

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет  
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка  
по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 04**

**ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК**

**(АКИП-4126/2А)**

**Работу поставил доц. Авксентьев Ю. И.**

**Москва - 2023**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

## 1. Квазистационарный ток

Если в замкнутой электрической цепи действует переменная во времени э.д.с., то в цепи возникает переменный электрический ток. Сила переменного тока может быть непостоянной в различных сечениях даже неразветвленного проводника. Это отступление от основного требования для цепи постоянного тока обусловлено конечной скоростью. Распространения электромагнитных возмущений в цепи, равной скорости света. Однако, если за время, необходимое для распространения поля в самую отдаленную точку цепи, сила тока в любом участке цепи изменяется незначительно, то мгновенные значения силы тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковыми. Токи удовлетворяющие такому условию называются квазистационарными. Условие квазистационарности цепи можно записать в виде  $l/c \ll T$ , где  $l$  длина цепи,  $c$  - скорость света,  $T$  - период изменения э.д.с. Ток промышленной частоты  $\nu = 50 \text{ Гц}$  / квазистационарен для цепей длиной 100 км. Очевидно, что квазистационарные токи в каждый данный момент времени подчиняются всем законам постоянного тока, в частности, законам Киргофа.

В дальнейшем мы будем рассматривать квазистационарные переменные токи, а также наиболее важный случай переменной э.д.с. , изменяющейся по гармоническому закону

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  - мгновенное значение э.д.с.;  $\mathcal{E}_m$  - амплитуда э.д.с. ;  $\omega = 2\pi\nu$ , круговая частота,  $\omega t$  – текущая фаза,  $t$  – время. В выражении (1) начало отсчета времени выбрано так, чтобы начальная фаза напряжения  $\varphi$  равнялась нулю.

### Явления в цепях переменного тока

Явления в цепях переменного тока оказываются более сложными, чем в цепях постоянного тока. Это связано с тем, что при включении в цепь переменного тока «энергоемких», то есть способных накапливать энергию, элементов в виде индуктивности  $L$  и емкости  $C$  изменения тока и напряжения в цепи всегда будет связано с изменением энергии, запасенной в системе. Так как изменение энергии не может происходить мгновенно, то в цепи переменного тока, содержащей  $L$  и  $C$ , будет наблюдаться запаздывание изменения тока или напряжения и возникнет сдвиг фаз между напряжением и током. Напомним, что величина емкости / емкости / вводится в электростатике как коэффициент пропорциональности между зарядом  $q$  и потенциалом  $U$  проводника.

$$q = C \cdot U, \quad (2)$$

а величина коэффициента самоиндукции / индуктивности / - в магнитостатике как коэффициент пропорциональности между магнитным

потоком  $\Phi$  через контур и током  $I$ , протекающим по этому контуру и создающим этот поток,

$$\Phi = L \cdot I \quad (3)$$

## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

### 1. Квазистационарный ток

Если в замкнутой электрической цепи действует переменная во времени э.д.с., то в цепи возникает переменный электрический ток. Сила переменного тока может быть непостоянной в различных сечениях даже неразветвленного проводника. Это отступление от основного требования для цепи постоянного тока обусловлено конечной скоростью. Распространения электромагнитных возмущений в цепи, равной скорости света. Однако, если за время, необходимое для распространения поля в самую отдаленную точку цепи, сила тока в любом участке цепи изменяется незначительно, то мгновенные значения силы тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковыми. Токи удовлетворяющие такому условию называются квазистационарными. Условие квазистационарности цепи можно записать в виде  $l/c \ll T$ , где  $l$  длина цепи,  $c$  - скорость света,  $T$  - период изменения э.д.с. Ток промышленной частоты  $\nu = 50 \text{ Гц}$  / квазистационарен для цепей длиной 100 км. Очевидно, что квазистационарные токи в каждый данный момент времени подчиняются всем законам постоянного тока, в частности, законам Киргофа.

В дальнейшем мы будем рассматривать квазистационарные переменные токи, а также наиболее важный случай переменной э.д.с. , изменяющейся по гармоническому закону

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  - мгновенное значение э.д.с.;  $\mathcal{E}_m$  - амплитуда э.д.с. ;  $\omega = 2\pi\nu$ , круговая частота,  $\omega t$  – текущая фаза,  $t$  – время. В выражении (1) начало отсчета времени выбрано так, чтобы начальная фаза напряжения  $\varphi$  равнялась нулю.

### Явления в цепях переменного тока

Явления в цепях переменного тока оказываются более сложными, чем в цепях постоянного тока. Это связано с тем, что при включении в цепь переменного тока «энергоемких», то есть способных накапливать энергию, элементов в виде индуктивности  $L$  и электроемкости  $C$  изменения тока и напряжения в цепи всегда будет связано с изменением энергии, запасенной в системе. Так как изменение энергии не может происходить мгновенно, то в цепи переменного тока, содержащей  $L$  и  $C$ , будет наблюдаться запаздывание изменения тока или напряжения и возникнет сдвиг фаз между напряжением и током. Напомним, что величина электроемкости / емкости / вводится в

электростатике как коэффициент пропорциональности между зарядом  $q$  и потенциалом  $U$  проводника.

$$q = C \cdot U, \quad (2)$$

а величина коэффициента самоиндукции / индуктивности / - в магнитостатике как коэффициент пропорциональности между магнитным потоком  $\Phi$  через контур и током  $I$ , протекающим по этому контуру и создающим этот поток,

$$\Phi = L \cdot I \quad (3)$$

Соотношение (2) используется для введения единицы емкости. Если  $q = 1$  и  $U = 1$ , то  $C = 1$ . В системе **СИ** единица заряда – кулон (**Кл**), единица потенциала – вольт (**В**). Тогда единица емкости будет равна **1 Кл/В**. Эта единица емкости называется фарадой (**Ф**). Фарада есть емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при сообщении ему заряда 1 кулон. Единица емкости фарада очень велика. Поэтому на практике обычно употребляется единица, меньшая фарады в миллион раз, или микрофарада (**мкФ**), и единица, в миллион раз меньшая микрофарады, или пикофарада (**пФ**).

Для введения единицы индуктивности используется соотношение (3). В системе **СИ** за единицу индуктивности принимается индуктивность такого контура, с которым при силе постоянного тока в один ампер сцепляется магнитный поток в один вебер. Эта единица индуктивности называется генри (**Г**). На практике часто используют единицы, меньшие генри в тысячу раз – миллигенри (**мГ**).

Рассмотрим вначале включение в цепь переменного тока каждого из элементов **R**, **L** и **C** по отдельности.

### а. Цепь с активным сопротивлением.

Пусть к зажимам сопротивления (рис. 1а), не обладающего индуктивностью и емкостью /такое сопротивление называется активным/, приложено напряжение, изменяющееся по закону (1)  $\varepsilon = \varepsilon_m \cos(\omega t)$ .

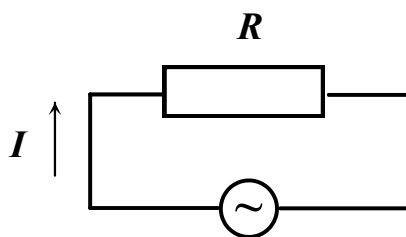


Рис. 1 а

При выполнении условий квазистациональности мгновенное тока через активное сопротивление будет определяться законом Ома для цепи постоянного тока

$$I = U / R = I_m \cos \omega t, \quad (4)$$

$$\text{где } I_m = U_m / R . \quad (5)$$

На рис. 1б показана зависимость мгновенных значений напряжения и тока, определяемых равенствами (1) и (4) от времени. Из рисунка видно, что в случае включения в цепь переменного тока активного сопротивления напряжение и ток изменяются синфазно.

Для цепи с активным сопротивлением векторная диаграмма представлена на рис. 1в.

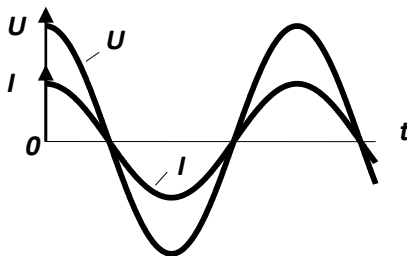


Рис. 1б

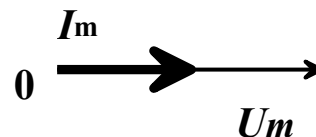


Рис.1в

При анализе колебательных процессов решение многих вопросов значительно облегчается и становится особенно наглядным, если изображать колебания графически в виде векторов на плоскости.

Полученная таким образом схема называется векторной диаграммой.

Векторная диаграмма для колебательных процессов строится следующим образом.

Пусть мы имеем колебательный процесс, описываемый соотношением

$$X = X_m \cos (\omega t + \varphi) . \quad (6)$$

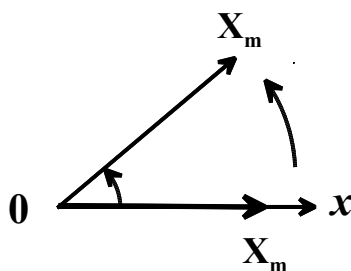


Рис. 2

На оси  $x$  из некоторой точки  $0$  отложим вектор длины  $X_m$ , образующий с осью угол  $\varphi$  (рис. 2). Если привести этот вектор во вращение против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ , то проекция конца вектора на ось  $x$  будет изменяться в точном соответствии с соотношением (6)

Из сказанного следует, что гармоническое колебание может быть задано с помощью вектора, длина которого равна амплитуде колебаний, а направление вектора образует с выбранной осью угол, равный начальной фазе колебаний.

На векторной диаграмме можно одновременно изображать несколько колебательных процессов. Если частоты этих колебаний одинаковы, то взаимное расположение векторов отдельных колебаний со временем изменяться не будет. Углы же между этими векторами будут равны сдвигу фаз между отдельными колебаниями.

Рассмотрим построение векторной диаграммы для цепи из активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$ . Отложим на горизонтальной оси вектор, длина которого равна амплитудному значению тока  $I_m$ . Поскольку напряжение и ток в рассматриваемом случае изменяются синфазно, вектор напряжения, длина которого равна амплитудному значению напряжения, будет также направлен вдоль этой же оси. Векторная диаграмма для цепи с активным сопротивлением представлена на рис. 1в.

### б) Цепь с индуктивным сопротивлением.

Подадим переменное напряжение (1) на катушку индуктивности с пренебрежимо малыми сопротивлением и емкостью, как показано на рис. 3а.

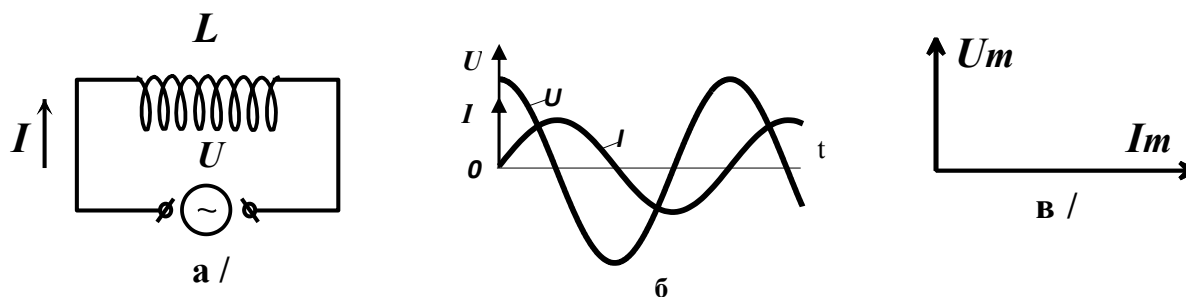


Рис. 3

В катушке индуктивности потечет переменный ток, вследствие чего возникнет э.д.с. самоиндукции.

$$\mathcal{E}_{\text{инд.}} = -L \left( \frac{dI}{dt} \right).$$

Так как активное сопротивление рассматриваемой цепи равно нулю, то по закону Ома для неоднородного (то есть содержащего э.д.с.) участка цепи

$$U + \mathcal{E}_{\text{инд.}} = 0$$

или

$$U_m \cos \omega t - L \left( \frac{dI}{dt} \right) = 0. \quad (7)$$

Из (7) находим

$$dI = \left( U_m / L \right) \cos \omega t \cdot dt. \quad (8)$$

Интегрируя (8), получаем

$$I = (U_m / \omega L) \sin \omega t + const. \quad (9)$$

Так как в рассматриваемом случае постоянная составляющая тока отсутствует, то  $const = 0$  и из (9) получаем окончательно

$$I = I_m \cos (\omega t - \pi/2), \quad (10)$$

где

$$I_m = U_m / \omega L. \quad (11)$$

Сопоставляя соотношения (11) и (5), видим, что роль сопротивления в данном случае играет величина

$$X_L = \omega L, \quad (12)$$

которую называют реактивным индуктивным сопротивлением или просто индуктивным сопротивлением. Как видно из (12), величина индуктивного сопротивления растет с увеличением частоты. Для постоянного тока ( $\omega = 0$ ) реактивное сопротивление катушки индуктивности равно нулю.

Следует подчеркнуть, что индуктивное сопротивление в соответствии с соотношением (11) связывает между собой только амплитудные значения тока и напряжения.

На рис. 3б показана зависимость мгновенных значений напряжения и тока в цепи, содержащей индуктивность, от времени. Из рисунка и из сравнения соотношений (1) и (10) видно, что ток, текущий через индуктивность, отстает по фазе от напряжения на индуктивности на  $\pi/2$ . Так как на векторной диаграмме изменение во времени представляется вращением вектора против движения часовой стрелки, то отставание тока от напряжения на  $\pi/2$  соответствует повороту вектора тока от вектора напряжения на угол  $\pi/2$  по часовой стрелке. Если вектор тока направить горизонтально, то векторная диаграмма цепи, содержащей индуктивность, примет вид, представленный на рис. 3в.

### в) Цепь с емкостным сопротивлением.

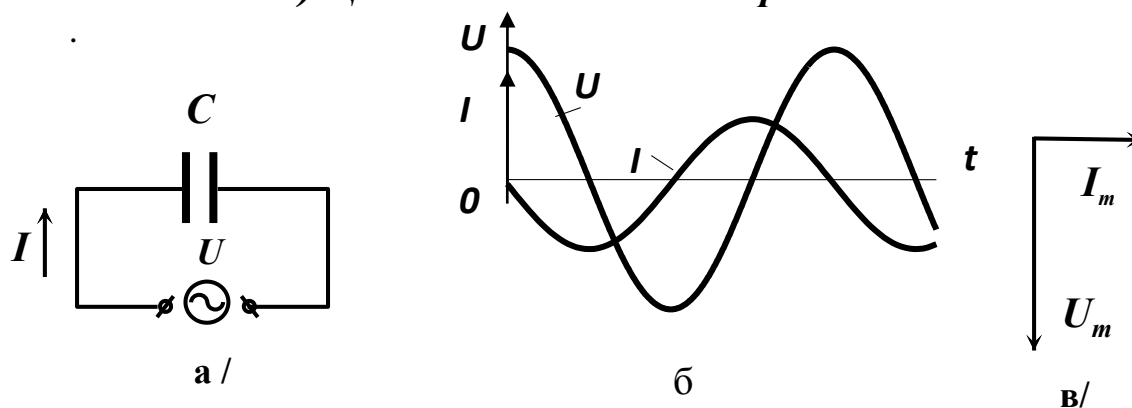


Рис. 4



Индуктивностью цепи и сопротивлением подводящих проводов будем пренебрегать. В этом случае напряжение на конденсаторе можно считать равным приложенному напряжению  $U$

$$U_C = U_m \cos \omega t .$$

Заряд на обкладках конденсатора будет тогда изменяться по закону

$$q = CU_C = CU_m \cos \omega t . \quad (13)$$

Но ток в цепи  $I = dq / dt$  . Поэтому, дифференцируя (13), находим

$$I = - \omega CU_m \sin \omega t = \omega C U_m \cos(\omega t + \pi/2) , \quad (14)$$

где

$$I_m = \omega CU_m = U_m / ( 1/\omega C ) . \quad (15)$$

Сопоставляя соотношения (15) и (5), видим, что роль сопротивления в данном случае играет величина

$$X_C = 1 / \omega C , \quad (16)$$

называемая реактивным емкостным сопротивлением, или просто емкостным сопротивлением. Как видно из (16), для постоянного тока реактивное сопротивление конденсатора равно бесконечности. Для переменного тока сопротивление конденсатора тем меньше, чем больше частота и емкость.

На рис. 4б показана зависимость мгновенных значений напряжения и тока в цепи, содержащей емкость. Из рисунка и из сравнения соотношений (1) и (14) видно, что ток, текущий через емкость, опережает по фазе напряжение на емкости на  $\pi / 2$  . Если вектор тока направить горизонтально, то векторная диаграмма цепи, содержащей емкость, примет вид, показанный на рис. 4в.

Физическая причина возникновения сдвига фаз между током и напряжением в цепях переменного тока, содержащих емкость или индуктивность, заключается в том, что энергия, запасенная в емкости или индуктивности, не может изменяться мгновенно (иначе потребовалось бы бесконечно большое значение мгновенной мощности). Энергия, запасенная в индуктивности,  $W_L = \frac{1}{2} LI^2$  . Поэтому ток, протекающий через индуктивность и определяющий величину запасенной энергии, будет отставать от напряжения.

Энергия, запасенная в емкости,  $W_C = \frac{1}{2} CU^2$ . Поэтому напряжение на емкости, определяющее величину запасенной энергии, будет отставать от тока, протекающего через емкость.

### **г) Цепь, составленная из последовательно соединенных элементов $R$ , $L$ и $C$**

Подадим переменное напряжение (1) на цепь из  $R$ ,  $L$  и  $C$  как показано на рис. 5, а.

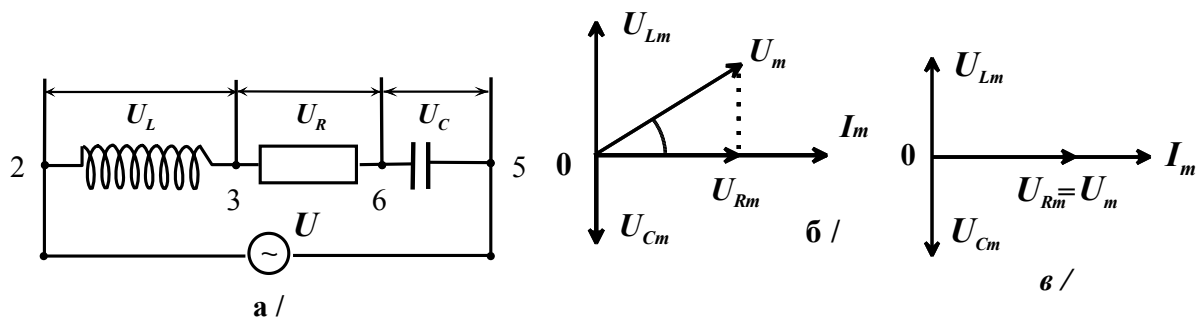


Рис. 5

В этом случае через все три элемента протекает одинаковый ток. Направим вектор тока горизонтально, как показано на рис. 5,б, и отложим вдоль этой оси вектор, длина которого равна амплитудному значению тока в цепи -  $I_m$ .

Падение напряжения на активном сопротивлении  $U_R$  по фазе совпадает с током, и поэтому вектор напряжения на  $R$ , равный по величине  $U_{Rm} = I_m R$ , следует отложить вдоль вектора тока.

Падение напряжения на индуктивности  $U_L$  опережает ток по фазе на  $\pi/2$  и поэтому вектор напряжения на  $L$ , равный по величине  $U_L = X_L I_m = I_m \omega L$ , должен быть повернут относительно вектора тока на угол  $\pi/2$  против часовой стрелки.

Падение напряжения на емкости  $U_C$  отстает от тока по фазе на  $\pi/2$ , и поэтому вектор напряжения на  $C$ , равный по величине  $U_{Cm} = I_m X_C = I_m / \omega C$ , следует повернуть относительно вектора тока на угол  $\pi/2$  по часовой стрелке. Падения напряжений  $U_R$ ,  $U_L$  и  $U_C$  в сумме должны быть равны приложенному напряжению  $U$ . Поэтому, сложив векторы  $U_{Rm}$ ,  $U_{Lm}$  и  $U_{Cm}$  получим вектор  $U_m$ , величина которого равна амплитуде напряжения на зажимах цепи. Векторная диаграмма цепи, состоящей из последовательно соединенных  $R$ ,  $L$  и  $C$ , тогда примет окончательный вид, показанный на рис. 5б.

Вектор  $U_m$  образует с вектором тока угол  $\varphi$ , представляющий разность фаз между напряжением  $U$  и силой тока  $I$ . Из рис. 5б видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1 / \omega C) / R. \quad (17)$$

Из прямоугольного треугольника, гипотенуза которого равна  $U_m$ , следует, что

$$U_m^2 = (I_m R)^2 + [I_m (\omega L - 1 / \omega C)]^2, \quad (18)$$

откуда

$$I_m = U_m / [R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2]^{1/2}. \quad (19)$$

Формулу (19) иногда называют законом Ома для цепи переменного тока. Следует, однако, помнить, что эта формула справедлива только для цепи, состоящей из последовательно соединенных  $R$ ,  $L$  и  $C$ .

Соотношение (19) справедливо только для амплитуд тока и напряжения. Мгновенные же значения напряжения и тока будут определяться соотношениями

$$\begin{aligned}U &= U_m \cos \omega t, \\I &= I_m \cos (\omega t - \varphi).\end{aligned}\tag{20}$$

Величина  $Z = [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}$  называется полным сопротивлением цепи, состоящей из последовательно соединенных  $R$ ,  $L$  и  $C$ . Величина  $X = \omega L - 1/\omega C$  называется реактивным сопротивлением такой цепи.

Сдвиг фаз между током и напряжением зависит от соотношения между индуктивным сопротивлением  $X_L$  и емкостным сопротивлением  $X_C$  цепи. Если  $\omega L > 1/\omega C$  (преобладает индуктивное сопротивление), то ток по фазе отстает от напряжения. Если  $1/\omega C > \omega L$  (преобладает емкостное сопротивление), то ток опережает напряжение. При  $\omega L = 1/\omega C$  ток и напряжение изменяются синфазно. При удовлетворяющей этому условию частоте  $\omega_{рез} = 1 / (LC)^{1/2}$ , называемой резонансной частотой, полное сопротивление цепи минимально и равно  $R$ . При этом падение напряжения на активном сопротивлении равно приложенному напряжению  $U$ . Падения напряжений на индуктивности  $U_L$  и емкости  $U_C$  равны по амплитуде и противоположны по фазе. При условии, что  $\omega L = 1/\omega C \gg R$ , амплитуда напряжений на индуктивности и емкости оказывается много больше амплитуды приложенного напряжения и поэтому описанное явление называется резонансом напряжений. Векторная диаграмма рассматриваемой цепи при резонансе напряжений принимает вид, показанный на рис. 5в.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Цель работы:** Изучение прохождения переменного тока по цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивность и емкость.

### ***Описание приборов и подготовка их к измерениям.***

В состав установки входят следующие приборы: плата с размещенными на ней элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$ , генератор  $\Gamma 3-118$ , вольтметр  $B 7-38$ , цифровой осциллограф  $АКИП-4119/3$  или  $АКИП-4126/2А$ .

#### **а) Плата установки.**

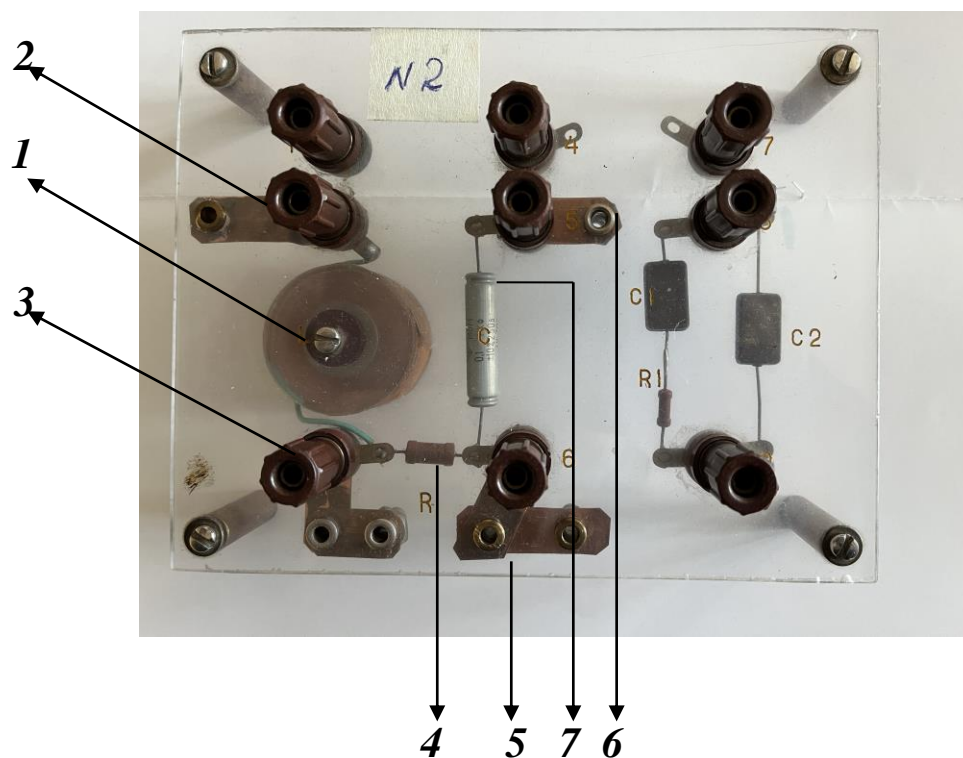


Рис. 6

Общий вид платы - рис. 6.

Цифрами отмечены –

- 1) 1-катушка индуктивности  $L$ ,
- 2) 2-3-5-6 - гнезда для штеккеров, для подключения к элементам  $R, L, C$ ,
- 3) 4 - активное сопротивление  $R$ ,
- 4) 7- конденсатор  $C$ .

На рис. 7 приведена схема соединений на плате элементов  $R, L$  и  $C$ .

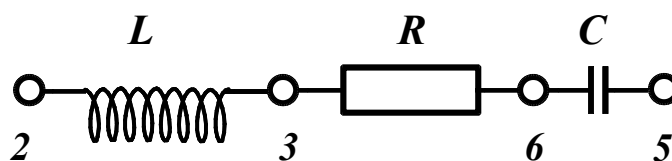


Рис. 7

### б) Генератор ГЗ –118.

Генератор ГЗ – 118 - рис. 8.

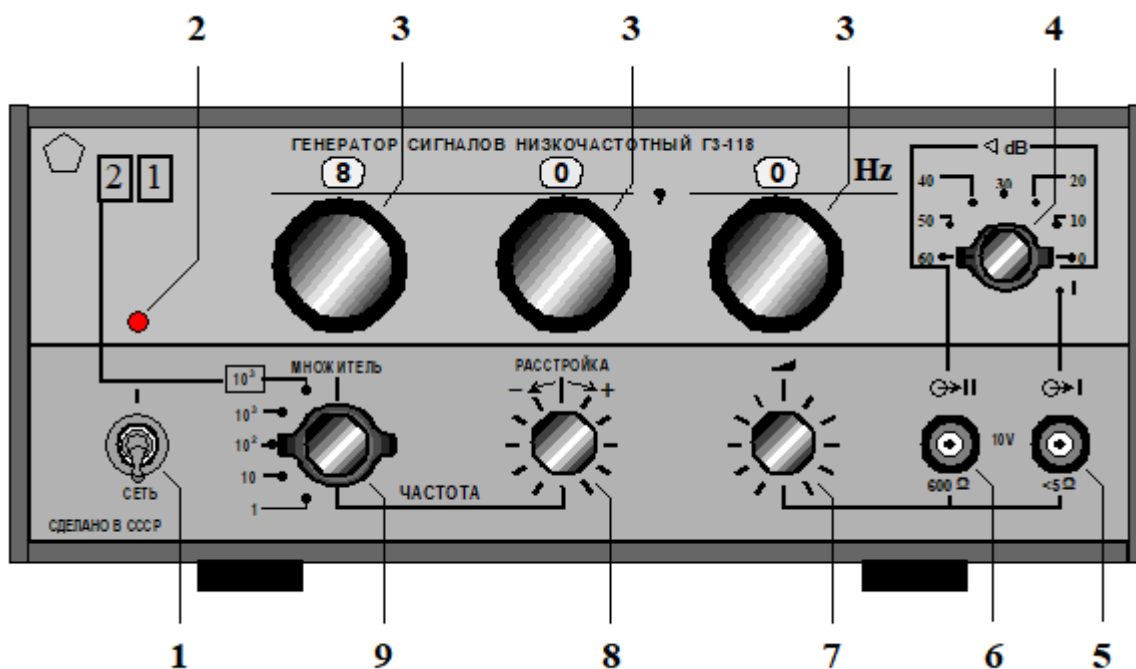


Рис. 8

### Подготовка генератора к работе

1. Убедитесь, что выходной кабель подключен к гнезду (6)-выход **600 Ω**. Другой конец кабеля заканчивается двумя штеккерами на проводах разной длины. Длинный провод соединен с корпусом прибора и, таким образом, с общей точкой схемы генератора. Часто корпус прибора соединяют с землей. Поэтому длинный провод на другом конце кабеля называют «**Общим**» или «**Земля**» - (символ  $\perp$ ). Переменное напряжение от генератора на плату рис.6 поступает по короткому проводу.
2. Переключатель поддиапазонов частот (9) установите в положение **10<sup>2</sup>**.
3. Переключатели установки частоты (3) установите в положение **60,0 Hz**.
4. Переключатель ступенчатого ослабления выходного напряжения (4) установите в положение **0**.
5. Ручку плавной расстройки частоты (8) установите в нейтральное положение.
6. Ручку плавной регулировки выходного напряжения (7) поверните до упора против часовой стрелки – напряжение на выходе минимальное.

### в) Вольтметр В7-38

Вольтметр В7-38 - рис. 9.



Рис. 9

Как видно из рисунка на передней панели вольтметра отсутствует тумблер для включения его в сеть. Напряжение сети подается на вольтметр сразу после подключения его кабеля питания к розетке  $\sim 220\text{ В}$ .

Слева от экрана находятся две клеммы для подключения вольтметра к измеряемому напряжению.

Справа – три кнопки для выбора режима измерения.

## г) Цифровые осциллографы

### Краткое описание работы цифровых осциллографов

Цифровой осциллограф можно рассматривать как конструктивное объединение аналогового осциллографа и электронно-вычислительной машины. С его помощью можно не только отображать характеристику напряжения в реальном времени, но и выполнять различные математические операции: складывать и вычитать сигналы в разных каналах, растягивать во времени фрагменты записанного в память сигнала и т.д.

Поступающий на осциллограф входной сигнал  $S(t)$  проходит через масштабирующее устройство (усилитель и делитель напряжения) и попадает в **аналого-цифровой преобразователь - АЦП**. Задача этого звена - заменить полученную аналоговую зависимость дискретной последовательностью его значений для разных моментов времени - **выборками**. Каждая выборка записывается в **оперативное запоминающее устройство - ОЗУ**, при этом, все предыдущие записанные отсчеты сдвигаются на одну ячейку - **регистр сдвига**, а самый первый  $S1$  исчезает, как бы "**выталкивается**". Если **ОЗУ** состоит из  $M$

ячеек, то в нем, постоянно обновляясь, содержится  $M$  последних, "**свежих**" **выборок**. Так продолжается до тех пор, пока не будет выполнено некое заданное условие, например, когда какое-либо  $S(t_i)$  в очередной **выборке** впервые не превысит заданный оператором уровень. После этого, содержимое некоторого количества ячеек **ОЗУ** переписывается в **запоминающее** устройство, где каждой ячейке соответствует точка на экране, отличающаяся от фона. Координата  $X$  определяется номером ячейки, а координата  $Y$  значением **выборки**, которое находится в этой ячейке.

В отличие от аналоговых осциллографов, цифровые осциллографы позволяют запоминать в оперативном запоминающем устройстве много выборок, а потом "**вытягивать**" их порциями, соответствующими ширине экрана.

Также еще одно принципиальное отличие от аналоговых осциллографов состоит в том, что на цифровом осциллографе можно видеть предысторию сигнала до появления импульса запуска. Это называют "**предварительным запуском**". Выборки переписываются из оперативного запоминающего устройства в запоминающее устройство так, что в момент появления импульса запуска первой ячейкой запоминающего устройства будет та, что дает точку на вертикальной линии, проходящей через центр экрана. Последующие точки располагаются вправо от нее, предыдущие - налево. Положение первой ячейки можно смещать влево или вправо от центра и тем самым соответственно уменьшать или увеличивать видимый интервал предыстории.

Частоту **дискретизации** (частоту "**выборок**") можно изменять в широких пределах, что соответствует изменению масштаба по горизонтали и аналогично изменению скорости развертки в аналоговых осциллографах.

Для изменения масштаба по вертикали, как и в аналоговых осциллографах, можно изменять коэффициенты усиления или деления соответственно входного усилителя или делителя напряжения.

Благодаря перечисленным преимуществам цифровые осциллографы почти вытеснили аналоговые осциллографы.

## **1. АКИП-4126/2А.**

### **Подготовка осциллографа к работе**

1. Нажатием на кнопку (1) подключите осциллограф (Рис. 10) сети и подождите появления на экране заставки. В течение 10 секунд осциллограф автоматически перейдет в режим отображения осциллограмм. До подачи сигналов на экране отображаются линии развертки.



Рис. 10

2. Если по какой-либо причине 1-й и 2-й каналы осциллографа оказались выключенными, включите их однократным нажатием на кнопки (2,3). Сигнал, поступающий по **КАН 1**, отображается на экране желтым цветом, по **КАН 2** - фиолетовым.

3. Нажмите на кнопку (4) для вызова на экран всплывающих меню синхронизации.

Сверху над кнопками (5) на экране появляются всплывающие меню. Обзор меню и выбор осуществляется поочередным нажатием на кнопки. Двигаясь слева направо, установите следующий режим синхронизации:

- а) **«фронт»** - синхронизация по фронту сигнала,
- б) **«Источник «КАН. 1»** - источник синхронизации **КАН. 1**,
- в) **«наклон  $\mathcal{F}$ »** - синхронизация по переднему фронту сигнала,
- г) **«удержание «ВЫКЛ.»**,
- д) **«Связь Вк». АС** – вход закрыт для постоянной составляющей сигнала,
- е) **«Фильтр шума» - Вкл.**

Повторным нажатием на кнопку (4) уберите выпадающее меню.



4. Нажмите на кнопку (6) – «**Дисплей**» для вызова на экран всплывающих меню управления режимами экрана, размещенных на двух страницах – первая – **Стр 1/2**, вторая- **Стр 2/2**.  
На первой странице. Двигаясь слева направо поочередным нажатием на кнопки установите следующий режим работы дисплея:

а) - « **Тип Вектор** » -определяет характер отображения сигнала на экране,

б) - « **Цвет Выкл.** »,

в) - « **Послесвечение – Выкл.** »,

На второй странице. В том же порядке установите:

г) – « **Сетка**  » - выбор типа экранной сетки,

д) – «**80%**» - яркость луча (вращением регулятора (7),

е) – «**100%**» - яркость сетки ( тем же регулятором (7),

ж) – « **Прозрачность 50%** »

**В процессе работы могут понадобиться следующие регулировки:**

5. « ***B-mB*** » - изменение коэффициента отклонения каналов по вертикали. Регулировка осуществляется вращением кнопок-регуляторов (8), которые работают в двух режимах - «***грубо***», «***плавно***». Смена режима происходит при нажатии на регулятор.

6. «***Смещение***» - кнопка-регулятор смещения линии развертки выбранного канала в вертикальном направлении (9). Нажатие на регулятор устанавливает линию развертки в центр экрана.

7. «***Смещение***» - кнопка-регулятор смещения линий развертки в горизонтальном направлении (10). Нажатие на регулятор устанавливает линии развертки в центр экрана.

8. « ***нс ↔ с*** » - кнопка-регулятор установки времени развертки (11). Вращение регулятора изменяет значение коэффициента развертки. Возврат к первоначальному значению производится нажатием на кнопку-регулятор.

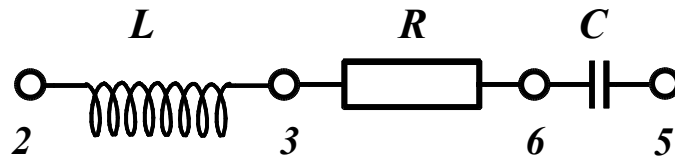
9. «***USB***» - разъем (12) для подключения внешнего ***USB*** носителя для записи результатов измерений.

## Порядок выполнения работы

### У п р а ж н е н и е 1

#### Измерение активных сопротивлений $R$ и $R_L$

1. Подключите вольтметр к сети  $\sim 220\text{ В}$ .
2. Выберите режим измерения сопротивления – нажмите на кнопку  $\kappa\Omega$ .



3. Поочередно подключая входные провода вольтметра к гнездам (2,3) и (3,6) на плате, измерьте активное сопротивление катушки индуктивности  $R_L$  и  $R$ . Результат измерений запишите.

### У п р а ж н е н и е 2

#### Наблюдение и измерение сдвига фаз между током и напряжением в цепях с элементами $L$ и $C$ .

##### *а) Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с индуктивностью*

1. Подключите генератор к плате – длинный конец кабеля к клемме (6), короткий к клемме (2).
2. Тумблером (1) подключите генератор к сети  $\sim 220\text{ В}$ . После включения загорится контрольная лампа (2).
3. Кнопкой (1) установите вольтметр в режим измерения переменного напряжения -  $V\sim$ . Подключите вольтметр к тем же гнездам (2), (6) – провод «Общий» к гнезду (6).
4. Регулятором (7) генератора, установите в цепи напряжение  $\sim 6\text{ В}$ .
5. Подключите 1-й канал осциллографа к сопротивлению  $R$  – короткий конец кабеля подсоедините к гнезду (3), длинный – к гнезду (6).
6. Подключите 2-й канал осциллографа к гнездам (2), (6) – длинный конец кабеля к гнезду (6).
7. Убедитесь, что на выходе генератора установлена частота  $6000\text{ Гц}$ . На экране осциллографа, справа, высвечивается частота, на которой работает генератор. При необходимости откорректируйте ее переключателями (3) и регулятором (8) генератора.
8. С помощью регуляторов (8) и (11) добейтесь установления на экране изображения синусоид, представленного на рис. 11.

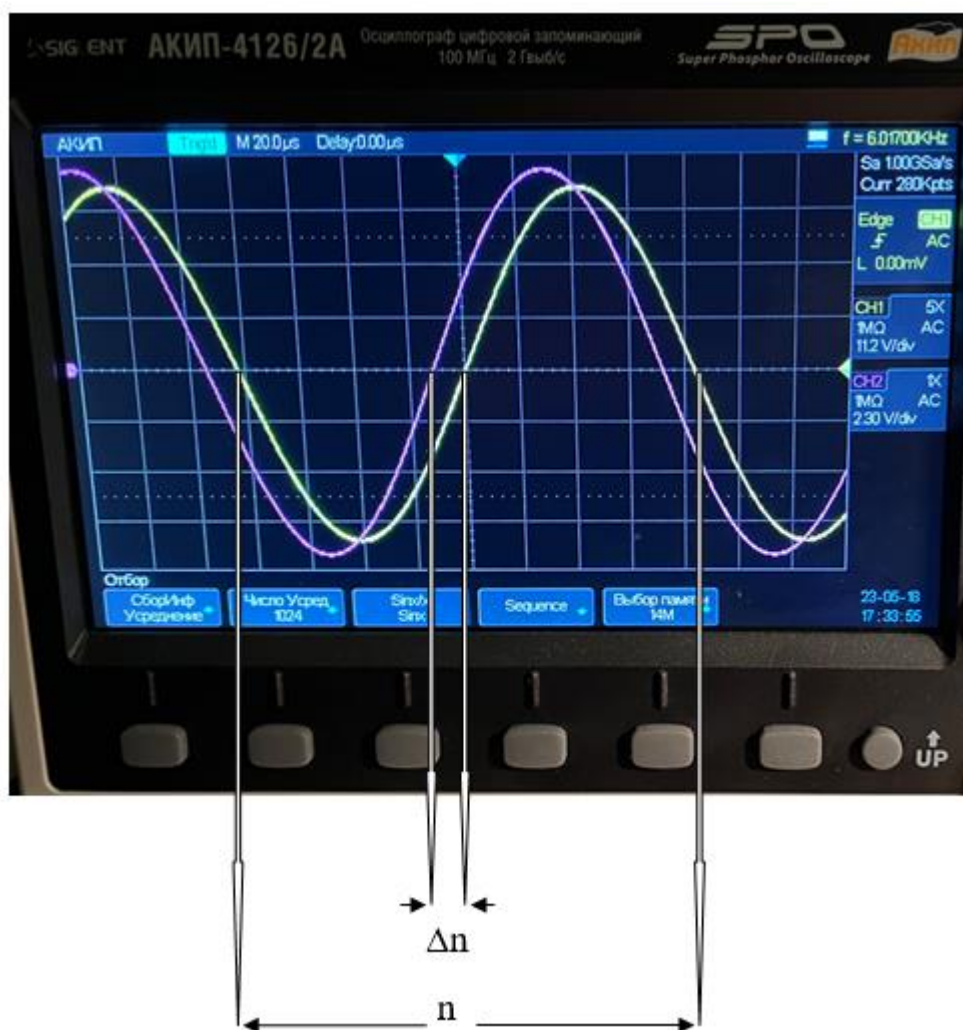


Рис. 11

9. Используя изображение сигналов на экране осциллографа, определите сдвиг фаз  $\varphi$  между напряжениями  $U_L$  и  $U_R$ .

Для этого, пользуясь масштабной шкалой на экране осциллографа, определите длительность периода одной из синусоид в делениях шкалы  $n$  и длительность интервала соответствующего сдвигу фаз между синусоидами  $\Delta n$ . Так как период соответствует изменению фазы на  $2\pi$  рад., то сдвиг по фазе между напряжениями  $U_L$  и  $U_R$  можно вычислить по формуле

$$\varphi = 2\pi \cdot \Delta n / n \text{ (рад.)} \quad (21)$$

Аналогичные измерения проведите на частоте **600 Гц**.

При малых значениях  $\varphi$  для более точного подсчета  $\Delta n$  воспользуйтесь регулятором развертки осциллографа (11) - рис. 10. Увеличение частоты развертки увеличивает интервал  $\Delta n$  и  $n$ . По окончании измерений нажатием на регулятор установите прежний коэффициент развертки.

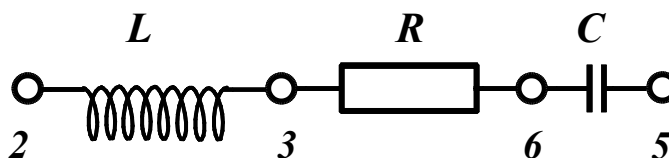
10. Постройте векторные диаграммы для двух частот имея в виду, что вектор напряжения на активном сопротивлении пропорционален току и совпадает с ним по фазе.

11. Результаты измерения сдвига фаз  $\varphi_L^{эксн}$  занесите в табл.1, столбцы 1, 2.

**Таблица 1**

$f, \text{Гц}$	<i>Сдвиг по фазе <math>\varphi^0</math> между <math>U_L</math> и <math>U_R</math></i>		
	1	2	3
600		<i>Эксн. ...</i>	<i>Теор. ...</i>
6000		<i>Эксн. ...</i>	<i>Теор. ...</i>

**б) Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с емкостью.**



1. Подключите генератор к гнездам (3), (5) – общий к гнезду (3).

2. Входы осциллографа – **КАН1** подключите к гнездам (3), (6) – общий к гнезду (3), **КАН2** к гнездам (3), (5) – общий к гнезду (3).

3. Следуя методике, описанной в разделе **а.**, измерьте сдвиг фаз  $\varphi$  между током и напряжением на частотах **600 Гц** и **6000 Гц**. Постройте векторные диаграммы для этой цепи. Результаты измерения сдвига фаз  $\varphi_{C,эксн}$  занесите в таблицу 2 – столбцы 1, 2. Столбец 3 в таблицах 1 и 2 заполняются после измерения **L** и **C** в упражнении 3.

Формулы для расчета –  $tg \varphi_L^{теор.} = 2\pi fL / (R + R_L)$ ,  $\varphi_L^{теор.} = \arctg \varphi_L^{теор.}$ ,  
 $tg \varphi_C^{теор.} = - 1 / 2\pi fCR$ ,  $\varphi_C^{теор.} = \arctg \varphi_C^{теор.}$

Сравните  $\varphi_L^{теор.}$  и  $\varphi_C^{теор.}$  с экспериментальными значениями.

Таблица 2

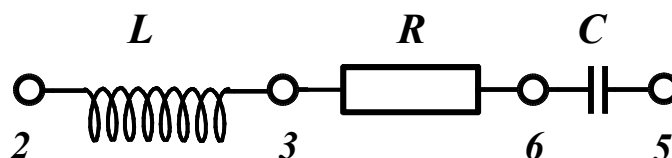
$f, \text{Гц}$	Сдвиг по фазе $\varphi^0$ между $U_C$ и $U_R$		
	1	2	3
600		Эксп. ...	Теор. ...
6000		Эксп. ...	Теор. ...

### У п р а ж н е н и е 3

**Измерение тока и напряжений в цепи с индуктивностью и емкостью и сопротивлением. Определение величины  $L$  и  $C$ .**

**а) Измерение тока и напряжений.**

1. Подайте напряжение  $\sim 6 \text{ В}$  с генератора в гнезда (2), (5) макетной схемы.



2. Установите вольтметр в режим измерения напряжения  $V_{\sim}$ . Измерьте на частотах  $600 \text{ Гц}$  и  $6000 \text{ Гц}$  падение напряжения  $U_R$  на активном сопротивлении  $R$ , индуктивности  $U_L$  и емкости  $U_C$ . Проверьте и при необходимости откорректируйте значения частот – *Упр. 2, раздел а, пункт 7*. Используя результат измерения сопротивления  $R$  в *Упр. 2*, по формуле  $I = U_R / R$  вычислите величину тока в цепи на этих частотах. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$f, \text{Гц}$	$I, \text{мА}$	$U_L, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{\Sigma}, \text{В}$
600					
6000					

3. Проверьте, что сумма  $U_L, U_R$  и  $U_C$  не равна  $U_{\Sigma}$ . Объясните, почему?

**б) Определение параметров цепи  $L, C$ .**

Используя результаты измерений напряжений и тока из таблицы 1, проведите расчет величин индуктивности  $L$  и емкости  $C$  по формулам –

$$L = (1/2\pi f) \cdot [ (U_L/I)^2 - R_L^2 ]^{1/2}, C = I / 2\pi f U_C. \quad (22)$$

Значение  $R_L$  возьмите из *Упр.2*.

Результаты расчета запишите в таблицу 2. В столбец  $R$ ,  $\text{Ом}$  впишите результат измерения  $R$  из *Упр.2*.

Таблица 2

$f, \text{Гц}$	$R, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$C, \text{нФ}$	$R(\text{полное}), \text{Ом}$	
				Эксп.	Теор.
600					
6000					
Среднее					

**в) Определение полного сопротивления цепи и сдвига фазы между напряжением в цепи  $U_n$  и током  $I$ .**

1. Используя результаты измерений из табл. 1, 2, найдите значение полного сопротивления цепи

$$R_n^{\text{эксп}} = U_n / I,$$

2. Расчетное значение полного сопротивления цепи

$$R_n^{\text{теор.}} = [ (R+R_L)^2 + (2\pi fL - 1/2\pi fC)^2 ]^{1/2}$$

Результат запишите в табл. 2

**г) Определение сдвига фазы между полным напряжением в цепи  $U_n$  и током  $I$ .**

$$\text{tg } \varphi^{\text{теор}} = [ 2\pi fL - 1 / (2\pi f C) ] / (R+R_L),$$

$$\varphi^{\text{теор}} = \text{arctg } \varphi^{\text{теор}}.$$

При вычислении  $\varphi$  использовались значения  $L, C$  для выбранной частоты и полное активное сопротивление из *Упр. 2*.

**ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ ВЫКЛЮЧИТЕ ПРИБОРЫ !!!**

## ВОПРОСЫ

1. Какой ток называется квазистационарным?
2. Будет ли квазистационарным ток частотой  $50 \text{ Гц}$  в линии Москва-Владивосток ( $10000 \text{ км}$ )?
3. Через омическое сопротивление  $R$  идет ток  $I = I_0 \sin \omega t$ . Как меняется от времени напряжение  $U$  на этом сопротивлении? Построить векторную диаграмму для  $U$  и  $R$ .
4. Через емкость  $C$  идет ток  $I = \sin \omega t$ . Найти, как меняется напряжение  $U$  и построить векторную диаграмму для  $U$  и  $I$ .
5. Через индуктивность  $L$  идет ток  $I = I_0 \sin \omega t$ . Найти, как меняется напряжение, построить векторную диаграмму.
6. Записать закон Ома для цепи переменного тока.

### Литература

Савельев И.В. Курс общей физики: Кн. 2 «Электричество и магнетизм», Издание 2-е. Москва. Наука. Физматлит.1982.

Глава 13. Электрические колебания.

§ 88. Квазистационарные токи.

§ 90. Свободные затухающие колебания.

§ 91. Вынужденные электрические колебания.

§ 92. Переменный ток.