

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ, РЕЗИСТОРА И КОНДЕНСАТОРА

**Цель работы:** определение параметров схемы замещения электромагнитного устройства постоянного тока; изучение резонанса напряжений при последовательном соединении  $r, L, C$ ; изучение методов построения векторных диаграмм напряжений и токов.

#### Краткие сведения из теории

Переменные токи и напряжения изменяются по синусоидальному закону

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

где  $I_m, U_m$  – амплитудные значения;

$\omega$  – угловая частота,  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота;

$\psi_i, \psi_u$  – значения начальной фазы.

Синусоидальные функции удобно представлять как проекции вращающегося вектора на вертикальную ось (рисунок 1).

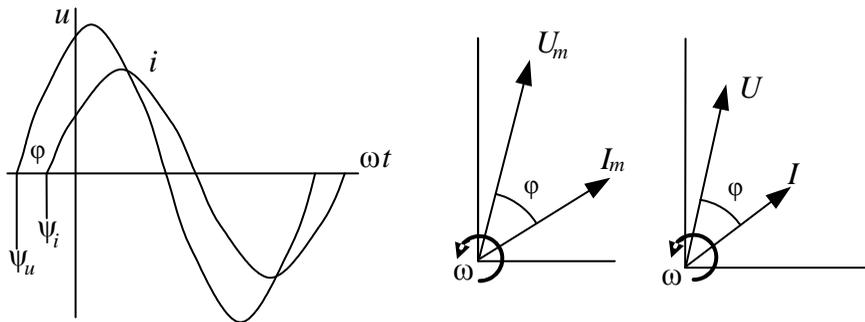


Рисунок 1 – Изображение переменных токов и напряжений вращающимися векторами

Здесь  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

В расчётах и на векторных диаграммах используют действующие значения переменного тока и напряжения, которые меньше амплитудных в  $\sqrt{2}$  раз

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}.$$

На векторной диаграмме токи и напряжения показывают в виде векторов, длина которых, в соответствующем масштабе, равна действующему значению, а направление соответствует начальной фазе.

В *резисторе* ток и напряжение совпадают по фазе. Их значения связаны законом Ома:

$$U_r = rI.$$

Мощность, потребляемая резистором,

$$P = rI^2.$$

Напряжение на идеальной катушке *индуктивности* пропорционально производной от тока

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где  $L$  – индуктивность.

Напряжение на идеальной катушке индуктивности опережает ток по фазе на  $90^\circ$  (электрических), т. е. на четверть периода. Соответственно ток через катушку отстает от напряжения. Значения напряжения и силы тока в катушке связаны через индуктивное сопротивление:  $x_L$ :

$$U_L = x_L I, \quad \text{где } x_L = \omega L = 2\pi f L.$$

Индуктивное сопротивление является реактивным, т. к. характеризует не потребление, а обмен энергией. Реактивная мощность  $Q_L$  обмена энергией между катушкой индуктивности и питающей цепью:

$$Q_L = x_L I^2 = \omega L I^2 = 2\pi f L I^2.$$

Напряжение на *конденсаторе* пропорционально интегралу от протекающего через него тока

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ),$$

где  $C$  – ёмкость.

Напряжение на идеальном конденсаторе отстает от тока по фазе на  $90^\circ$  (электрических). Соответственно ток через конденсатор опережает

приложенное напряжение. Значения напряжения и силы тока в конденсаторе связаны через емкостное сопротивление

$$U_C = x_C I, \text{ где } x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Емкостное сопротивление также является реактивным. Реактивная мощность обмена энергией между конденсатором и питающей цепью

$$Q_C = x_C I^2 = \frac{U^2}{x_C} = \omega C U^2 = 2\pi f C U^2.$$

При последовательном соединении элементов электрической цепи (рисунок 2) вектора напряжений отдельных элементов складываются. Так, при последовательном соединении резистора и катушки индуктивности получим прямоугольный треугольник напряжений.

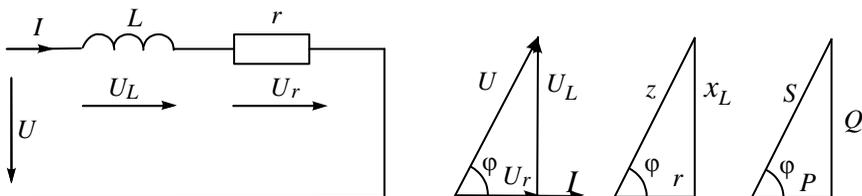


Рисунок 2 – Изображение переменных токов и напряжений

Треугольнику напряжений соответствует подобный треугольник сопротивлений, катетами которого являются активное и индуктивное сопротивления, а гипотенузой – полное сопротивление

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}; \quad \varphi = \arccos \frac{r}{z}.$$

Подобным является также треугольник мощностей, состоящий из активной  $P$ , индуктивной  $Q$  и полной  $S$  мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \varphi = \arccos \frac{P}{S}.$$

Электромагнитное устройство переменного тока характеризуется мощностью активной  $P$  или полной  $S$ , а также коэффициентом мощности  $\cos\varphi$ :

$$S = UI; \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Оно может быть представлено схемой замещения, содержащей последовательно соединённые идеальную катушку индуктивности  $L$  и резистор  $r$ . Для определения параметров схемы замещения электромагнитного устройства достаточно измерить напряжение  $U$ , силу тока  $I$  и активную мощность  $P$ :

$$z = \frac{U}{I}; r = \frac{P}{I^2}; x_L = \sqrt{z^2 - r^2}; L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f}.$$

Включим последовательно катушку индуктивности, резистор и конденсатор (рисунок 3). Напряжение  $U$  равно сумме напряжений  $U_L$ ,  $U_r$  и  $U_C$ , каждое из которых равно произведению силы тока на соответствующее сопротивление и направлено соответствующим образом, а именно: напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от тока на  $90^\circ$ , напряжение на резисторе совпадает по фазе с током, а напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на  $90^\circ$ .

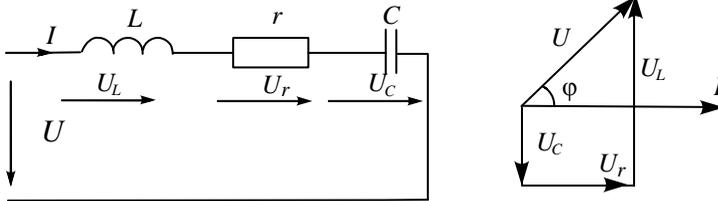


Рисунок 3 – Последовательное соединение  $L$ ,  $r$  и  $C$

Полное сопротивление цепи, содержащей последовательно соединённые катушку индуктивности, резистор и конденсатор,

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

Индуктивное сопротивление катушки и ёмкостное сопротивление конденсатора взаимно компенсируют друг друга. Если  $x_C = x_L$ , то полное сопротивление минимально и равно активному  $r$ , а сила тока  $I$  максимальна. Обмен энергией между катушкой индуктивности и конденсатором также достигает максимума, на этих элементах наблюдаются перенапряжения. Такой режим называют резонансом напряжений. При резонансе напряжений сверхтоки могут вызвать перегорание проводов или контактов, а

перенапряжения – пробой изоляции, поэтому в электроснабжении резонанс напряжений считается вредным. Однако он широко применяется в технике связи. В общем случае резонанс напряжений можно получить, изменяя значения индуктивности катушки, ёмкости конденсатора или частоты. В данной лабораторной работе резонанс получают путём подбора ёмкости конденсатора из условия

$$x_C = x_L; C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{2\pi f x_C}.$$

### Измерительные приборы и оборудование

Для измерения переменных токов и напряжений в лабораторном цикле применяются приборы электромагнитной системы. Они состоят из катушки и ферромагнитного сердечника. При подаче в катушку тока ферромагнитный сердечник намагничивается и, втягиваясь внутрь катушки, поворачивает ось с укрепленной на ней стрелкой. Спиральные пружинки (или растяжки) создают противодействующий момент. Угол поворота подвижной части будет тем больше, чем больше ток катушки. У амперметров в катушке мало витков толстого провода, у вольтметров – много витков тонкого провода. Приборы отличаются простотой устройства и малой чувствительностью к перегрузкам.

### Порядок выполнения работы

1 Собрать схему для определения параметров электромагнитного устройства по рисунку 4, используя переключики для коммутации (места установки переключиков выделены на схеме).

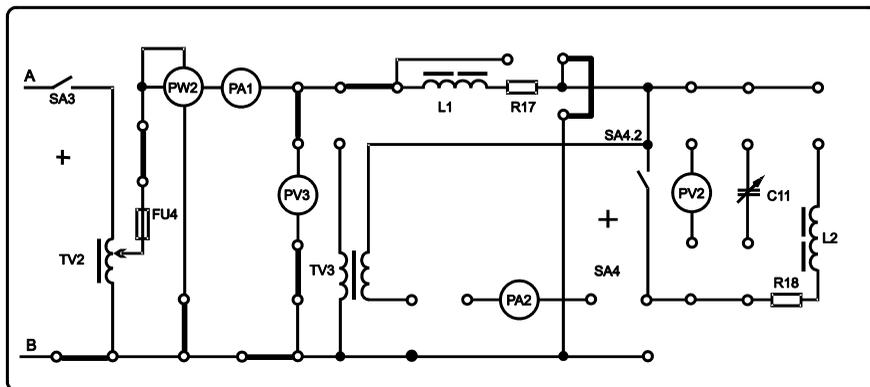


Рисунок 4 – Схема для определения параметров электромагнитного устройства

2 Тумблером SA3 подключить функциональный блок для определения параметров электромагнитного устройства. (*Примечание* – Тумблер SA4 должен находиться в выключенном положении). С помощью автотрансформатора TV2 установить номинальный ток  $I_n = 0,8$  А и измерить напряжение и мощность. Результаты измерений внести в таблицу 1.

Таблица 1 – Определение параметров схемы замещения электромагнитного устройства

Измерено			Рассчитано				
$I$ , А	$U$ , В	$P$ , Вт	$z$ , Ом	$r$ , Ом	$x_L$ , Ом	$L$ , Гн	$C_{рез}$ , мкФ

3 Рассчитать параметры схемы замещения электромагнитного устройства:  $L1$  и  $R17$ .

4 Рассчитать ёмкость конденсатора  $C11$ , необходимую для достижения резонанса напряжений ( $C_{рез}$ ).

5 Собрать схему для исследования резонанса напряжений (рисунок 5).

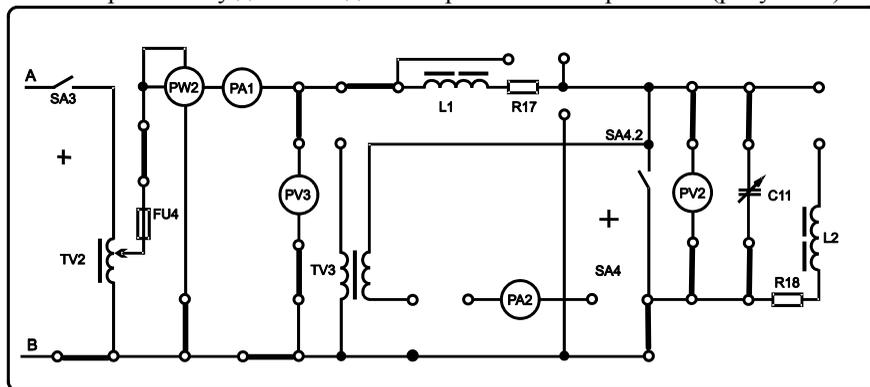


Рисунок 5 – Схема исследования резонанса напряжений

6 Установить напряжение, измеренное в п. 2. Устанавливая ёмкость конденсатора  $C11$  приблизительно равной  $0,5 C_{рез}$ ;  $0,75 C_{рез}$ ;  $C_{рез}$ ;  $1,5 C_{рез}$ ;  $2 C_{рез}$  снять показания измерительных приборов: входного напряжения, силы тока, мощности и напряжения на конденсаторе. Результаты измерений внести в таблицу 2.

7 Рассчитать значения полной мощности  $S$  и коэффициента мощности  $\cos\phi$ .

8 Рассчитать значения напряжений на резисторе и индуктивности.

9 Построить графики зависимости силы тока и коэффициента мощности от ёмкости конденсатора.

**Таблица 2 – Исследование режима резонанса напряжений**

C, мкФ	Измерено				Рассчитано				
	U, В	I, А	P, Вт	U <sub>C</sub> , В	S, ВА	cosφ	U <sub>r</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	

10 Построить векторную диаграмму токов и напряжений для первой, средней и последней строчек таблицы 2.

### Содержание отчета

Наименование и цель работы; схема исследования; таблицы результатов измерений и расчётов; расчет значений полной мощности  $S$  и коэффициента мощности  $\cos\phi$ , а также напряжений на резисторе и индуктивности; графики; векторные диаграммы; заключение.

### Контрольные вопросы

- 1 Как связаны между собой амплитудные и действующие значения переменных токов и напряжений?
- 2 Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления?
- 3 Чему равны индуктивная мощность катушки и емкостная мощность конденсатора?
- 4 Если вектор тока отложен горизонтально, как следует откладывать вектора:
  - напряжения на резисторе;
  - напряжения на идеальной катушке индуктивности;
  - напряжения на конденсаторе?
- 5 Охарактеризуйте треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей.
- 6 Как определить параметры последовательной схемы замещения электромагнитного устройства?
- 7 Как построить векторную диаграмму токов и напряжений при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора?
- 8 Сформулируйте условие резонанса. Как рассчитать резонансную ёмкость?
- 9 Почему в электроснабжении резонанс напряжений считается неприемлемым фактором?
- 10 Охарактеризуйте построенные графики.
- 11 Опишите устройство и принцип действия приборов электромагнитной системы.