

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана
Калужский филиал

М. Р. Фишер, Д. В. Мельников, В. И. Червяков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по курсу «Основы электротехники»

Москва
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
2012

УДК 621.3

ББК 31.2

Ф68

Методические указания издаются в соответствии с учебным планом специальности 211000.65 «Конструирование и технология электронных средств».

Методические указания рассмотрены и одобрены:

кафедрой ЭИУ7-КФ «Электротехника», протокол № 4 от 1.12.2011 г.

Зав. кафедрой ЭИУ7-КФ _____ Д. В. Мельников

Методической комиссией факультета ЭИУК,

протокол № ____ от _____ 2012 г.

Председатель методической комиссии факультета ЭИУК

_____ М. Ю. Адкин

Методической комиссией Калужского филиала МГТУ

им. Н. Э. Баумана, протокол № ____ от _____ 2012 г.

Председатель методической комиссии Калужского филиала МГТУ

им. Н. Э. Баумана _____ О. Л. Перерва

Авторы:

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ЭИУ7-КФ _____ М. Р. Фишер;

канд. техн. наук, доцент кафедры ЭИУ7-КФ _____ Д. В. Мельников;

старший преподаватель кафедры ЭИУ7-КФ _____ В. И. Червяков

Рецензент:

д-р техн. наук, профессор кафедры ЭИУ3-КФ

_____ Ю. П. Корнюшин

Методические указания содержат необходимые теоретические сведения, варианты задания и контрольные вопросы для выполнения лабораторной работы «Исследование электрических цепей синусоидального тока» по курсу «Основы электротехники» с использованием программы Electronics Workbench.

Методические указания предназначены для студентов специальности 211000.65 «Конструирование и технология электронных средств», а также студентов других специальностей, изучающих электротехнику.

© Фишер М. Р., Мельников Д. В., Червяков В. И., 2012

Цель работы: изучение законов электрических цепей синусоидального тока, приобретение навыков построения векторных диаграмм.

В результате выполнения лабораторной работы студенты должны теоретически изучить законы электрических цепей синусоидального тока, освоить методику построения векторных диаграмм, а также получить практические навыки исследования таких цепей в среде Electronics Workbench.

Оборудование: рабочая станция; ОС Windows XP, 7; Electronics Workbench 5.12.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Любая синусоидально изменяющаяся функция определяется тремя величинами: *амплитудой, угловой частотой и начальной фазой*.

Синусоидальный ток представляет собой ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону (рис. 1):

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

где i – мгновенное значение тока; I_m – амплитуда; ω – угловая частота (измеряется в [рад/с] или [с⁻¹]); t – время; ψ_i – начальная фаза.

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

где $f = 1/T$ – *частота* (число колебаний в 1 с; измеряется в [с⁻¹] или герцах [Гц]); T – *период* колебаний (время, за которое совершается одно полное колебание).

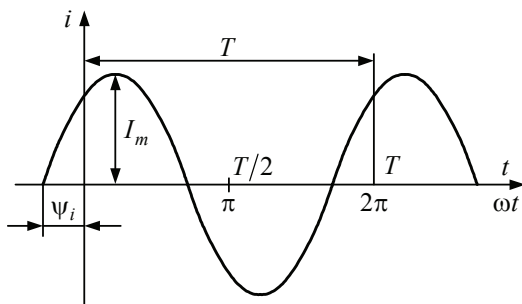


Рис. 1. График синусоидального тока

Аргумент синуса, т. е. величину $(\omega t + \psi_i)$, называют *фазой*. Она характеризует состояние колебания (т. е. числовое значение) в данный момент времени t .

Широко применяют понятие *действующего значения* синусоидальной изменяющейся величины (его называют также эффективным или среднеквадратичным). Действующее значение тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

Большинство измерительных приборов показывает именно действующее значение измеряемой величины.

Активное сопротивление в цепи синусоидального тока. При прохождении синусоидального тока через активное сопротивление сдвиг по фазе между током и напряжением равен нулю. Если положить начальную фазу тока $\psi_i = 0^\circ$, то мгновенное значение напряжения на сопротивлении R будет определяться как

$$u_R = R \cdot i = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t. \quad (4)$$

Примерный вид графиков мгновенных значений тока и напряжения на активном сопротивлении представлен на рис. 2.

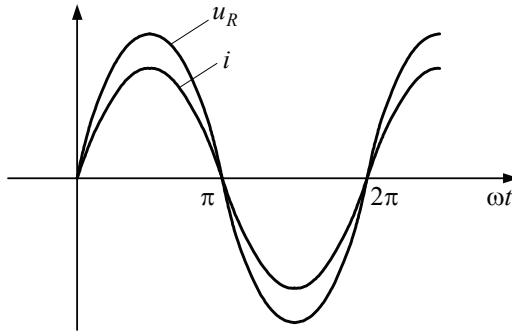


Рис. 2. Мгновенные значения тока и напряжения на активном сопротивлении

Индуктивность в цепи синусоидального тока. Практически любая катушка (обмотка) обладает некоторой индуктивностью L (единицы измерения – [Гн]) и активным сопротивлением R_L . На схеме реальную катушку можно представить в виде последовательно соединенных индуктивности L и активного сопротивления R_L .

Выделим из схемы одну индуктивность (без активного сопротивления). При прохождении тока $i = I_m \sin \omega t$ через катушку L в ней наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{\partial i}{\partial t} = -\omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (5)$$

Так как $u_L = -e_L$, то

$$u_L = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (6)$$

Произведение ωL обозначают X_L и называют *реактивным индуктивным сопротивлением* (размерность [Ом]):

$$X_L = \omega L. \quad (7)$$

Таким образом, индуктивность оказывает переменному току сопротивление X_L , которое прямо пропорционально частоте. Кроме того, как видно из выражения (6), ток на индуктивности

отстает по фазе от напряжения на 90° . Примерные графики соответствующих мгновенных значений i и u_L изображены на рис. 3.

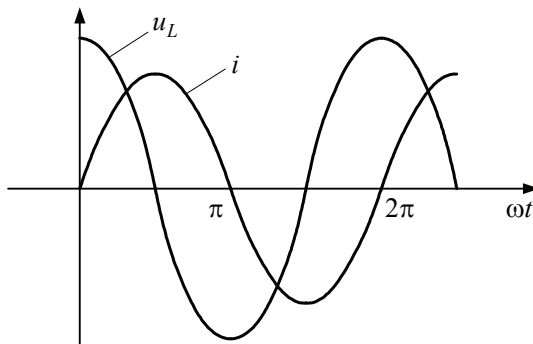


Рис. 3. Мгновенные значения тока и напряжения на индуктивности

Конденсатор в цепи синусоидального тока. Если приложенное к конденсатору напряжение u_C во времени не меняется, то заряд $q = Cu_C$ на одной его обкладке и заряд $-q = -Cu_C$ на другой (C – емкость конденсатора) неизменны и ток через конденсатор не проходит ($i = dq/dt = 0$). Если же напряжение на конденсаторе меняется во времени, например по синусоидальному закону $u_C = U_m \sin \omega t$, то по синусоидальному закону будет меняться и заряд конденсатора $q = Cu_C = CU_m \sin \omega t$, и конденсатор будет периодически перезаряжаться. Такая перезарядка будет сопровождаться протеканием через него зарядного тока

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_m \sin \omega t) = \omega CU_m \cos \omega t = \\ &= \omega CU_m \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{U_m}{1/\omega C} \sin(\omega t + 90^\circ). \end{aligned} \quad (8)$$

Отношение $1/\omega C$ обозначают X_C и называют *реактивным емкостным сопротивлением* (размерность [Ом]):

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (9)$$

Следовательно, емкость оказывает переменному току сопротивление X_C , которое обратно пропорционально частоте, а ток через конденсатор согласно выражению (8) опережает по фазе напряжение на 90° . Примерные графики соответствующих мгновенных значений i и u_C приведены на рис. 4.

Если проинтегрировать по времени обе части равенства

$$i = C \frac{du}{dt}, \quad (10)$$

то получим

$$u = \frac{1}{C} \int i dt. \quad (11)$$

Равенство (11) позволяет определить напряжение на конденсаторе через ток.

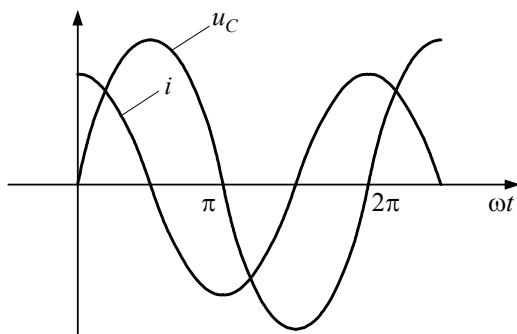


Рис. 4. Мгновенные значения тока и напряжения на емкости

При изложении вопроса о прохождении синусоидального тока через конденсатор предполагалось, что диэлектрик, разделяющий пластины конденсатора, является идеальным и в нем нет потерь энергии. Однако при приложении синусоидального напряжения к пластинам конденсатора, разделенным твердым или жидким диэлектриком, в последних всегда имеются некоторые потери энергии, обусловленные вязким трением при повороте дипольных молекул, а также несовершенством диэлектрика (наличием у него небольшой проводимости). Эти потери относительно малы и ими часто можно пренебречь. Если требуется учесть их в расчете, то конденсатор заменяют схемой замещения, в которой параллельно емкости C присоединено активное сопротивление R_C , потери энергии в котором имитируют потери энергии в реальном диэлектрике.

Ток через конденсатор равен геометрической сумме двух токов: тока через емкость, на 90° опережающего напряжение на конденсаторе, и относительно малого по величине тока через активное сопротивление, совпадающего по фазе с напряжением. Таким образом, ток через конденсатор с неидеальным диэлектриком опережает напряжение на угол, немного меньший 90° .

Анализ цепей синусоидального тока и построение векторных диаграмм. Одним из основных методов анализа цепей синусоидального тока является *символический метод*. В нем синусоидальный ток является

соидальной функции (току, напряжению ЭДС и т. д.) ставится в соответствие комплексное число, модуль которого равен ее действующему значению, а аргумент – фазе. Так, например, мгновенному значению тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ соответствует комплекс тока

$$\dot{I} = I(\cos \psi_i + j \sin \psi_i) = Ie^{j\psi_i}, \quad (12)$$

где I – действующее значение тока; $j = \sqrt{-1}$.

В свою очередь комплексное число может быть изображено на комплексной плоскости в виде вектора, длина которого соответствует действующему значению, а угол между вектором и действительной осью, отсчитываемый от нее против часовой стрелки, – фазе. Изображение на комплексной плоскости комплекса тока (12) представлено на рис. 5.

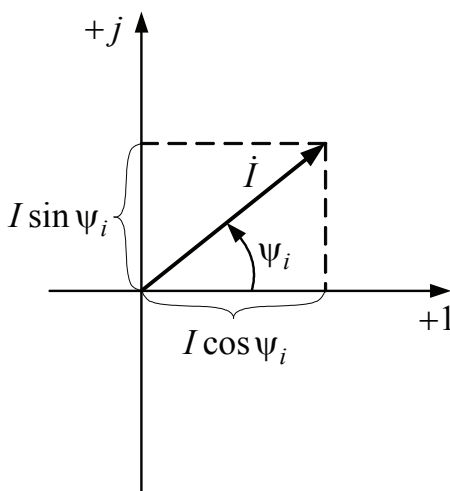


Рис. 5. Изображение комплекса тока на комплексной плоскости

Совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением их пра-

вильной ориентации друг относительно друга по фазе, называют *векторной диаграммой*.

Векторная диаграмма, изображающая совокупность комплексов токов и напряжений для некоторой цепи, называется *векторной диаграммой цепи*. На ней длины векторов соответствуют (с учетом выбранного масштаба для токов и напряжений) действующим значениям соответствующих величин, а угол между двумя векторами равен разности фаз между ними. Таким образом векторная диаграмма цепи является геометрической интерпретацией законов Ома и Кирхгофа для цепей синусоидального тока.

Сдвиг по фазе между током и напряжением для активно-реактивных цепей составляет острый угол, который зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений или проводимостей. При этом ток отстает от напряжения, если цепь в целом имеет активно-индуктивный характер, и опережает напряжение в случае активно-емкостного характера цепи.

Справедливы и обратные утверждения. Так, если в некоторой цепи ток отстает от напряжения на некоторый острый угол, то цепь имеет активно-индуктивный характер. Если ток опережает напряжение на острый угол, то цепь имеет активно-емкостный характер.

Если сдвиг по фазе равен 0° или 90° , то цепь имеет активный, индуктивный или емкостный характер соответственно.

На рис. 6–10 показаны некоторые простейшие цепи и их векторные диаграммы. При этом на диаграммах изображено лишь положение соответствующих векторов друг относительно друга. Общая же ориентация векторной диаграммы цепи на комплексной плоскости будет определяться выбором базового вектора, относительно которого будут отсчитываться сдвиги фаз других векторов. За базовый вектор можно взять любой вектор тока или напряжения, а затем к нему «привязывать» все остальные в соответствии с законами Кирхгофа. Однако существуют некоторые общие рекомендации, следуя которым можно существенно упростить процесс построения диаграммы. Так, при последовательном соединении элементов в качестве базового удобнее выбрать вектор тока, так как ток в этом слу-

чае одинаков для всех элементов. При параллельном соединении в качестве базового удобнее выбрать вектор напряжения по тем же соображениям. Здесь полагаем также, что индуктивности и емкости идеальные, т. е. активное сопротивление индуктивности и потери энергии в конденсаторе нулевые.

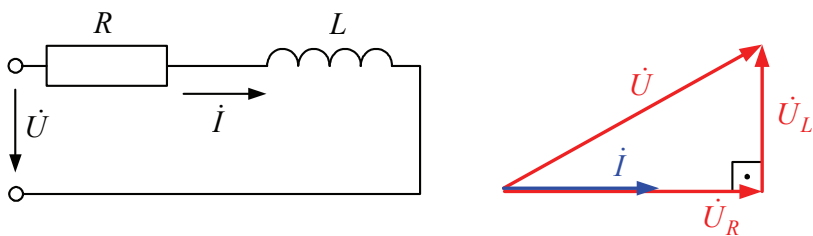


Рис. 6. Последовательное соединение R и L

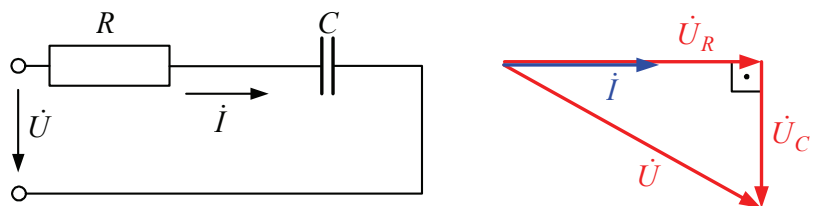


Рис. 7. Последовательное соединение R и C

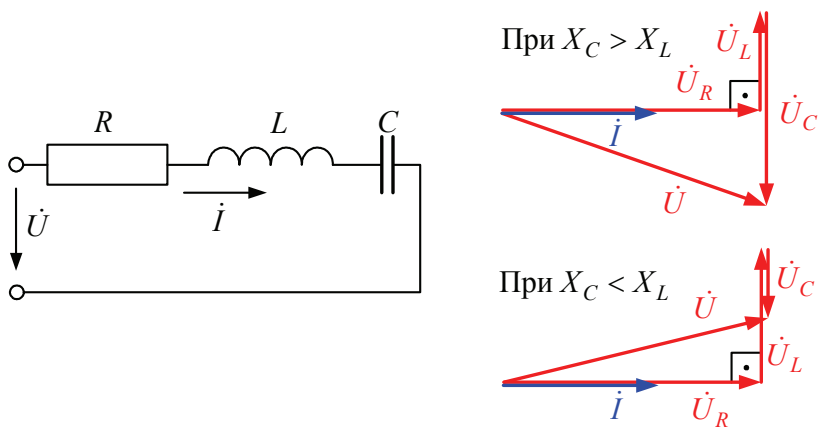


Рис. 8. Последовательное соединение R , L и C

Реактивные проводимости:

$$b_L = \frac{1}{X_L}; \quad b_C = \frac{1}{X_C}$$

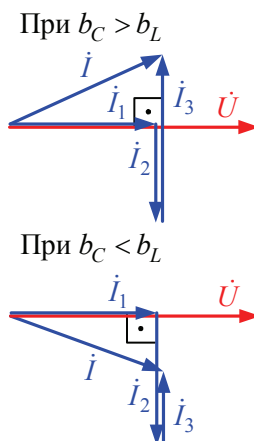
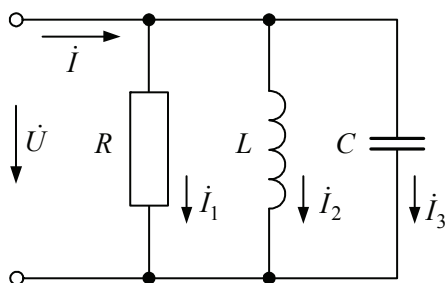


Рис. 9. Параллельное соединение R , L и C

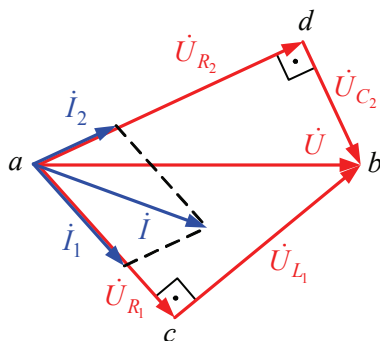
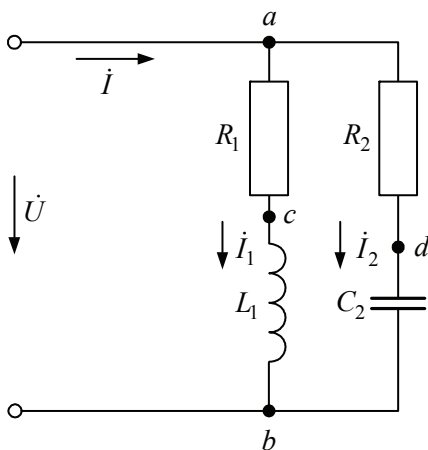


Рис. 10. Смешанное соединение элементов

Активная, реактивная и полная мощности. Под *активной мощностью* P понимают среднее значение мгновенной мощности p за период T :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin \omega t dt = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi = UI \cos \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где φ – угол между напряжением и током.

Активную мощность измеряют в ваттах [Вт]. Физически она представляет собой энергию, которая выделяется в виде теплоты на участке цепи в сопротивлении R . Действительно, так как произведение $U \cos \varphi = IR$, то

$$P = I^2 R. \tag{14}$$

Под *реактивной мощностью* Q понимают произведение

$$Q = UI \sin \varphi. \tag{15}$$

Соответственно, если $\sin \varphi > 0$, то и $Q > 0$, если $\sin \varphi < 0$, то $Q < 0$. Реактивную мощность принято измерять в вольтамперах реактивных [ВАр]. Она пропорциональна среднему за четверть периода значению энергии, которая отдается источником питания на создание переменной составляющей магнитного и электрического поля индуктивности и емкости. За один период переменного тока энергия дважды отдается генератором в цепь и дважды он получает ее обратно, т. е. реактивная мощность является энергией, которой обменивается генератор и приемник.

Полная (кажущаяся) мощность (ее измеряют в вольтамперах [ВА])

$$S = UI. \tag{16}$$

Между P , Q и S существует соотношение

$$S^2 = P^2 + Q^2. \tag{17}$$

На щитке любого источника электрической энергии переменного тока (генератора, трансформатора и т. д.) указывается величина S . Она характеризует ту мощность, которую этот источник может отдавать потребителю, если последний будет ра-

ботать при $\cos \varphi = 1$, т. е. будет представлять собой чисто активное сопротивление.

Выражение мощности в комплексной форме записи:

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \dot{U}I^* = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = \\ &= UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ,\end{aligned}\tag{18}$$

где $\tilde{S}$ – комплекс (не сопряженный) полной мощности; $\dot{U} = UIe^{j\psi_u}$ – комплекс напряжения; $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$ – комплекс тока; $I^* = Ie^{-j\psi_i}$ – сопряженный комплекс тока; $\varphi = \psi_u - \psi_i$ – угол между напряжением и током.

Таким образом, активная мощность P есть действительная часть (Re), а реактивная мощность Q – мнимая часть (Im) произведения $\dot{U}I^*$:

$$\begin{cases} P = \operatorname{Re} \dot{U}I^*; \\ Q = \operatorname{Im} \dot{U}I^*. \end{cases}\tag{19}$$

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH

Для практического исследования электрических цепей синусоидального тока в программе Electronics Workbench применяются следующие измерительные приборы.

1. Амперметр. Для измерения амперметром действующего значения синусоидального тока необходимо двойным щелчком мыши на изображении прибора открыть окно его свойств, а затем на вкладке *Value* поменять режим в ячейке *Mode* с *DC* (Direct current – постоянный ток) на *AC* (Alternating Current – переменный ток) (рис. 11).

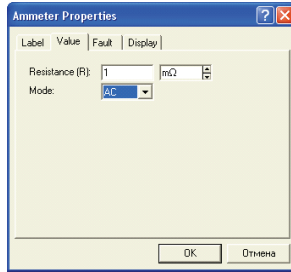


Рис. 11. Переключение амперметра в режим измерения действующего значения переменного тока

2. Вольтметр. Для измерения вольтметром действующего значения синусоидального напряжения необходимо переключить его в режим *АС* аналогичным способом.

Вместо амперметра или вольтметра можно использовать **мультиметр**, переключив его в режим переменного тока путем нажатия кнопки  (рис. 12).

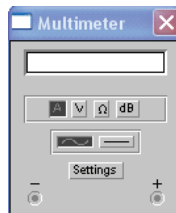


Рис. 12. Переключение мультиметра в режим переменного тока

3. Осциллограф (Oscilloscope). Осциллограф предназначен для отображения осциллограмм электронных сигналов. Он имеет четыре входных зажима (рис. 13): 1 – общий (заземление); 2 – вход синхронизации; 3 и 4 – входы «Канал А» и «Канал В» соответственно.

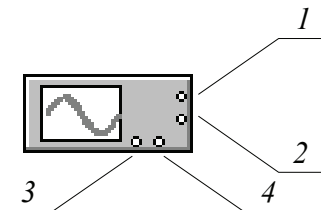


Рис. 13. Осциллограф

Двойным щелчком по изображению прибора открывается окно простой модели осциллографа (рис. 14).

Осциллограф имеет два канала (*Channel*) – *A* и *B* с отдельной для каждого канала установкой масштаба развертки по осям и смещения по вертикали (*Y position*). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок *AC*, *0*, *DC*. Режим *AC* предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (режим «закрытого входа», при этом на входе усилителя осциллографа включается разделительный конденсатор). В режиме *0* входной зажим замыкается на землю. В режиме *DC* (по умолчанию) можно производить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока (режим «открытого входа», при этом входной сигнал непосредственно поступает на вход вертикального усилителя).

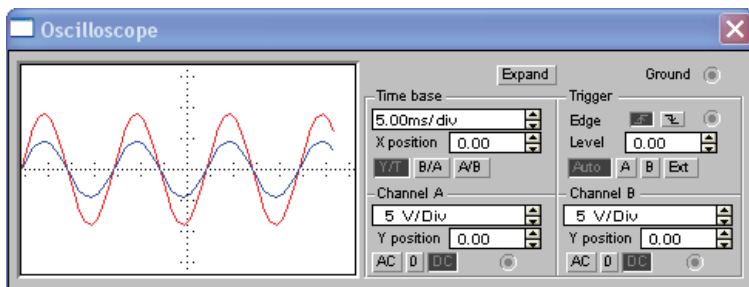


Рис. 14. Окно простой модели осциллографа

Режим развертки выбирается кнопками *Y/T*, *B/A*, *A/B*. В режиме *Y/T* (обычный режим, включен по умолчанию) реализуется следующий режим развертки: по вертикали – напряжение сиг-

нала, по горизонтали – время; в режиме B/A по вертикали – сигнал канала B , по горизонтали – сигнал канала A ; в режиме A/B по вертикали – сигнал канала A , по горизонтали – сигнал канала B .

В режиме развертки Y/T длительность развертки (*Time base*) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел. (ns/div) до 1 с/дел. (s/div) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, то есть по оси X (*X position*).

Можно установить режим однократной развертки (по умолчанию стоит режим непрерывной развертки). Для этого необходимо в системном меню *Analysis/Analysis Options* на закладке *Instruments* включить опцию *Pause after each screen*.

Осциллограммам сигналов по каналам A и B можно задать различный цвет. Для этого необходимо выделить провода, подходящие к зажимам 3 и 4 осциллографа, щелкнуть правой кнопкой мыши и из появившегося контекстного меню выбрать пункт *Wire Properties* (свойство проводов), затем выбрать нужный цвет.

При нажатии на кнопку *Expand* открывается расширенная панель осциллографа (рис. 15).

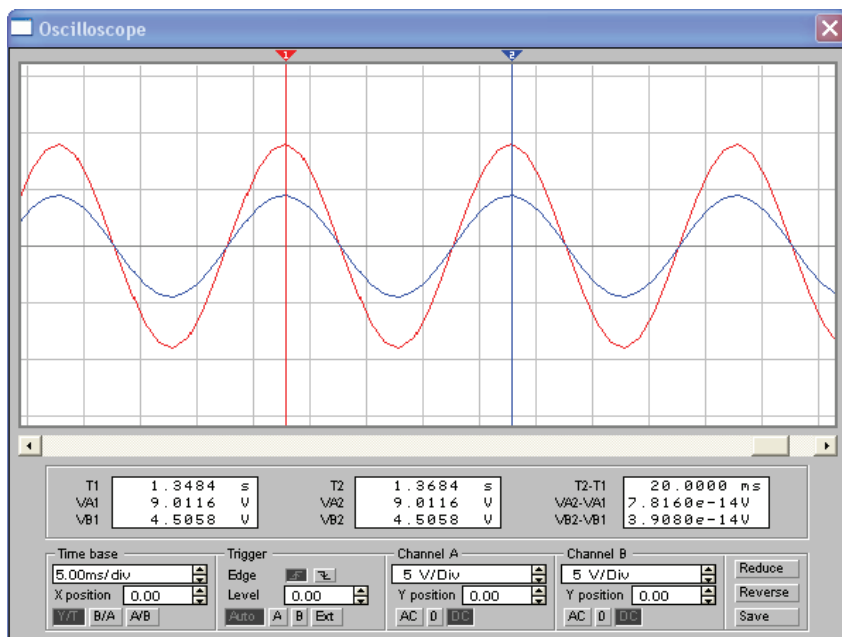


Рис. 15. Панель осциллографа в режиме *Expand*

При этом размер экрана увеличивается, появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали, его инвертирования (кнопка *Reverse*) и записи данных в файл (кнопка *Save*). В верхней части экрана располагаются два треугольных курсора с визирными линиями красного и синего цвета, обозначенные цифрами 1 и 2, при помощи которых можно определить мгновенные значения напряжений в любых точках осциллограмм. Для этого треугольники перетаскиваются мышью в требуемое положение вдоль горизонтальной оси. Координаты точек пересечения первого курсора с осью *X* и осциллограммами (по оси *Y*) отображаются в левом индикаторном окошке под экраном, координаты второго курсора – в среднем, в правом окошке отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго курсоров.

Возврат к простой модели осциллографа осуществляется нажатием кнопки *Reduce*.

4. Графопостроитель Боде (Bode Plotter). Графопостроитель Боде имеет четыре зажима: два входных (IN) и два выходных (OUT) (рис. 16).



Рис. 16. Графопостроитель Боде

Двойным щелчком по изображению прибора открывается панель графопостроителя (рис. 17).

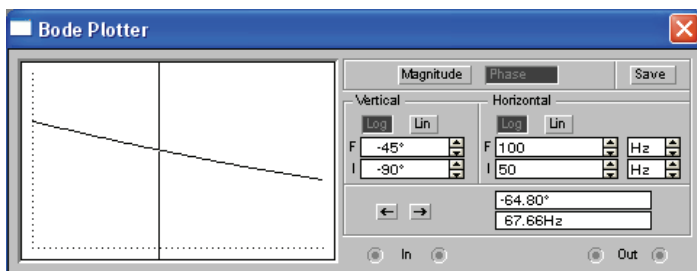


Рис. 17. Панель графопостроителя Боде

Графопостроитель предназначен для анализа амплитудно-частотных (кнопка *Magnitude*, включена по умолчанию) и фазо-частотных (кнопка *Phase*) характеристик при логарифмической (кнопка *Log*, включена по умолчанию) или линейной (кнопка *Lin*) шкале по осям Y (*Vertical*) и X (*Horizontal*).

Настройка прибора заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи или фазы (*Vertical*) и вариации значений частоты (*Horizontal*) в соответствующих окошках, где F – максимальное значение, I – минимальное значение.

Значения указанных величин в отдельных точках АЧХ или ФЧХ можно получить с помощью вертикальной визирной линии, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками  . Они будут отображены в окошках в нижней части панели прибора.

Результаты измерения можно записать в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку *Save* и в диалоговом окне указать имя файла (по умолчанию предлагается имя схемного файла). В полученном таким образом текстовом файле с расширением *.bod АЧХ и ФЧХ представляются в табличном виде.

Для измерений графопостроитель генерирует собственный спектр частот, диапазон которого может задаваться при настройке прибора. Частота любого переменного источника в исследуемой схеме игнорируется, однако схема должна включать какой-либо источник переменного тока. При включении прибора в схему левые выводы зажимов *IN* и *OUT* подключаются к исследуемым точкам, а правые – заземляются.

Поясним теперь практическое использование этих приборов на конкретных примерах. Допустим, необходимо снять осциллограммы напряжения на резисторе R , индуктивности L и общего напряжения для схемы, изображенной на рис. 6, сравнить их с осциллограммой тока и определить фазовый сдвиг между ними. Так как осциллограф отображает только графики напряжения, то для наблюдения за формой тока необходимо использовать преобразователь, называемый *источник напряжения, управляемый током* (*Current-Controlled Voltage Source*) (рис. 18).

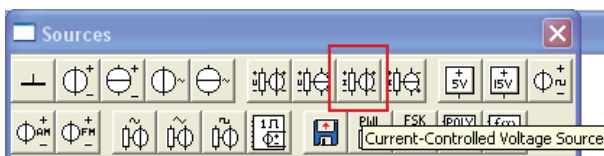


Рис. 18. Источник напряжения, управляемый током

Амплитуда выходного напряжения $U_{\text{Вых } m}$ этого источника зависит от протекающего через него тока, а также от коэффициента передачи: $H = U_{\text{Вых } m} / I_{\text{Вх } m}$. Значение H можно установить в окне его свойств на закладке *Value* в пределах от мОм ($\text{m}\Omega$) до кОм ($\text{k}\Omega$) путем двойного щелчка мыши по изображению источника. Очевидно, что для получения осциллограммы тока с мас-

штабом по оси Y , при котором 1 В соответствует 1 А, необходимо использовать значение $H = 1$ Ом (установлено по умолчанию).

Для снятия осциллограмм тока и напряжения на резисторе R , а также определения разности фаз между ними необходимо собрать схему, изображенную на рис. 19.

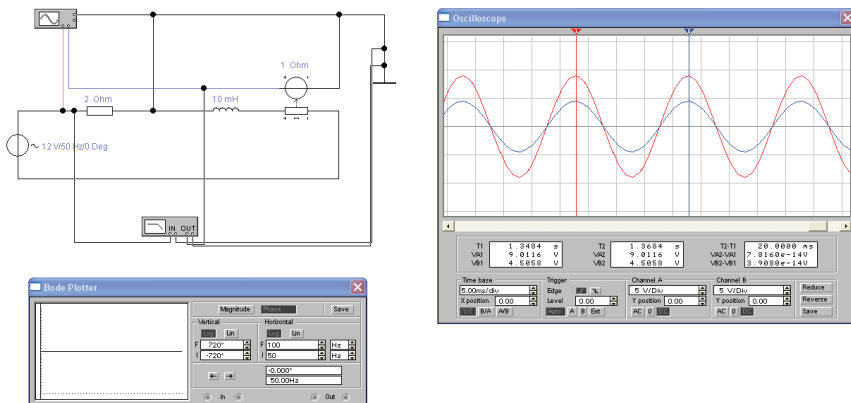


Рис. 19. Схема с осциллографом, на котором показаны графики тока и напряжения на резисторе R , и графопостроителем Боде с показанием сдвига фаз между ними

Из показаний осциллографа видно, что ток (синий график) и напряжение на резисторе R (красный график) совпадают по фазе. При этом в окне графопостроителя Боде отображается фазовый сдвиг равный 0° при частоте 50 Гц. Для определения графопостроителем значения фазового сдвига необходимо нажать кнопку *Phase*, в окошке I задать значение частоты, совпадающее с частотой источника переменного напряжения в схеме, а в окошке F – любое значение $F > I$.

Аналогичная схема для исследования характера тока и напряжения на индуктивности L изображена на рис. 20. Из него видно, что на индуктивности ток отстает по фазе от напряжения на угол 90° .

Для получения осциллограммы общего напряжения необходимо собрать следующую схему (рис. 21). Из показаний приборов видно, что ток отстает по фазе от напряжения на угол $57,52^\circ$. Проверим полученный результат расчетным путем символическим методом:

$$\begin{aligned}
 X_L &= \omega L; \quad \dot{Z} = R + jX_L = Ze^{j\varphi}; \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{U}{Z} e^{-j\varphi} = Ie^{-j\varphi}; \\
 \varphi &= \arctg(X_L/R) = \arctg\left(\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{2}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 57,52^\circ.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

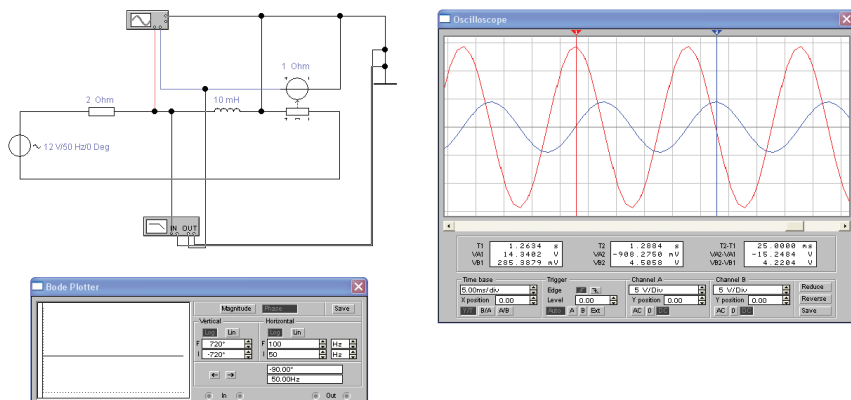


Рис. 20. Схема с осциллографом, на котором показаны графики тока и напряжения на индуктивности L , и графопостроителем Боде с показанием сдвига фаз между ними

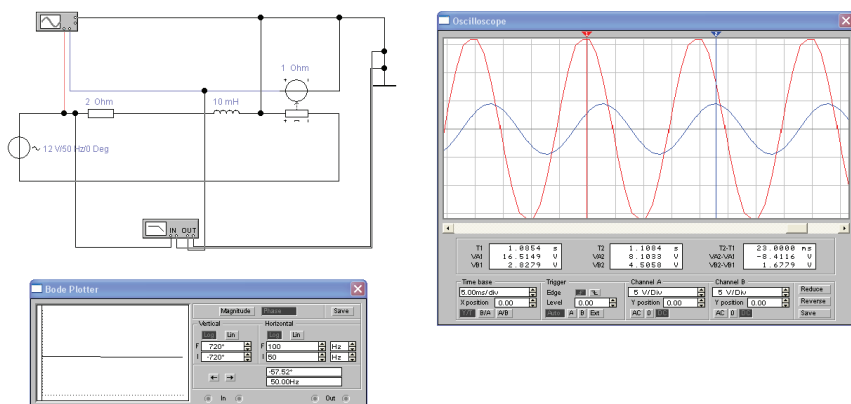


Рис. 21. Схема с осциллографом, на котором показаны графики тока и общего напряжения, и графопостроителем Боде с показанием сдвига фаз между ними

При помощи визирных линий на панели осциллографа можно определить период колебаний и амплитудные значения исследуемых величин. Однако для более точного определения амплитудных значений тока (напряжения) необходимо вос-

пользоваться амперметром (вольтметром) в режиме AC , измерить действующие значения $I = 3,192 \text{ А}$, $U_R = 6,386 \text{ В}$ и $U_L = 10,16 \text{ В}$, а затем домножить их на $\sqrt{2}$. После определения амплитуд и фаз можно записать выражения для мгновенных значений напряжения на элементах схемы, общего напряжения и тока:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2} \cdot U \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 12 \sin \omega t; \\ i(t) &= \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - 57,52^\circ) = \sqrt{2} \cdot 3,192 \sin(\omega t - 57,52^\circ); \\ u_R(t) &= \sqrt{2} \cdot U_R \sin(\omega t - 57,52^\circ) = \sqrt{2} \cdot 6,386 \sin(\omega t - 57,52^\circ); \\ u_L(t) &= \sqrt{2} \cdot U_L \sin(\omega t - 57,52^\circ + 90^\circ) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 10,16 \sin(\omega t + 32,48^\circ). \end{aligned} \quad (21)$$

Используя выражения (21), нетрудно построить векторную диаграмму цепи. Здесь имеет место последовательное соединение элементов, поэтому, в соответствии с приведенными выше рекомендациями, за базовый вектор при ее построении целесообразно выбрать вектор тока и положить его фазу равной нулю. Тогда уравнения (21) перепишутся в виде:

$$\begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2} \cdot 3,192 \sin \omega t; \\ u_R(t) &= \sqrt{2} \cdot 6,386 \sin \omega t; \\ u(t) &= \sqrt{2} \cdot 12 \sin(\omega t + 57,52^\circ); \\ u_L(t) &= \sqrt{2} \cdot 10,16 \sin(\omega t + 90^\circ). \end{aligned} \quad (22)$$

Перейдем теперь к соответствующим комплексам:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I e^{j \cdot 0^\circ} = 3,192; \\ \dot{U}_R &= U_R e^{j \cdot 0^\circ} = 6,386; \\ \dot{U} &= 12 e^{j \cdot 57,52^\circ}; \\ \dot{U}_L &= 10,16 e^{j \cdot 90^\circ}. \end{aligned} \quad (23)$$

Векторная диаграмма данной цепи будет иметь вид, изображенный на рис. 22.

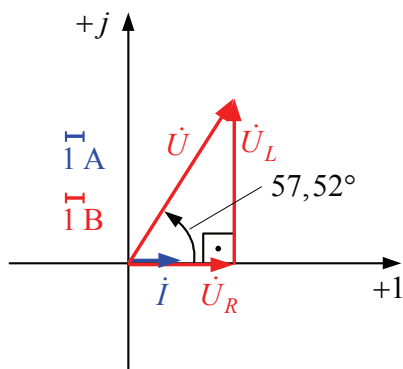


Рис. 22. Векторная диаграмма цепи

3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Получить у преподавателя вариант задания.
2. Собрать электрическую схему, изображенную на рис. 23, посредством программы Electronics Workbench в соответствии с заданным вариантом (табл. 1).

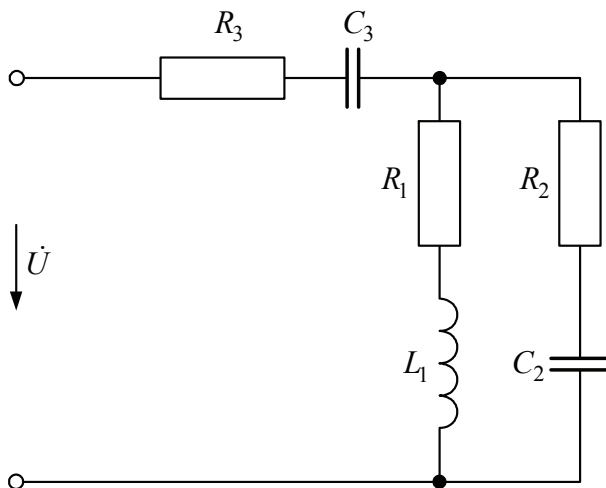


Рис. 23. Электрическая схема

Таблица 1

Варианты задания

№ варианта	U , В	f , Гц	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	L_1 , мГн	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ
1	10	50	4	40	10	15	40	88
2	12	100	8	39	15	20	45	85
3	14	50	12	38	20	25	50	82
4	16	100	16	37	25	30	55	79
5	18	50	20	36	30	35	60	76
6	20	100	24	35	35	40	65	73
7	22	50	28	34	40	45	70	70
8	24	100	32	33	45	50	75	67
9	26	50	34	32	50	55	80	64
10	28	100	38	31	55	60	85	61
11	30	50	42	30	60	65	90	58
12	32	100	46	29	65	70	95	55
13	34	50	50	28	70	75	100	52
14	36	100	54	27	75	80	105	49
15	38	50	58	26	80	85	110	46
16	40	100	62	25	85	90	115	43
17	42	50	66	26	80	95	110	46
18	44	100	70	27	75	100	105	49
19	46	50	74	28	70	105	100	52
20	48	100	78	29	65	110	95	55
21	50	50	82	30	60	115	90	58
22	52	100	86	31	55	120	85	61
23	54	50	90	32	50	125	80	64
24	56	100	94	34	45	130	75	67
25	58	50	98	35	40	135	70	70

3. Измерить действующие значения всех напряжений и токов.

4. Проанализировать схему и измерить только те фазовые сдвиги между напряжениями и токами, которые минимально необходимы для построения полной векторной диаграммы цепи.

5. Построить в масштабе полную векторную диаграмму цепи (для диаграммы напряжений и диаграммы токов масштаб может быть различным).

6. Записать выражения мгновенных значений всех напряжений и токов.

7. Определить разность фаз между общим напряжением и общим током и сделать вывод о характере нагрузки всей цепи.

8. Получить осциллограммы общего тока и напряжения.

9. Подготовить отчет о проделанной работе, который выполняется на листах формата А4 машинописным или рукописным способом и должен содержать:

1) титульный лист с указанием:

- ◆ номера лабораторной работы;
- ◆ названия лабораторной работы;
- ◆ номера варианта задания;
- ◆ ФИО студента;
- ◆ номера группы;

2) цель работы;

3) подробное представление результатов выполнения лабораторной работы в строгом соответствии с пунктами задания, включая все полученные осциллограммы;

4) выводы о проделанной работе.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как записывается выражение для мгновенного значения синусоидальной функции? Какими величинами определяется синусоидальная функция?
2. Что такое период колебаний, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза?

3. Как определяется действующее значение синусоидальной величины.
4. Как соотносятся по фазе токи и напряжения на активном сопротивлении, индуктивности и емкости в цепях синусоидального тока?
5. Какими зависимостями определяются индуктивное и емкостное реактивные сопротивления?
6. Как записывается комплекс действующего значения синусоидальной величины? Как он изображается на комплексной плоскости?
7. Что такое векторная диаграмма, векторная диаграмма цепи?
8. Какие основные условия характерны для цепей с последовательным и параллельным соединением элементов? Как эти условия связаны с рекомендациями по построению векторных диаграмм?
9. Что такое активная, реактивная и полная мощности?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – М. : Гардарики, 1999. – 640 с.
2. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. – СПб. : Лань, 2010. – 592 с.
3. *Чернышов Н. Г., Чернышова Т. И.* Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench. – Тамбов : Издательство ТГТУ, 2005. – 52 с.
4. *Галас В. П.* Моделирование и анализ электрических схем в среде Electronics Workbench. – Владимир : ВГУ, 2003. – 52 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	3
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH	13
3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	22
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	24

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	25
------------------------	----

Максим Робертович Фишер
Дмитрий Владимирович Мельников
Владимир Иванович Червяков

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**