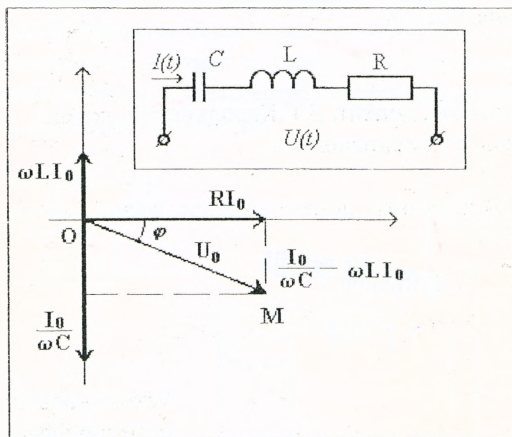


Министерство образования Республики Беларусь
Брестский государственный технический университет
Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ ФИЗИКИ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



Э7. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (Методические указания)

Брест 2001

УДК 53 (076.5)

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ ФИЗИКИ. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.
Методические указания по выполнению лабораторной работы
Э7 "ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА". Брест, БГТУ, 2001.

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы Э7 "Изучение законов переменного тока", в которой экспериментально проверяются зависимости между физическими величинами, характеризующими переменный электрический ток, а также изучаются амплитудные и фазовые соотношения между током и напряжением в RL -, RC - и RLC -цепях.

Лабораторная работа предназначена для студентов всех специальностей и всех форм обучения в БГТУ.

Авторы: А.Н.Прокопеня, доцент, В.Г.Каролинский, доцент,
А.С.Смаль, ст. преподаватель.

Рецензент: В.С.Секержицкий, доцент кафедры физики и астрономии БрГУ

Рекомендовано 22.06.2001
кафедрой физики БГТУ
к публикации на ризографе

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э7

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы:

- проверка закона Ома в RL -, RC - и RLC -цепях переменного тока;
- исследование сдвига фаз между током и напряжением в RL -, RC - и RLC -цепях переменного тока.

Приборы и принадлежности: Двухканальный осциллограф, генератор, вольтметр универсальный цифровой типа В7-35, магазин сопротивлений, катушка индуктивности, набор конденсаторов, соединительные провода.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид установки и схема подключения приборов приведены на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из катушки индуктивности и набора конденсаторов, помещенных в корпус, генератора, магазина сопротивлений, двухканального осциллографа и вольтметра цифрового универсального, который используется в качестве амперметра.

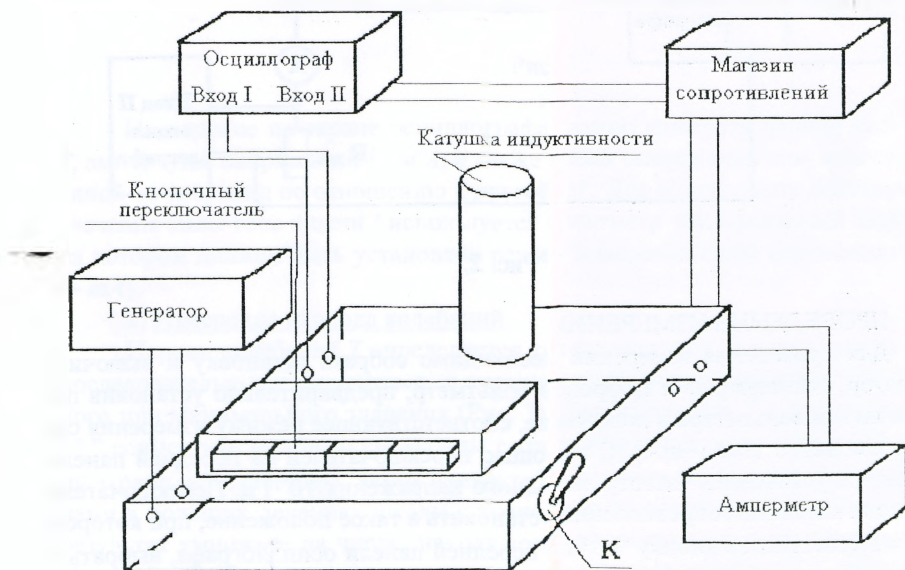


Рис. 1.

Генератор вырабатывает синусоидальное напряжение, которое подается с гнезда "⊕~" на RLC -цепь и вход I осциллографа. При этом в цепи возникает переменный электрический ток. Вход II осциллографа подсоединяется к магазину сопротивлений.

Принципиальная схема установки изображена на рис. 2. Катушка индуктивности L соединена последовательно с конденсатором C_1 , амперметром и магазином сопротивлений $R_{доб}$. Резистор R_k на схеме соответствует активному сопротивлению катушки. С помощью переключателя K катушка индуктивности может быть отключена от цепи. Кнопочные переключатели K_1, K_2, K_3 позволяют подключать параллельно к конденсатору C_1 соответственно конденсаторы C_2, C_3, C_4 в различной комбинации. Замыкание кнопочного переключателя K_4 приводит к соединению обкладок конденсатора, т.е. к отключению емкости от цепи.

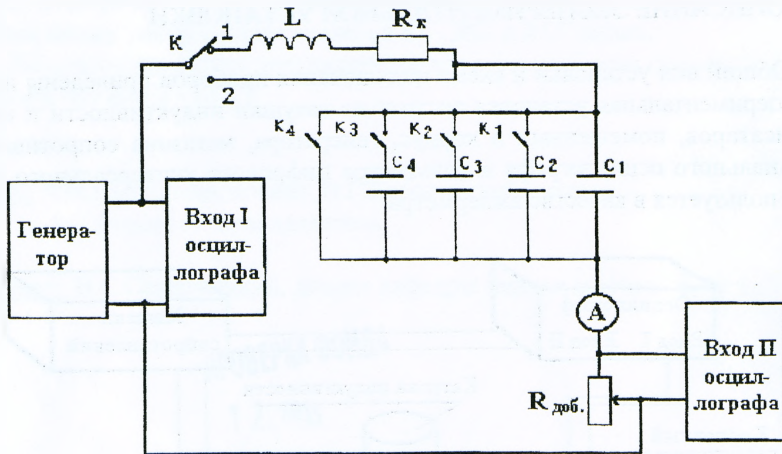


Рис. 2.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения измерений необходимо собрать установку и включить генератор, осциллограф и цифровой вольтметр, предварительно установив переключатели вольтметра в положение, соответствующее режиму измерения силы переменного тока ($\sim mA$). С помощью переключателей на передней панели генератора установить частоту выходного напряжения 10^4 Гц. Переключатели на панели магазина сопротивлений установить в такое положение, при котором $R_{доб} = 1 k\Omega$. Нажав кнопку "μs" на передней панели осциллографа, выбрать в качестве единицы измерения временного интервала микросекунды. При этом масштаб по оси времени (горизонтальная ось на экране осциллографа) должен

быть установлен с помощью ручки управления “Время/дел” в пределах $5 \div 20$.

С помощью ручек “Уровень”, “V/дел I” и “V/дел II” добиться появления на экране осциллографа устойчивой картины, изображенной на рис. 3. Синусоида амплитудой U_0 на рис. 3 соответствует напряжению, подаваемому на RCL -цепь с генератора, а вторая синусоида амплитудой A – напряжению на сопротивлении $R_{об}$. Вращая ручки “ \updownarrow ”, которые позволяют перемещать каждую синусоиду как целое по вертикали, можно легко выяснить, какие из синусоид соответствует сигналам, подаваемым на входы I и II осциллографа.

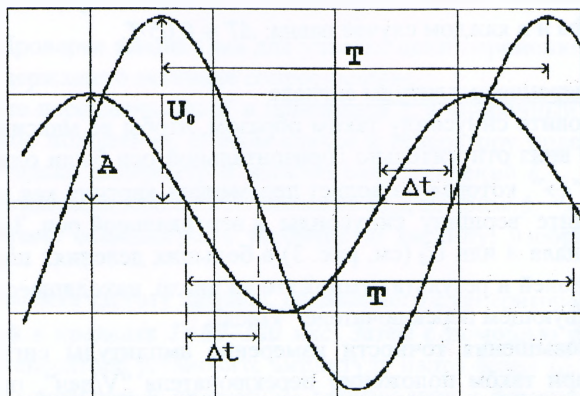


Рис. 3.

По картине на экране осциллографа можно измерить период колебаний T , амплитуды напряжений U_0 и A , а также время опережения или запаздывания одной из синусоид по отношению к другой Δt . Для определения действующего значения силы тока в цепи I используется вольтметр универсальный цифровой, на котором должен быть установлен режим измерения силы переменного тока ($\sim mA$).

а) Измерение периода колебаний

Период колебаний T определяется как промежуток времени между двумя последовательными моментами, в которые напряжение достигает максимального или минимального значения (Рис. 3). Для измерения T с помощью ручки “ \updownarrow ” совместите вершины синусоиды с горизонтальной осью отсчетной шкалы на экране осциллографа. Затем измерьте расстояние между соседними вершинами в больших делениях шкалы с точностью до десятых долей. Полученный результат умножьте на число, находящееся напротив метки на переключателе “Время/дел”. При этом получается значение периода колебаний в микросекундах (при условии, что кнопка “ μs ” на передней панели осциллографа нажата).

Период колебаний можно также определить, измеряя промежуток времени между двумя последовательными моментами, в которые напряжение обращается в нуль, изменяясь в одну и ту же сторону, например, убывает (см. рис. 3). В этом случае необходимо предварительно установить синусоиду таким образом, чтобы ее максимальные отклонения вверх и вниз относительно горизонтальной оси были одинаковы.

Для увеличения точности измерения периода колебаний необходимо установить ручку переключателя “Время/дел” в такое положение, при котором на экране осциллографа наблюдается не более двух периодов колебаний. При этом погрешность измерения периода в основном определяется параметрами осциллографа и в каждом случае равна: $\Delta T = 0.05 \cdot T$.

б) Измерение амплитуды сигнала

Установите синусоиду таким образом, чтобы ее максимальные отклонения вверх и вниз относительно горизонтальной оси были одинаковы. С помощью ручки “ \leftrightarrow ”, которая позволяет перемещать картину как целое по горизонтали, подведите вершину синусоиды к вертикальной оси. Затем измерьте амплитуду сигнала A или U_0 (см. рис. 3) в больших делениях шкалы с точностью до десятых долей и результат умножьте на число, находящееся напротив метки на соответствующем переключателе “V/дел”.

Для повышения точности измерение амплитуды сигнала необходимо проводить при таком положении переключателя “V/дел”, при котором $A \geq 2$ больших делений. При этом погрешность измерения в основном определяется параметрами осциллографа и в каждом случае равна: $\Delta A = 0.05 \cdot A$.

в) Измерение разности фаз колебаний

Вращая ручки “ \updownarrow ”, установите обе синусоиды так, чтобы максимальные отклонения каждой из них вверх и вниз относительно горизонтальной оси на экране осциллографа были одинаковы. Сдвиг фаз напряжений, подаваемых на входы I и II осциллографа, определяется промежутком времени Δt между соответствующими точками пересечения синусоид с горизонтальной осью (см. рис. 3), причем значение Δt выбирается из интервала $0 \leq \Delta t \leq \frac{T}{2}$. Измеряя этот промежуток в больших делениях шкалы с точностью до десятых долей и умножая полученный результат на число, находящееся напротив метки на переключателе “Время/дел”, определите промежуток времени Δt в микросекундах (при условии, что кнопка “ μs ” нажата). Тогда модуль сдвига фаз между напряжениями вычисляется по формуле:

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} (\text{рад}) \text{ или } \varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T}.$$

Поскольку время на рис. 3 возрастает слева направо, то напряжение на сопротивлении $R_{доб}$ отстает по фазе от приложенного к цепи напряжения на φ . Так как фазы колебаний напряжения и силы тока на активном сопротивлении совпадают, то найденное значение φ равняется сдвигу фаз между колебаниями силы тока и приложенного к цепи напряжения.

Для уменьшения погрешности определения Δt измерения необходимо проводить при таком положении переключателя "Время/дел", при котором $\Delta t \geq 2$ больших делений. Тогда относительная погрешность измерения Δt в основном определяется параметрами осциллографа и не превышает 5%.

Задание 1. Проверка закона Ома для участка цепи переменного тока, содержащего активное сопротивление.

1. Установите переключатель K в положение 2, а кнопочный переключатель K_4 – в нажатое положение. В этом случае к генератору подсоединяются последовательно только амперметр и магазин сопротивлений $R_{доб}$. Установите на магазине сопротивлений какое-либо значение $R_{доб}$, например, $R_{доб} = 3000 \text{ Ом}$ и получите на экране осциллографа устойчивую картину, изображенную на рис. 3.

2. Плавно изменяя частоту сигнала, подаваемого с генератора, установите период колебаний в пределах $T=80 \div 100 \text{ мкс}$. Затем с помощью ручки "–" на передней панели генератора установите амплитуду напряжения $U_0 = 0.5 \text{ В}$ (измерения периода колебаний и амплитуды производите с помощью осциллографа).

3. Измерьте величину Δt и определите разность фаз колебаний входного напряжения и напряжения на активном сопротивлении $R_{доб}$. Сравните величины амплитуд U_0 и A и сделайте выводы.

4. С помощью амперметра измерьте действующее значение силы тока в цепи I , соответствующее амплитуде подаваемого напряжения U_0 . Полученную пару значений (I, U_0) занесите в таблицу.

5. Повторите измерения силы тока I не менее десяти раз при значениях амплитуды $U_0 = 1 \text{ В}, 1.5 \text{ В}$ и т.д. В результате получится набор пар соответствующих значений (I_i, U_{0i}) , где i – номер опыта.

6. Согласно закону Ома для участка цепи (см. Приложение 1, пункт а)) величины U_0 и I должны быть связаны линейной зависимостью: $U_0 = R_{доб} \sqrt{2} \cdot I$, где учтена связь между амплитудой колебаний тока в цепи I_0 и действующим значением силы тока I : $I_0 = \sqrt{2} I$. Вводя обозначения $y = U_0$, $x = I$, $a = R_{доб} \sqrt{2}$, получаем линейную зависимость вида:

$$y = a \cdot x \quad (1)$$

Отметьте на координатной плоскости (x, y) все экспериментальные точки. Оцените визуально, хорошо ли расположение экспериментальных точек соответствует линейной зависимости (1).

7. Используя результаты измерений I при различных значениях U_0 , вычислите наилучшее с точки зрения метода наименьших квадратов (МНК) значение постоянной a и погрешность ее определения Δa (см. Приложение 3).

8. По найденному значению постоянной a рассчитайте $R_{\text{доб}}$, сравните с выбранным значением сопротивления магазина и сделайте вывод.

9*. Вычислите величину χ^2 и сделайте вывод о соответствии экспериментальных данных линейной зависимости (1).

Задание 2. Определение индуктивности и активного сопротивления катушки.

1. Для получения RL -цепи установите переключатель K в положение 1, кнопочный переключатель K_4 – в нажатое положение. Установите на магазине сопротивлений какое-либо значение $R_{\text{доб}}$, например, $R_{\text{доб}} = 2000 \text{ Ом}$ и получите на экране осциллографа устойчивую картину, изображенную на рис. 3. Затем установите период колебаний в пределах $T=80 \div 100 \text{ мкс}$, амплитуду напряжения $U_0=5 \div 10 \text{ В}$.

2. Измерьте величину Δt и найдите разность фаз φ колебаний входного напряжения и напряжения на активном сопротивлении $R_{\text{доб}}$. Определите, отстают или опережают по фазе колебания тока в RL -цепи прилагаемое напряжение.

3. С помощью амперметра измерьте действующее значение силы тока в цепи I , соответствующее амплитуде подаваемого напряжения U_0 и активному сопротивлению $R_{\text{доб}}$.

4. Постройте векторную диаграмму напряжений, соответствующую закону Ома для RL -цепи (см. Приложение 2). Из этой диаграммы следуют формулы:

$$L = \frac{U_0 T}{2\sqrt{2}\pi I} \sin \varphi, \quad R = R_{\text{доб}} + R_k = \frac{U_0}{\sqrt{2} I} \cos \varphi.$$

Используя результаты измерений, вычислите индуктивность L и активное сопротивление R_k катушки.

5. Повторите п.п. 2-4 при других значениях $R_{\text{доб}}$ и U_0 и результаты измерений L и R_k усредните.

6*. Оцените погрешность измерения L и R_k .

Задание 3. Исследование зависимости сдвига фаз между током и напряжением в RL -цепи переменного тока от активного сопротивления.

1. Установите переключатель K в положение 1, а кнопочный переключатель K_4 – в нажатое положение. Затем установите на магазине сопротивлений $R_{\text{доб}}=1000 \text{ Ом}$ и получите на экране осциллографа устойчивую картину. Период

колебаний установите в пределах $T=80 \div 100$ мкс, а амплитуду входного напряжения $U_0 = 5 \div 10$ В.

2. Из закона Ома следует (см. Приложение 1), что при изменении величины активного сопротивления цепи R в пределах от нуля до бесконечности сдвиг фаз φ между током и напряжением в RL -цепи уменьшается от $\frac{\pi}{2}$ до нуля.

Так как активное сопротивление катушки $R_k > 0$, то $R > 0$ и, следовательно, $\varphi < \pi/2$ даже при $R_{доб} = 0$ (или $\Delta t < T/4$, где Δt – время запаздывания колебаний напряжения на сопротивлении $R_{доб}$, по отношению к колебаниям напряжения $U(t)$, подаваемого с генератора на RL -цепь). Используя магазин сопротивлений, выберите такое $R_{доб}$, при котором Δt достигает максимального целочисленного значения из интервала $(0, T/4)$, и занесите полученную пару значений $(R_{доб}, \Delta t)$ в таблицу.

3. Постепенно увеличивая величину сопротивления $R_{доб}$, добейтесь уменьшения Δt на 1 мкс. Соответствующие значения $(R_{доб}, \Delta t)$ занесите в таблицу.

4. Повторяйте измерения п. 3 до тех пор, пока Δt не достигнет значения $0,1T$.

В результате получится набор пар соответствующих значений $(R_{доб}, \Delta t_i)$, где i – номер опыта.

5. Закон Ома для RL -цепи предсказывает линейную зависимость между переменными $y = \text{ctg} \varphi = \text{ctg} \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T}$ и $x = R_{доб}$:

$$y = a \cdot x + b, \quad (2)$$

где $a = \frac{T}{2\pi L}$, $b = \frac{R_k T}{2\pi L}$.

Для каждой пары значений $(R_{доб}, \Delta t)$ рассчитайте величину y и отметьте на координатной плоскости (x, y) все экспериментальные точки. Оцените визуально, хорошо ли расположение экспериментальных точек соответствует линейной зависимости (2).

6. Располагая значениями $y_i = \text{ctg} \varphi_i$, измеренными при различных $x_i = R_{доб_i}$, найдите наилучшие с точки зрения МНК значения постоянных a и b и оцените погрешность их определения Δa и Δb (см. Приложение 3).

7. Рассчитайте индуктивность и активное сопротивление катушки и оцените погрешности их определения. Сравните полученные значения с результатами измерений в задании 2 и сделайте выводы.

8*. Вычислите величину χ^2 и сделайте вывод о соответствии экспериментальных данных линейной зависимости (2).

Задание 4. Исследование зависимости сдвига фаз между током и напряжением в RC -цепи переменного тока от активного сопротивления

1. Для получения RC -цепи установите переключатель K в положение 2, кнопочный переключатель K_4 - в отжатое положение. С помощью кнопочных переключателей K_1 , K_2 и K_3 установите значение емкости по указанию преподавателя. Затем установите на магазине сопротивлений какое-либо значение $R_{доб}$, например, $R_{доб} = 1000 \text{ Ом}$ и получите на экране осциллографа устойчивую картину, изображенную на рис. 3.

2. Установите период колебаний в пределах $T=80 \div 100 \text{ мкс}$ и амплитуду напряжения, подаваемого на RC -цепь, $U_0 = 5 \div 10 \text{ В}$.

3. С помощью магазина сопротивлений подберите такое значение $R_{доб}$, при котором Δt равняется максимальному целому числу из интервала $(0, T/4)$, где Δt - время запаздывания колебаний напряжения $U(t)$, подаваемого с генератора на RC -цепь, по отношению к колебаниям напряжения на сопротивлении $R_{доб}$.

Так как фазы колебаний тока и напряжения на активном сопротивлении совпадают, то найденное значение Δt определяет сдвиг фаз между током и напряжением в RC -цепи.

Найденные значения $(R_{доб}, \Delta t)$ занесите в таблицу.

4. Постепенно увеличивая величину сопротивления $R_{доб}$, добейтесь уменьшения Δt на $1 \div 2 \text{ мкс}$. Соответствующие значения $(R_{доб}, \Delta t)$ занесите в таблицу.

5. Повторяйте измерения п. 4 до тех пор, пока Δt не достигнет значения $0,1T$. В результате получится набор пар соответствующих значений $(R_{доб\ i}, \Delta t_i)$, где i - номер опыта.

6. Закон Ома для RC -цепи (см. Приложение 2) предсказывает линейную зависимость между переменными $y = ctg\varphi = ctg \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T}$ и $x=R_{доб}$:

$$y = a \cdot x, \quad (3)$$

где $a = \frac{2\pi}{T} C$.

Для каждой пары значений $(R_{доб}, \Delta t)$ рассчитайте величину y и отметьте на координатной плоскости (x, y) все экспериментальные точки. Оцените визуально, хорошо ли расположение экспериментальных точек соответствует линейной зависимости (3).

7. Располагая значениями $y_i = ctg\varphi_i$, измеренными при различных значениях $x_i = R_{доб\ i}$, найдите наилучшее с точки зрения МНК значение постоянной a и погрешность ее определения Δa (см. Приложение 3).

8. Рассчитайте емкость цепи C и оцените погрешность ее определения.

9*. Вычислите величину χ^2 и сделайте вывод о соответствии экспериментальных данных линейной зависимости (3).

Задание 5. Исследование зависимости силы тока в RC -цепи от емкости.

1. Установите переключатель K в положение 2, кнопочные переключатели K_1, K_2, K_3, K_4 – в отжатое положение. В этом случае емкость RC -цепи будет равно C_1 . Затем установите на магазине сопротивлений какое-либо значение $R_{доб}$, например, $R_{доб} = 1000 \text{ Ом}$ и получите на экране осциллографа устойчивую картину.

2. Установите период колебаний T такой же, как и в задании 4, и амплитуду входного напряжения в пределах $U_0 = 5 \div 10 \text{ В}$. Измерьте действующее значение силы тока в цепи I .

3. Повторите измерения силы тока в цепи I при всех возможных значениях емкости C . В результате получится набор пар соответствующих значений (C_i, I_i) , где i – номер опыта.

4. Закон Ома для RC -цепи (см. Приложение 2) предсказывает линейную

зависимость между переменными $y = \frac{I \cdot 2}{\sqrt{U_0^2 - 2R^2 I^2}}$ и $x = C$:

$$y = a \cdot x, \quad (4)$$

где $a = \frac{2\pi}{T}$.

Для каждой пары значений (C, I) рассчитайте величину y и отметьте на координатной плоскости (x, y) все экспериментальные точки. Оцените визуально, хорошо ли расположение экспериментальных точек соответствует линейной зависимости (4).

5. Используя результаты измерений I при различных значениях C , вычислите наилучшее с точки зрения МНК значение постоянной a и погрешность ее определения Δa (см. Приложение 3).

6. Рассчитайте период колебаний T и оцените погрешность его определения. Сравните полученное значение T с установленным периодом колебаний и сделайте вывод.

7*. Вычислите величину χ^2 и сделайте вывод о соответствии экспериментальных данных линейной зависимости (4).

Задание 6. Проверка закона Ома в RCL -цепи переменного тока.

1. Установите переключатель K в положение 1, кнопочный переключатель K_4 – в отжатое положение. Затем установите такое же значение емкости цепи C , как и в задании 4, и сопротивление магазина $R_{доб}$ по указанию преподавателя и получите на экране осциллографа устойчивую картину.

2. Установите период колебаний в пределах $T = 80 \div 100 \text{ мкс}$ и амплитуду напряжения, подаваемого на RCL -цепь, $U_0 = 5 \div 10 \text{ В}$. Затем измерьте действующее значение силы тока в цепи I .

3. Измерьте величину Δt и определите, отстают или опережают по фазе колебания силы тока в RCL -цепи прилагаемое напряжение.

4. Постройте векторную диаграмму напряжений, соответствующую закону Ома для RCL -цепи (см. Приложение 2). Из этой диаграммы следуют формулы:

$$U_0^2 = 2I^2 \left(R^2 + \left(\frac{T}{2\pi C} - \frac{2\pi}{T} L \right)^2 \right), \quad \operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{T}{2\pi C} - \frac{2\pi}{T} L \right) / R.$$

Используя значения индуктивности катушки L и емкости цепи C , найденные в заданиях 3 и 4, вычислите активное сопротивление цепи R и сдвиг фаз φ между колебаниями тока и прилагаемого напряжения в RCL -цепи при заданных значениях T , U_0 и I .

5. Сравните найденное значение R с величиной $(R_{\text{доб}} + R_k)$, где R_k - и активное сопротивление катушки, найденное в задании 3. Вычислите время запаздывания Δt , соответствующее найденному значению φ , и сравните с результатом измерения Δt . Сделайте выводы.

6*. Выполните п.п. 2-5 при других значениях параметров T , U_0 и $R_{\text{доб}}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Теория простейших цепей переменного тока.

В настоящее время в технике широко используются переменные токи, изменяющиеся во времени по закону синуса или косинуса (Рис. 1.1):

$$I(t) = I_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (\text{П.1.1})$$

Здесь $I(t)$ - мгновенное значение силы тока в момент времени t , I_0 - амплитудное (максимальное) значение силы тока, ω - круговая (циклическая) частота, измеряемая в радианах в секунду (рад/с). Выражение $\omega t + \varphi = \Phi$ назы-

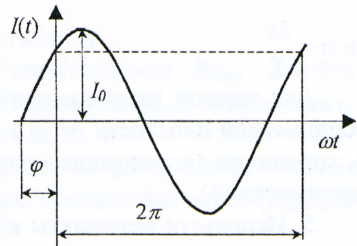


Рис. 1.1

вается фазой тока, а φ - начальной фазой, которая зависит от вида функции (синус или косинус), описывающей гармонические колебания, и выбора начала отсчета времени (т.е. момента, в который $t = 0$). Выбирая значение начальной

фазы тока в соответствии с соотношением $\varphi = \psi + \frac{\pi}{2}$, выражение (1.1) можно переписать в следующей эквивалентной форме: $I(t) = I_0 \cos(\omega \cdot t + \psi)$. Величина

$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ называется частотой переменного тока (количество колебаний в секунду) и измеряется в Герцах (Гц). Величина обратная частоте переменного тока

$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$ называется периодом. Период - наименьшее время, по истечении

которого мгновенные значения периодической величины повторяются. В Республике Беларусь и странах Европы частота промышленного тока $\nu = 50$ Гц, в США и Японии принята частота $\nu = 60$ Гц.

Вместо амплитудного значения силы тока I_0 на практике чаще употребляют его действующее (эффективное) значение и среднее значение.

• *Действующее значение силы переменного тока равно такому значению силы постоянного тока, который за время $t = T$ выделяет на данном резисторе то же количество теплоты, что и переменный ток.*

Для определения действующего значения переменного тока воспользуемся законом Джоуля–Ленца:

– постоянный ток I за время T выделяет на резисторе R количество теплоты

$$Q = I^2 RT,$$

переменный ток $I(t)$ за то же время T и на том же резисторе R выделяет количество теплоты

$$Q = \int_0^T I(t)^2 R dt.$$

Проводя элементарные вычисления, учитывая, что $I^2 RT = \int_0^T I(t)^2 R dt$, получаем:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 \sin^2(\omega t) dt} = I_0 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_0,$$

т.е. действующее значение силы тока $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_0$.

Аналогично находится действующее значение синусоидального напряжения:

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_0.$$

Примечание:

Амплитудные значения напряжения измеряются с помощью осциллографа.

Для измерения действующих значений напряжения и силы тока применяются цифровые измерительные приборы, приборы электромагнитной, электродинамической, тепловой и ряда других систем.

Переменные токи вида (П.1.1) возникают в электрических цепях при приложении к ним синусоидального напряжения. Далее будем предполагать, что на вход электрической цепи подается напряжение $U(t) = U_0 \cos(\omega \cdot t)$, причем круговая частота ω достаточно мала, и можно считать, что в каждый момент времени значения силы тока во всех сечениях неразветвленного участка цепи одинаковы. Найдем силу тока как функцию времени для некоторых электрических цепей.

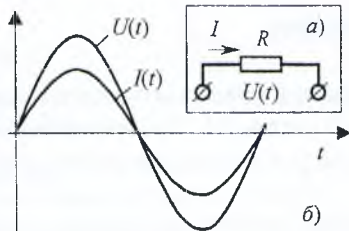


Рис. 1.2

а) Рассмотрим простейшую цепь (Рис. 1.2 а), состоящую только из резистора R (активное сопротивление проводника). Если на вход этой цепи подается переменное напряжение $U(t)$, то электрический ток в цепи в любой момент времени определяется из закона Ома для участка цепи:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \cos(\omega \cdot t) = I_0 \cos(\omega \cdot t). \quad (\text{П.1.2})$$

Таким образом, при наличии в цепи только активного сопротивления колебания силы тока и напряжения совпадают по фазе. При этом амплитудные значения силы тока и напряжения удовлетворяют соотношению $I_0 = \frac{U_0}{R}$, которое аналогично закону Ома для участка цепи в случае постоянного тока. Соответствующие графики зависимостей тока и напряжения от времени в произвольном масштабе приведены на рис. 1.2б.

б) Подадим переменное напряжение $U(t)$ на вход цепи, состоящей из конденсатора емкостью C (Рис.1.3а). Считая, что указанное на рис. 1.3а направление тока соответствует положительному напряжению на конденсаторе, запишем соотношение, связывающее ток в цепи со скоростью изменения заряда на обкладках конденсатора в виде:

$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}$, где учтена связь заряда конденсатора и прикладываемого напряжения: $q = CU$. В случае синусоидального напряжения $U(t)$ зависимость тока от времени имеет вид:

$$I(t) = C \frac{d(U_0 \cos(\omega t))}{dt} = -\omega C U_0 \sin(\omega t) = \omega C U_0 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (\text{П.1.3})$$

Амплитуды тока и напряжения связаны соотношением подобным закону Ома:

$$I_0 = \omega C U_0 = \frac{U_0}{R_C}, \quad (\text{П.1.3а})$$

Величина

$$R_C = 1/\omega C, \quad (\text{П.1.4})$$

имеющая размерность сопротивления, называется емкостным сопротивлением. С учетом (П.1.3а) выражение (П.1.3) принимает вид:

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (\text{П.1.5})$$

Отсюда следует, что в цепи с чисто емкостным сопротивлением сила переменного тока опережает по фазе напряжение на $\pi/2$ (см. Рис.1.3б).

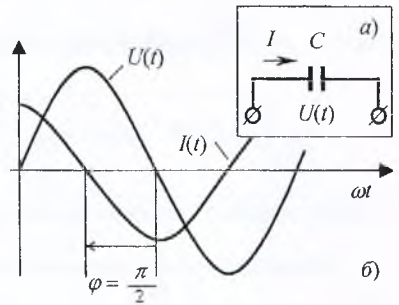


Рис. 1.3

в) Рассмотрим цепь (Рис.1.4а), состоящую из катушки индуктивности L с активным сопротивлением R (RL -цепь), к которой подводится напряжение $U(t)$. При изменении тока в цепи в катушке L будет появляться э.д.с. самоиндукции $\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$.

Поэтому закон Ома для участка цепи имеет вид:

$$I \cdot R = U(t) - L \frac{dI}{dt}. \quad (\text{П.1.6})$$

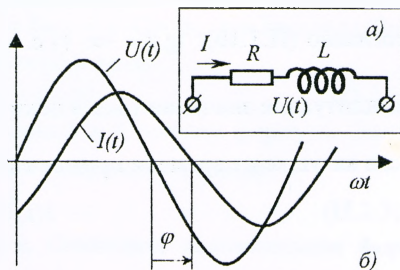


Рис. 1.4.

Уравнение (П.1.6) является неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка. Частным решением этого уравнения является функция вида

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

Подставляя $I(t)$ в уравнение (П.1.6) и учитывая, что $U(t) = U_0 \cos(\omega t)$, имеем

$$I_0 R \cos(\omega t + \varphi) = U_0 \cos(\omega t) + L I_0 \omega \sin(\omega t + \varphi). \quad (\text{П.1.7})$$

Для определения I_0 и φ преобразуем уравнение (П.1.7) к виду:

$$I_0 R \cos(\omega t) \cos \varphi - I_0 R \sin(\omega t) \sin \varphi = U_0 \cos(\omega t) + I_0 \omega L \sin(\omega t) \cos \varphi + I_0 \omega L \cos(\omega t) \sin \varphi. \quad (\text{П.1.8})$$

Здесь были использованы известные тригонометрические соотношения:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta,$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta.$$

Перегруппируем слагаемые в уравнении (П.1.8) следующим образом:

$$U_0 \cos(\omega t) = I_0 (R \cos \varphi - \omega L \sin \varphi) \cos(\omega t) - I_0 (R \sin \varphi + \omega L \cos \varphi) \sin(\omega t). \quad (\text{П.1.9})$$

Приравняв по отдельности коэффициенты при $\cos(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$ в левой и правой частях (П.1.9), получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} I_0 (R \cos \varphi - \omega L \sin \varphi) = U_0, \\ I_0 (R \sin \varphi + \omega L \cos \varphi) = 0. \end{cases}$$

Разрешая эту систему относительно I_0 и φ , находим:

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{L \omega}{R}, \quad (\text{П.1.10})$$

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (\text{П.1.11})$$

Из (П.1.10) следует, что $\varphi < 0$, т.е. ток в RL -цепи при подводимом переменном напряжении отстает по фазе от напряжения на величину φ (см. Рис.1.4б).

Величина

$$R_L = \omega L \quad (\text{П.1.12})$$

называется **индуктивным сопротивлением**.

Если активное сопротивление катушки R пренебрежимо мало, то тогда, согласно (П.1.10), $\operatorname{tg} \varphi = -\infty$ (т.е. $\varphi = -\frac{\pi}{2}$), а из формулы (П.1.11) следует, что амплитудное значение тока в цепи $I_0 = \frac{U_0}{\omega L} = \frac{U_0}{R_L}$. В этом случае зависимость тока в катушке от времени примет вид

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (\text{П.1.13})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Закон Ома для участка цепи переменного тока в комплексной форме.

В электрической цепи, содержащей только активное сопротивление R , колебания тока и напряжения происходят в одной фазе (см. (П.1.2)). Поэтому сила тока $I(t)$ и приложенное напряжение $U(t)$ в любой момент времени связаны между собой соотношением $I(t) = U(t) / R$, подобным закону Ома для участка цепи постоянного тока. При наличии в цепи конденсатора или катушки индуктивности колебания тока и приложенного напряжения происходят со сдвигом по фазе. Поэтому связь тока и напряжения становится более сложной и закон Ома превращается в два соотношения, одно из которых выражает соотношение амплитуд I_0 и U_0 , а другое определяет сдвиг фаз φ (см., например, (П.1.10-П.1.11)). Чтобы упростить запись закона Ома и облегчить анализ цепи, удобно перейти к комплексной форме представления гармонических колебаний. Чтобы понять суть такого перехода, вспомним, что каждое комплексное число z имеет вид:

$$z = x + j \cdot y, \quad (\text{П.2.1})$$

где j – так называемая мнимая единица, обладающая свойством: $j^2 = -1$ (в математике мнимую единицу обычно обозначают буквой i), а действительные числа x и y называются соответственно действительной и мнимой частями комплексного числа z . Для геометрического изображения комплексных чисел на плоскости выбирают прямоугольную декартову систему координат и каждую точку $M(x, y)$ рассматривают как образ числа z . Такую плоскость называют комплексной плоскостью (Рис.2.1). Точка $M(x, y)$ определяет вектор \vec{OM} , который также используется для геометрического представления числа z . Длина $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$ этого вектора называется модулем комплексного числа z , а угол $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ между положительным направлением действительной оси и векто-

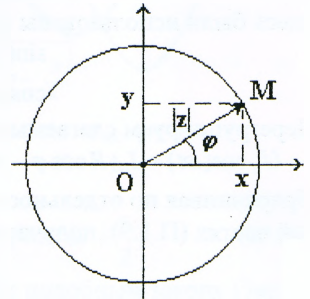


Рис. 2.1.

Рис. 2.1. Точка $M(x, y)$ определяет вектор \vec{OM} , который также используется для геометрического представления числа z . Длина $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$ этого вектора называется модулем комплексного числа z , а угол $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ между положительным направлением действительной оси и векто-

ром – аргументом z . Из рис. 2.1 видно, что действительная и мнимая части z выражаются через модуль и аргумент как $x = \operatorname{Re} z = |z| \cos \varphi$, $y = \operatorname{Im} z = |z| \sin \varphi$. Поэтому число z может быть также представлено в виде:

$$z = |z| (\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (\text{П.2.2})$$

который называется тригонометрической формой z . С учетом формулы Эйлера $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$, соотношение (П.2.2) можно переписать в виде:

$$z = |z| e^{j\varphi}, \quad (\text{П.2.3})$$

называемом показательной формой числа z . Очевидно, показательная форма мнимой единицы имеет вид:

$$\pm j = e^{\pm j\frac{\pi}{2}}, \quad (\text{П.2.4})$$

Если аргумент комплексного числа z изменяется с течением времени по закону $\varphi = \omega t + \varphi_0$, где $\omega = \text{const}$, то вектор \vec{OM} вращается в против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω . В соответствии с (П.2.2) его проекция на действительную ось x (т.е. действительная часть z) совершает гармонические колебания с амплитудой $|z|$, круговой частотой ω и начальной фазой φ_0 :

$$x = |z| \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (\text{П.2.5})$$

Следовательно, гармонические колебания (П.2.5) можно изображать на комплексной плоскости с помощью вращающегося вектора, причем его вращение определяется комплексной функцией, которую можно представить в виде:

$$z = |z| e^{j(\omega t + \varphi_0)} = \dot{A} e^{j\omega t}. \quad (\text{П.2.6})$$

Здесь $\dot{A} = |z| e^{j\varphi_0}$ – комплексная амплитуда*, модуль которой $|\dot{A}| = |z|$ равняется амплитуде, а аргумент φ_0 – начальной фазе гармонических колебаний. Очевидно, силу переменного тока и напряжения на отдельных участках цепи также можно представить в виде (П.2.6). Тогда закон Ома в комплексной форме должен давать связь комплексных амплитуд тока и напряжения на участке цепи в виде: $\dot{U} = \dot{Z} \cdot \dot{I}$, где \dot{Z} – комплексное сопротивление цепи. Если же комплексные амплитуды тока и напряжения найдены, то для получения зависимостей $I(t)$ и $U(t)$ вида (П.2.5) соответствующие амплитуды нужно умножить на $e^{j\omega t}$ и выделить в полученных выражениях действительную часть.

Найдем комплексные амплитуды напряжения на активном сопротивлении, емкости и индуктивности, предполагая, что в них течет переменный ток: $I(t) = I_0 \cos(\omega t) = \operatorname{Re}(I_0 e^{j\omega t})$. Для простоты рассуждений начальная фаза тока выбрана равной нулю. В этом случае его комплексная амплитуда содержит только действительную часть и равна: $\dot{I} = I_0$. Поскольку на активном сопротивлении колебания тока и напряжения по фазе совпадают (см. (П.1.2)), соответ-

* Точка над символом (напр., \dot{Z}) означает, что данная величина является комплексной.

вующее комплексное напряжение запишем в виде: $\dot{U}_R \cdot e^{j\omega t}$, где комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_R = \dot{I} \cdot R = I_0 R$ также есть действительное число. На конденсаторе колебания напряжения отстают по фазе от тока на $\pi/2$ (см. (П.1.3)). Поэтому комплексное напряжение на конденсаторе запишем в виде (с учетом (П.2.4)):

$$\frac{I_0}{\omega C} e^{j(\omega t - \pi/2)} = -j \frac{I_0}{\omega C} e^{j\omega t} = \frac{I_0}{j\omega C} e^{j\omega t} = \dot{U}_C e^{j\omega t},$$

где $\dot{U}_C = I_0 X_C$ – комплексная амплитуда напряжения на конденсаторе, а

$X_C = \frac{1}{j\omega C}$ – комплексное емкостное сопротивление. Напряжение на катушке

индуктивности, активное сопротивление которой пренебрежимо мало, опережает по фазе ток на $\pi/2$ (см. (П.1.13)). Следовательно, комплексное напряжение на индуктивности равно:

$$\omega L I_0 e^{j(\omega t + \pi/2)} = j\omega L I_0 e^{j\omega t} = \dot{U}_L e^{j\omega t},$$

где $\dot{U}_L = I_0 X_L$ – комплексная амплитуда напряжения на индуктивности, а

$X_L = j\omega L$ – комплексное индуктивное сопротивление. Заметим, что в соответствии с (П.2.6) комплексные амплитуды \dot{U}_R , \dot{U}_C и \dot{U}_L определяют и амплитуду, и начальную фазу колебаний напряжения на активном сопротивлении, емкости и индуктивности соответственно.

Реальная катушка обладает активным сопротивлением. Поэтому ее можно представить, как последовательно соединенные индуктивное и активное сопротивления. Поскольку при последовательном соединении проводников их сопротивления суммируются, комплексное сопротивление такой катушки равно: $\dot{Z} = R + X_L = R + j\omega L$. Следовательно, комплексная амплитуда напряжения на катушке есть

$$\dot{U}_L = \dot{I} \cdot \dot{Z} = I_0 (R + j\omega L) = I_0 R + j\omega L I_0. \quad (\text{П.2.7})$$

Соотношение (П.2.7) связывает комплексные амплитуды тока и напряжения на участке цепи и представляет собой комплексную форму закона Ома для RL -цепи. Очевидно, при подключении последовательно к катушке дополнительного активного сопротивления $R_{доб}$ под R следует понимать полное активное сопротивление цепи, т.е. $R = R_k + R_{доб}$. Так как комплексное число \dot{U}_L можно изобразить на комплексной

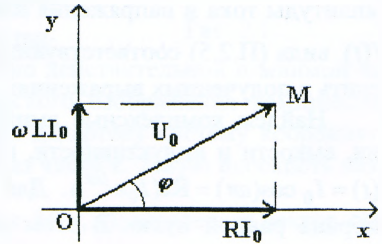


Рис. 2.2.

плоскости с помощью вектора \vec{OM} , соотношению (П.2.7) можно придать геометрическую интерпретацию, представив

его в виде суммы двух векторов (Рис. 2.2). Горизонтальный вектор длиной RI_0 изображает напряжение на активном сопротивлении, а вертикальный – напряжение на индуктивном сопротивлении, которое опережает по фазе силу тока (следовательно, и напряжение на активном сопротивлении) на $\pi/2$. Сам же вектор \vec{OM} изображает напряжение, приложенное к катушке. Напомним, что представление гармонических колебаний с помощью вращающегося вектора называется методом векторных диаграмм. Поэтому Рис.2.2 представляет собой типичную векторную диаграмму напряжений. Закон Ома в комплексной форме (П.2.7) содержит информацию и о амплитуде, и о начальной фазе напряжения. Действительно, из рис.2.2 очевидно, что амплитудное значение напряжения на катушке равно:

$$U_0 = \sqrt{(I_0 R)^2 + (\omega L I_0)^2} = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (\text{П.2.8})$$

При этом напряжение опережает по фазе ток на величину φ , которая находится из соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}. \quad (\text{П.2.9})$$

Итак, если ток в катушке изменяется с течением времени по закону $I = I_0 \cos(\omega t)$, то напряжение на катушке равно:

$$U(t) = \operatorname{Re}(\vec{U}_L e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(U_0 e^{j(\omega t + \varphi)}) = U_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (\text{П.2.10})$$

где амплитуда U_0 и начальная фаза φ определяются соотношениями (П.2.8) и (П.2.9) соответственно. Легко видеть, что соотношения (П.2.8-П.2.10) полностью соответствуют результатам, полученным в пункте в) Приложения 1, причем они получаются из закона Ома для RL -цепи в комплексной форме (П.2.7) без решения дифференциальных уравнений.

Рассмотрим участок цепи, содержащий последовательно включенные конденсатор емкостью C и активное сопротивление R (Рис.2.3). Напряжение на этом участке должно равняться сумме напряжений на емкости и активном сопротивлении, что в комплексной форме можно записать как

$$\begin{aligned} \vec{U} &= \vec{U}_C + \vec{U}_R = I \cdot X_C + I \cdot R = \\ &= I_0 R + \frac{I_0}{j\omega C} = I_0 R - j \frac{I_0}{\omega C}. \end{aligned} \quad (\text{П.2.11})$$

Соотношение (П.2.11) связывает комплексные амплитуды \vec{U} и \vec{I} и представляет собой закон Ома для RC -цепи в комплексной форме. Соответствующая векторная диаграмма

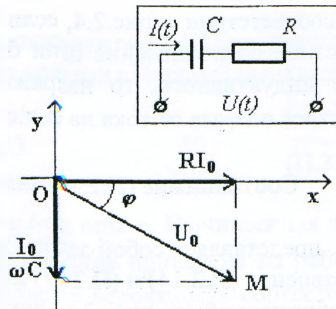


Рис. 2.3

показана на рис. 2.3. Из диаграммы следует, что напряжение на RC -цепи отстает по фазе от тока на величину φ , которая находится из соотношения:

$$\operatorname{ctg} \varphi = \omega CR. \quad (\text{П.2.12})$$

При этом амплитудное значение напряжения равно:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}. \quad (\text{П.2.13})$$

Как видим, закон Ома в комплексной форме (П.2.11) позволяет легко найти амплитуду и начальную фазу колебаний напряжения, приложенного к RC -цепи.

Рассмотрим, наконец, участок цепи, состоящий из последовательно соединенных конденсатора, катушки индуктивности и активного сопротивления (Рис. 2.4), в котором течет переменный ток $I = I_0 \cos(\omega t)$. Комплексное напряжение на участке цепи найдем как сумму напряжений на отдельных ее элементах:

$$U = U_R + U_C + U_L = I_0 R + \frac{I_0}{j\omega C} + j\omega L I_0 = I_0 R - j\left(\frac{I_0}{\omega C} - \omega L I_0\right). \quad (\text{П.2.14})$$

Векторная диаграмма, соответствующая (П.2.14), показана на рис. 2.4. Из нее находим амплитудное значение напряжения

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}. \quad (\text{П.2.15})$$

Сдвиг фаз между током и напряжением определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}. \quad (\text{П.2.16})$$

В соответствии с рис.2.4, если емкостное сопротивление цепи больше индуктивного, то напряжение отстает по фазе от тока на φ , т.е.

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t - \varphi).$$

Соотношение (П.2.14) является выражением вида

$$U = Z \cdot I, \quad (\text{П.2.17})$$

т.е. представляет собой закон Ома для участка RCL -цепи в комплексной форме. Сравнение (П.2.14) и (П.2.17) показывает, что комплексное сопротивление цепи, изображенной на рис. 2.4, находится как сумма комплексных сопротивлений всех ее элементов:

$$Z = R + X_C + X_L = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = R - j\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right). \quad (\text{П.2.18})$$

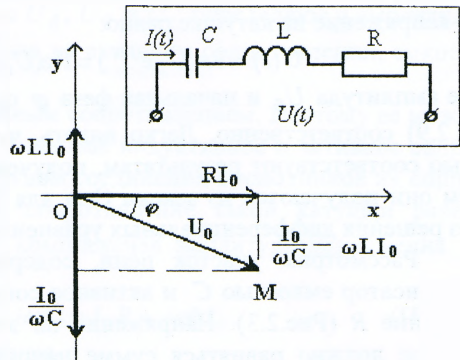


Рис. 2.4.

Таким образом, использование комплексных величин позволяет рассматривать емкость и индуктивность как обычные сопротивления и применять при вычислениях стандартные формулы для сопротивления нескольких проводников, включенных последовательно или параллельно. При этом закон Ома в комплексной форме (П.2.17) позволяет легко получить и амплитудные, и фазовые соотношения между током в цепи и приложенным напряжением.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Использование метода наименьших квадратов для обработки результатов измерений.

Результатом измерений, выполняемых в Заданиях 1, 4 и 5 является таблица пар чисел (x_i, y_i) , где $i = \overline{1, n}$ – номер опыта, причем эти числа должны подчиняться линейной зависимости вида:

$$y = a \cdot x, \tag{П.3.1}$$

где a – некоторая постоянная.

Наилучшее с точки зрения метода наименьших квадратов (МНК) значение постоянной a вычисляется по формуле:

$$a = \frac{\langle x \cdot y \rangle}{\langle x^2 \rangle}, \tag{П.3.2}$$

где

$$\langle x \cdot y \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i, \quad \langle x^2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2,$$

n – число измерений.

При этом погрешность определения постоянной a равна:

$$\Delta a = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (a \cdot x_i - y_i)^2}{n(n-1) \langle x^2 \rangle} \right]^{1/2}. \tag{П.3.3}$$

Проверить, насколько хорошо линейная зависимость (П.3.1) соответствует экспериментальным данным, можно с помощью критерия Пирсона (хи-квадрат). Для этого необходимо вычислить величину

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - a \cdot x_i}{\Delta y_i} \right)^2, \tag{П.3.4}$$

где Δy_i – погрешность измерения величины y в i -ом опыте. Вычисленная величина χ^2 сравнивается с табличным значением (таблица приведена на рабочем месте) и на основании этого сравнения определяется вероятность соответствия экспериментальных данных линейной зависимости (П.3.1).

Пары значений (x_i, y_i) , получаемые при измерениях в Задании 3, должны удовлетворять линейной зависимости вида:

$$y = a \cdot x + b, \tag{П.3.5}$$

где a и b - постоянные.

Наилучшие с точки зрения МНК значения a и b вычисляются по формуле:

$$a = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \cdot \langle x \rangle}, \quad b = \langle y \rangle - a \langle x \rangle, \quad (\text{П.3.6})$$

где

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \langle y \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \langle x^2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \langle xy \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i,$$

n - число измерений. Для доверительной вероятности $P = 95\%$ погрешности Δa и Δb определяется формулами:

$$\Delta a = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{n(n-2)(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \langle x \rangle)} \right]^{1/2}, \quad (\text{П.3.7})$$

$$\Delta b = \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{n(n-2)(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \langle x \rangle)} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \right]^{1/2}. \quad (\text{П.3.8})$$

Проверить, насколько хорошо линейная зависимость (П.3.5) соответствует экспериментальным данным можно, вычисляя величину:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - a \cdot x_i - b}{\Delta y_i} \right)^2, \quad (\text{П.3.9})$$

где Δy_i - погрешность измерения величины y в i -ом опыте. Сравнение вычисленной величины χ^2 с табличным значением дает вероятность соответствия экспериментальных данных линейной зависимости (П.3.5).

Контрольные вопросы.

1. Какими величинами характеризуется переменный синусоидальный ток?
2. Как выглядит закон Ома для участка цепи переменного тока в действительной и комплексной формах в случае RC -, RL - и RCL -цепей?
3. Какой физический смысл имеют активное, индуктивное и емкостное сопротивления?
4. Как с помощью метода векторных диаграмм найти сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока?

Литература.

1. И.В.Савельев. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М., 1977. - С.262-265.
2. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. - М., 1977. - С.573-583.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Прокопеня Александр Николаевич
Каролинский Владимир Григорьевич
Смаль Александр Сергеевич

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ ФИЗИКИ.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Методические указания по выполнению
лабораторной работы Э7
“Изучение законов переменного тока”.

Ответственный за выпуск Прокопеня А.Н.
Редактор Строкач Т.В.

Подписано к печати 22.07.07. Формат 60x84/16. Печать офсетная. Усл. п. л. 1,2.
Уч. изд. л. 1,4. Тираж 200 экз. Заказ № 393 Бесплатно. Отпечатано на ризографе
Брестского государственного технического университета.
224017, Брест, ул. Московская, 267.