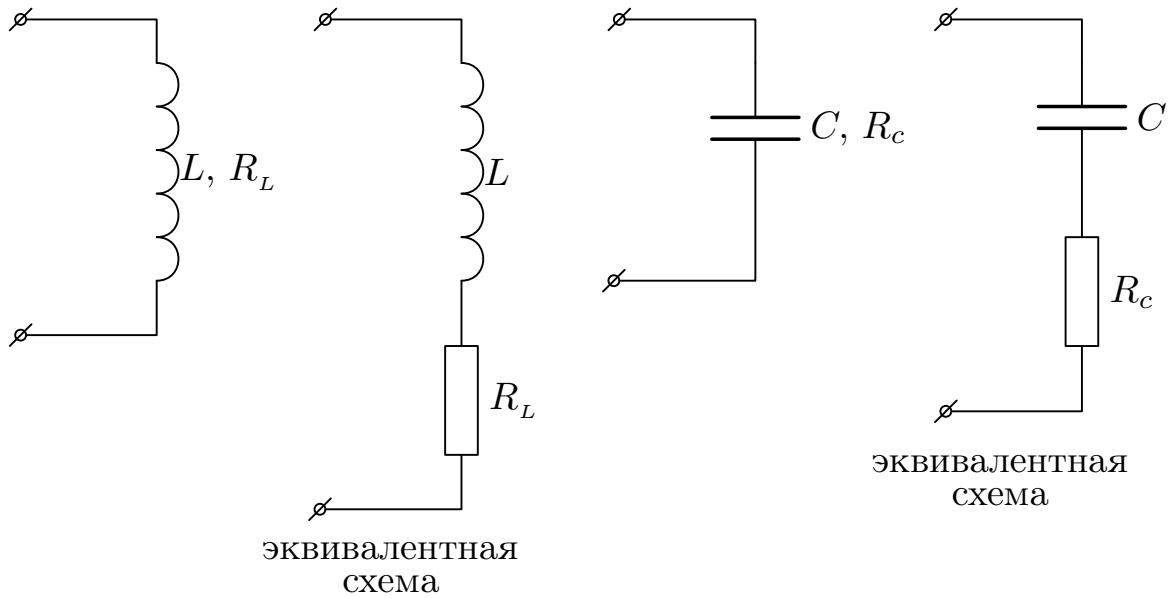


Рис. 3.9

## 4. Описание экспериментальной установки

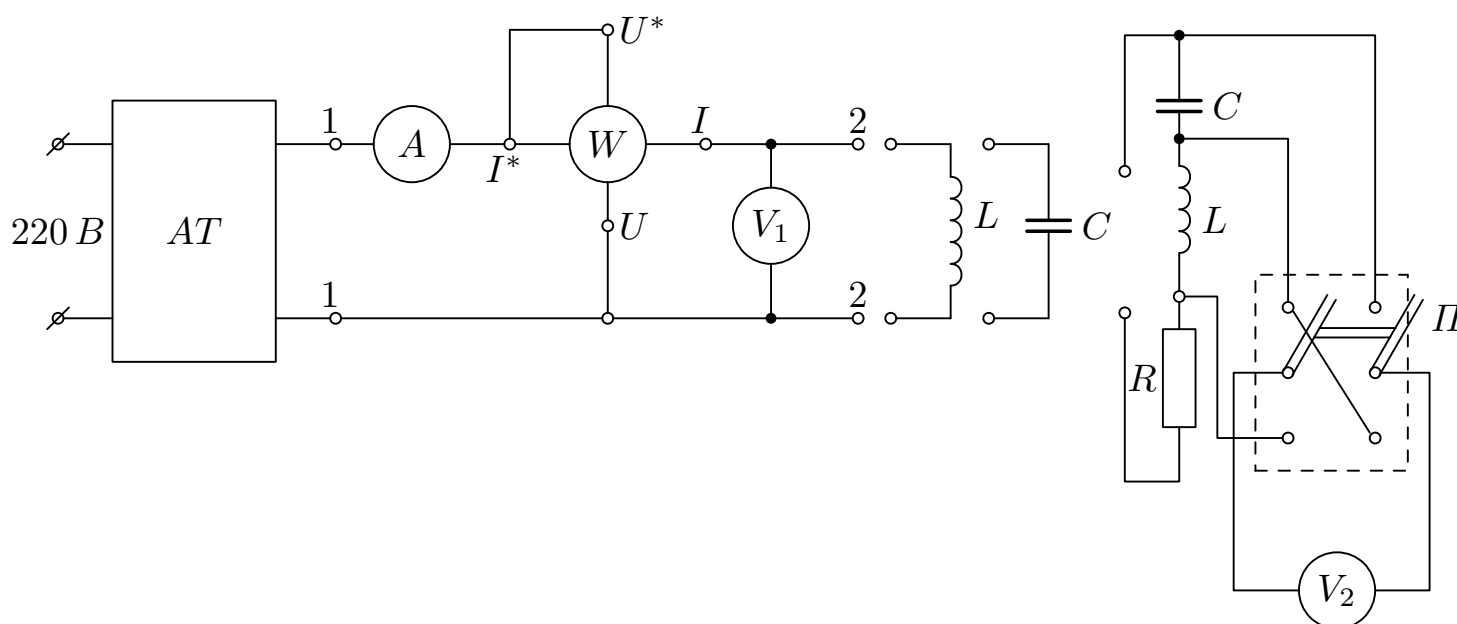


Рис. 4.1

Принципиальная схема экспериментальной установки (рис. 4.1) содержит следующие основные элементы:

1. Автотрансформатор (А.Т.), позволяющий в широких пределах изменять переменное напряжение на входных зажимах (1,1) исследуемой цепи.
2. Амперметр  $A$  на  $2,5\text{ A}$ .
3. Вольтметр  $V_1$  на  $150\text{ B}$ .
4. Ваттметр  $W$  на  $187,5\text{ Вт}$ , измеряющий активную мощность, расходуемую в исследуемой цепи переменного тока.
5. Катушка индуктивности  $L$ .
6. Конденсатор  $C$ .
7. Резистор  $R_o$ , электрическое сопротивление которого для постоянного тока равно  $20\text{ Ом}$ .

Питание экспериментальной установки осуществляется от сети переменного тока с напряжением  $220\text{ B}$  и частотой  $50\text{ Гц}$ . Мощность, потребляемая измерительными приборами, сравнительно невелика и ею мож-



но пренебречь при экспериментальном определении активной мощности, расходуемой в исследуемой цепи.

В ходе лабораторной работы исследуемые цепи переменного тока последовательно подключаются к зажимам (2,2) измерительной части экспериментальной установки и производятся обыкновенные (однократные) измерения соответствующих физических величин.

При исследовании электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых элементов  $L$ ,  $C$  и  $R_o$ , напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе измеряются с помощью лампового вольтметра  $V_2$  и двухполюсного переключателя  $P$ .

## 5. Задание и порядок выполнения

1. Собрать экспериментальную установку в соответствии с принципиальной схемой (рис. 4.1). Установить ручку регулировки выходного напряжения  $A. T.$  в крайнее положение, повернув её до упора против хода часовой стрелки ( $U = 0$ ). Получить разрешение на включение установки.
2. Технические данные используемых электроизмерительных приборов записать в таблицу:

Таблица 1

№ п/п	Наименование прибора и его назначение в схеме	Заводской номер прибора	Тип прибора и система И. М.	Класс точности	Пределы измерений и цена деления	Абсолютная погрешность	Сопротивление И. М. прибора
1							
2							
3							

3. Исследовать электрическую цепь переменного тока, состоящую из реальной катушки индуктивности для двух значений тока, соответствующих 55 и 60 делениям шкалы амперметра. Результаты прямых измерений тока, напряжения и активной мощности записать в общепринятой для обыкновенных измерений форме.

4. Исследовать электрическую цепь переменного тока, состоящую из реального конденсатора с электрической ёмкостью  $C_1 = 58 \mu F$  (значение ёмкости задаётся руководителем лабораторных занятий) для двух значений тока, соответствующих 55 и 60 делениям шкалы амперметра. Результаты прямых измерений тока, напряжения и активной мощности записать в общепринятой для обыкновенных измерений по форме.
5. Аналогично пункту 4 задания исследовать электрическую цепь переменного тока, состоящую из реального конденсатора с электрической ёмкостью  $C_2 = 24 \mu F$  (значение ёмкости задаётся руководителем лабораторных занятий).
6. Исследовать электрические цепи переменного тока, состоящие из последовательно соединённых катушки индуктивности, конденсатора и резистора для 3<sup>x</sup> случаев:  $L, C_1, R_o, L, C_2, R_o, L, C_3, R_o$ , ( $C_3 = 33 \text{ мкФ}$ ).

Во всех случаях установить одно и тоже значение силы тока в цепи, соответствующее 55 (или 62) делениям шкалы амперметра. Напряжения на катушке и конденсаторе  $U_{LR_L}$  и  $U_{CR_C}$  замерять с помощью лампового вольтметра. Результаты прямых измерений тока, напряжений и активной мощности записать в общепринятой для обыкновенных измерений форме.

7. Выключить экспериментальную установку и перейти к расчетной части исследования (экспериментальная установка не разбирается!).
8. Нарисовать эквивалентную схему реальной катушки индуктивности и, используя экспериментальные данные пункта 3 задания, рассчитать:  $Z_L, R_L$  и  $L$  для двух значений силы тока в цепи. Результаты косвенных измерений обработать дифференциальным методом и представить в общепринятой для обыкновенных измерений форме. Сделать вывод о линейности исследуемой электрической цепи. Построить векторную диаграмму для исследуемой цепи при силе тока, соответствующей 55 или 60 делениям шкалы амперметра в масштабе, и который разумно выбирается самим экспериментатором (студентом). Определить сдвиг фаз между напряжением и током в цепи.

9. Нарисовать эквивалентную схему реального конденсатора и, используя экспериментальные данные пункта 4 задания, рассчитать:  $Z_{C_1}$ ;  $R_{C_1}$  и  $C_1$  для двух значений силы тока в цепи. Остальная часть задания аналогична пункту 8.
10. Аналогично пункту 9 по экспериментальным данным пункта 5 произвести необходимые расчёты, построения и выводы для электрической цепи с конденсатором  $C_2$ .
11. Нарисовать эквивалентные схемы электрических цепей  $L$ ;  $C_1$ ;  $R_o$ ;  $L_1$ ;  $C_2$ ;  $R_o$  и  $L$ ,  $C_3$ ,  $R_o$ .  
По экспериментальным данным пункта 6 рассчитать активное сопротивление цепей  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  соответственно. Построить векторные диаграммы для указанных цепей при силе тока, выбранной в пункте 8 и в том же масштабе. Определить фазовые сдвиги между токами и напряжениями. Сопоставить полученные факты и сделать необходимые выводы по результатам исследования.
12. Рассчитать активное сопротивление  $R_o$  и сравнить его с сопротивлением этого же резистора на постоянном токе.
13. Результаты измерения  $L$ ,  $C_1$  и  $C_2$  представить руководителю занятий и с его разрешения разобрать экспериментальную установку.

## 6. Содержание отчёта

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Принципиальная схема экспериментальной установки.
3. Перечень используемых в работе измерительных приборов и их технические данные (таблица 1).
4. Эквивалентные схемы, расчеты параметров, векторные диаграммы, фазовые сдвиги между током и напряжением для каждой исследованной цепи переменного тока.
5. Краткие выводы с анализом полученных результатов.
6. Дата выполнения работы и подпись исполнителя.