\lab{3.2.1}{Сдвиг фаз в цепи переменного тока}

\cel{изучить влияние активного сопротивления, индуктивности и ёмкости на сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока.}

\prin{генератор звуковой частоты (ЗГ), двухканальный осциллограф (ЭО), магазин ёмкостей, магазин сопротивлений, катушка индуктивности, резисторы, измерительный мост переменного тока.}

Удобным, хотя и не очень точным, прибором для измерения фазовых соотношений служит электронный осциллограф. Пусть нужно

измерить сдвиг фаз между двумя напряжениями~$U\_1$ и~$U\_2$. Подадим эти напряжения на горизонтальную и вертикальную развёртки осциллографа. Смещение луча по горизонтали и вертикали определяется выражениями

\[

x=x\_0\cos\Omega t,\qquad y=y\_0\cos(\Omega t+\alpha),

\]

где $\alpha$~--- сдвиг фаз между напряжениями $U\_1$ и $U\_2$, а $x\_0$ и~$y\_0$~--- амплитуды напряжений, умноженные на

коэффициенты усиления соответствующих каналов осциллографа. Исключив время, после несложных преобразований найдём:

\[

\left(\frac{x}{x\_0}\right)^2+ \left(\frac{y}{y\_0}\right)^2+ \frac{2xy}{x\_0 y\_0} \cos\alpha=\sin^2 \alpha.

\]



\rpic{43mm}{2\_1\_1}{\cct Эллипс на экране осциллографа}{1}

Полученное выражение определяет эллипс, описываемый электронным лучом на экране осциллографа (рис.~\r{r1}). Ориентация эллипса зависит как от искомого угла $\alpha$, так и от усиления каналов осциллографа. Для расчёта сдвига фаз можно измерить отрезки $2y\_{x=0}$ и $2y\_0$ (или $2x\_{y=0}$ и $2x\_0$, на рисунке не указанные) и, подставляя эти значения в уравнение эллипса, найти

\[

\alpha=\pm\arcsin\left(\frac{y\_{x=0}}{y\_0}\right).

\]

\noindent Для правильного измерения отрезка $2y\_{x=0}$ важно, чтобы центр эллипса лежал на оси~$y$

Схема установки для исследования сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока представлена на рис. 2\_1\_2). Эталонная катушка~$L$, магазин ёмкостей~$C$ и магазин сопротивлений $R$ соединены последовательно и через дополнительное сопротивление~$r$ подключены к источнику синусоидального напряжения~--- звуковому генератору.



\fcpic{2\_1\_2}{Схема установки для исследования сдвига фаз между током и напряжением}{2}

Сигнал, пропорциональный току, снимается c сопротивления~$r$, пропорциональный напряжению~--- с генератора. Оба сигнала подаются на универсальный осциллограф. Этот осциллограф имеет два канала вертикального отклонения, что позволяет одновременно наблюдать на экране два сигнала. В нашей работе это две синусоиды, смещённые друг относительно друга на расстояние *x*, зависящее от сдвига фаз между током и напряжением в цепи.

Измерение сдвига фаз удобно проводить следующим образом:

1) подобрать частоту развёртки, при которой на экране осциллографа укладывается чуть больше половины периода синусоиды;

2) отцентрировать горизонтальную ось;

3) измерить расстояние $x\_0$ (рис.~\r{r3}) между нулевыми значениями одного из сигналов, что соответствует смещению по фазе на $\pi$;

4) измерить расстояние $x$ между нулевыми значениями двух синусоид и пересчитать в сдвиг по фазе: $\psi=\pi\cdot x/x\_0$. На рис.~\r{r3} синусоиды на экране ЭО сдвинуты по фазе на~$\pi/2$.

На практике часто используется устройство, позволяющее в широких пределах изменять фазу напряжения (0<$pi$<). Такие устройства называются фазовращателями. Схема фазовращателя, входящего в установку для его исследования, изображённую на \p{3}, содержит два одинаковых резистора~$R\_1$, смонтированных на отдельной плате,



\fcpic{2\_1\_3}{Схема установки для исследования фазовращателя}{3}

магазин сопротивлений~$R$ и магазин ёмкостей~$C$. Используя метод комплексных амплитуд, находим зависимость сдвига фаз между входным напряжением $U\_{вх}=U\_0\cos\Omega t$ и выходным напряжением $U\_{вых}$ от соотношения между импедансами сопротивления~$R$ и ёмкости~$C$:

\[

\widehat{U}\_{вых}= \frac{U\_0}{2}\;\frac{R+i/(\Omega C)}{R-i/(\Omega C)}.

\]

В числитель и знаменатель этого выражения входят комплексно-сопряжённые величины, модули которых одинаковы, поэтому величина выходного напряжения не меняется при изменении~$R$. Модуль~$U\_{вых}$ всегда равен $U\_0/2$~---

половине~$U\_{вх}$. Сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями равен $2\arctg[1/(\Omega RC)]$ и меняется от~$\pi$

(при $R\to 0$) до~$0$ (при $R\to\infty$).

\zad

\n В работе предлагается исследовать зависимости сдвига фаз между током и напряжением от сопротивления в *RC*- и в *RL*-цепи; определить добротность колебательного контура, сняв зависимость сдвига фаз от частоты вблизи резонанса, определить диапазон работы фазовращателя.

I. Подготовка приборов к работе

\zn Исследование зависимости сдвига фаз между током и напряжением от $R$ в $RC$-цепи

\n В схеме, собранной согласно \p{3}, закоротите катушку, подключив оба провода, идущих к катушке, на одну клемму. Установите $C=0,5$~мкФ, $\nu=1$~кГц и рассчитайте реактивное сопротивление цепи $X\_1=1/(\Omega C)$. Циклическая частота $\Omega=2\pi\nu$.

\n[p5] Увеличивая сопротивление $R$ от нуля до $10\cdot Z\_1$, проведите измерения сдвига фаз $\psi$ (см. п.~\r{p3}) для 6-8 значений x/x\_0.

Предварительно подберите шаги $\Delta R$, для которых приращения $x$ будут примерно одинаковы. Периодически проверяйте положение нулевой линии синусоиды.

\zn Исследование зависимости сдвига фаз от $R$ в $RL$-цепи

\n В схеме, собранной согласно \p{3}, закоротите магазин ёмкостей. Установите $L=50$~мГн, $\nu=1$~кГц (для катушки со

значением $L=500$~мГн рекомендации смотрите на её корпусе). Рассчитайте реактивное сопротивление цепи $X\_2=\Omega L$.

\n Меняя сопротивление от 0 до 10X\_2 (или до Rmax для $L=500$~мГн), проведите измерения сдвига фаз $\psi$ для $6\div8$ значений $R$.

\zn Исследование зависимости сдвига фаз от частоты в $RCL$-цепи

\n В цепи, собранной согласно рис.~\r{r3}, установите значения $R=0$, $L=50$~мГн, $C=0,5$~мкФ ($C=0,05$~мкФ для $L=500$~мГн),

$R=0$. Рассчитайте резонансную частоту $\nu\_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$.

\n Подбирая частоту ЗГ, добейтесь резонанса. При резонансе сдвиг фаз $\psi=0$ и нулевые значения двух синусоид должны совместиться, а при равенстве амплитуд синусоиды полностью совпадают.

\n[p10] Меняя частоту \aht{в обе стороны} от резонансного значения, снимите зависимость сдвига фаз от частоты. С изменением частоты меняется расстояние $x\_0$, которое занимает половина периода синусоиды, поэтому разумно каждый раз фиксировать отношение $x/x\_0$. Вблизи резонанса ($|\psi|<\pi/3$) точки должны лежать почаще.

\n Повторите измерения п.~\r{p10} для сопротивления $R=100$~Ом.

\n Запишите значение $R\_L$~--- активное сопротивление катушки, указанное на её крышке. Проверьте значения $L$ и $R\_L$ с помощью измерительного моста Е7-8.

\zn Исследование работы фазовращателя

\n Соберите схему, изображённую на рис.~\r{r4}. Убедитесь, что выход ЗГ заземлён. Установите $C=0,5$~мкФ, $\nu=1$~кГц. Оцените визуальнодиапазон изменения сдвига фаз при изменении $R$ от 0 до 10 кОм.

Подберите сопротивление $R$, при котором сдвиг фаз равен $\pi/2$.

\zn Обработка результатов

\n По результатам измерений сдвига фаз в $RC$-цепи постройте график: $\tg\psi=f[1/(\Omega C R\_{\Sigma})]$. Здесь

$R\_{\Sigma}$~--- суммарное активное сопротивление цепи: $R\_{\Sigma}=R+r$; $r=10$~Ом~--- сопротивление резистора.

Постройте теоретический график на этом же листе.

\n Постройте график $\tg\psi=f(\Omega L/R\_{\Sigma})$ для $RL$-цепи. Здесь $R\_{\Sigma}=R+r+R\_L$. Сравните график с

теоретическим.

\n Постройте на одном листе графики $|\psi|=f(\nu/\nu\_0)$ для $R=0$ и~$100$~Ом (величину $\psi$ удобно откладывать в

долях $\pi$).

Определите по графикам добротность контура: $Q=\nu\_0/(2\Delta\nu)$, где $2\Delta\nu/\nu\_0$~--- ширина графика при сдвиге

фаз $\psi=\pi/4$.

\n Сравните добротность, определённую графически, с расчётом через параметры~$L$, $C$ и~$R$ (см.~(\oref{v2\_23})).

\n Постройте векторную диаграмму для фазовращателя; с её помощью рассчитайте сопротивление магазина $R$, при котором сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями равен $\pi/2$. Сравните расчёт с экспериментом.

\n Сведите результаты эксперимента в таблицу:



\n Оцените погрешности и сравните результаты.

{\small

\kv

\n Что называется импедансом электрической цепи?

\n Как складываются импедансы при последовательном и параллельном соединении элементов электрической цепи?

\n Получите формулу для эллипса, представленного на \rpic{43mm}{2\_1\_1}.

\n Получите формулу \widehat{U}\_{вых}.

\n Приведите определения добротности колебательного контура.

\lit

\n \emph {Сивухин Д.В.} Общий курс физики. --- T.~III. Электричество.~--- М.:~ФИЗМАТЛИТ, 2016. \S\S~129,~130.

\n \emph {Калашников С.Г.} Электричество.~---~М.:~ ФИЗМАТЛИТ, 2016. \S\S~220, 227, 228.