

Санкт-Петербургский государственный университет

# **ИМПЕДАНС**

**Описание лабораторной работы № 29**

**ПРОБНАЯ ВЕРСИЯ**

Разработчик описания: Н.Р. Григорьева

Санкт-Петербург

2014

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Методика проведения эксперимента .....	14
2.1. Описание экспериментальной установки.....	14
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений. ....	14
3. Порядок выполнения лабораторной работы .....	16
4. Техника безопасности по работе с приборами .....	17
5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета.....	18
6. Контрольные вопросы .....	19
7. Список рекомендованной литературы и справочные данные .....	20

# 1. Введение

Передача энергии и сигнала по электрическим цепям, состоящим из элементов, обладающих активной и реактивной проводимостью, обусловлена движением зарядов по этим цепям. Движение зарядов сопровождается изменениями электромагнитных полей, возникающих на разных участках цепи, внутри разных ее элементов. Движение зарядов образует ток, характеризующийся такой величиной как сила тока (размерность: кулон/секунда). Другими физическими характеристиками электромагнитных процессов, протекающих в элементах электрической цепи, являются величина ЭДС (электродвижущей силы), действующей в цепи, и падения напряжения на отдельных участках цепи, измеряемых разностью потенциалов (размерность: вольты).

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на активные и пассивные. Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия. К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или (и) алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются линейными, в противном случае они относятся к классу нелинейных. Строго говоря, все элементы являются нелинейными, а возможность рассмотрения их как линейных, определяется границами изменения физических характеристик этих элементов и диапазоном частот тока, действующего в цепи. Для линейных элементов существенно упрощается математическое описание и анализ процессов в цепях.

Все устройства и объекты, входящие в состав электрической цепи, могут быть разделены на три группы:

1. источники (генераторы) электрической энергии;
2. потребители электрической энергии. Общим свойством всех потребителей

является преобразование электроэнергии в другие виды энергии. Часто потребители электрической энергии называются нагрузкой;

3. вспомогательные элементы цепи: соединительные провода, коммутационная аппаратура, аппаратура защиты, измерительные приборы и т.д., без которых реальная цепь не работает.

В зависимости от того изменяется ЭДС источника (генератора) электрической энергии во времени или нет, цепи можно разделить на цепи постоянного и переменного тока. Переменный ток наиболее широко применяется в устройствах связи (радио, телевидение, проволочная телефония на дальние расстояния и т. п.).

В настоящей работе изучаются цепи переменного тока. Переменным током называется любой ток, изменяющийся во времени. Если любые значения переменного тока повторяются через равные промежутки времени  $T$ , то такой ток называется периодическим. Периодический ток должен удовлетворять условию:

$$I(t) = I(t+T).$$

При этом периодическими следует считать токи, которые удовлетворяют приведенному выше соотношению в течение достаточного большого промежутка времени.

Соотношения между физическими величинами, которые используются при описании процессов в цепях переменного тока, включают в себя как мгновенные, так и средние значения этих величин. Причем, если речь идет о мгновенных значениях, считается, что изменение переменной величины происходит достаточно медленно, чтобы можно было считать значение, принадлежащее достаточно короткому промежутку времени установившимся.

Далее будем рассматривать токи, изменяющиеся во времени по гармоническому закону. Теория гармонических токов наиболее проста. Форма такого тока остается неизменной при прохождении сколь угодно сложной цепи. Именно такой ток вырабатывается имеющимися в настоящее время техническими генераторами. Иногда на практике приходится встречаться и с токами более сложной формы. Однако легко показать, что всякое негармоническое (несину-

соидальное) колебание, можно представить в виде суммы синусоидальных (гармонических) колебаний. Поэтому можно свести такую задачу к исследованию гармонических колебаний.

Рассмотрим цепь переменного тока, изменяющегося по синусоидальному закону:

$$I = I_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

где  $I_0$  — амплитуда,  $\omega$  — частота.

Рассмотрим, по какому закону будет меняться напряжение на элементах цепи. Закон изменения напряжения в цепи переменного тока зависит от типа элемента (элементов) включенного в цепь. Будем рассматривать такие элементы цепи как резисторы (активные сопротивления), конденсаторы, катушки индуктивности (реактивные сопротивления).

Наиболее простой случай реализуется тогда, когда в цепь подключено активное сопротивление (рис. 1). Здесь и далее считается, что генератор питающий цепь — идеальный и имеет нулевое внутреннее сопротивление. Тогда, применяя закон Ома к такой цепи, получим:

$$U = I r = I_0 r \sin(\omega t), \quad (2)$$

то есть напряжение изменяется в такой цепи по тому же закону, что и ток. Разность фаз между колебаниями тока и напряжения равна нулю.

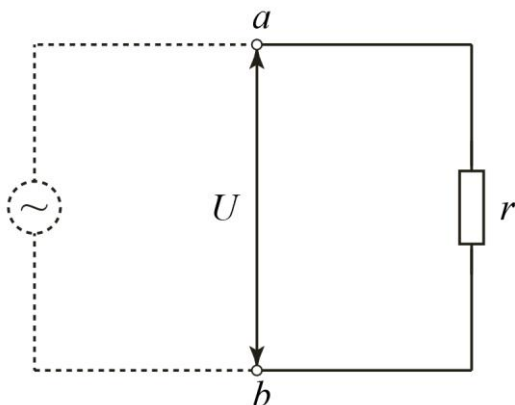


Рис. 1 Резистор в цепи переменного тока.



Рис. 2. Векторная диаграмма для цепи, содержащей резистор.

Соотношения между гармонически меняющимися величинами, наиболее наглядно можно представить в виде векторных диаграмм, поскольку эти величины могут отличаться не только величиной, но и некоторой разностью фаз.

Для построения диаграммы используется вектор, вращающийся на плоскости против часовой стрелки, с угловой скоростью  $\omega$ . Длина вектора соответствует амплитудному значению тока. Проекция такого вектора на ось ординат дают мгновенные значения тока, изменяющегося по синусоидальному закону. Длина вектора, изображающего колебания напряжений, определяется соотношением  $U_0 = I_0 \cdot r$ . Направление вектора определяется сдвигом фаз между током и напряжением. В случае, когда в цепь подключено только активное сопротивление вектор, изображающий напряжение, будет направлен вдоль оси токов (рис. 2).

Теперь рассмотрим случай, когда в цепь включена емкость (рис. 3). Обозначим разность потенциалов в точках  $a$  и  $b$  как  $U = U_a - U_b$ . Напряжение на конденсаторе выражается через заряд и емкость конденсатора:  $U = \frac{q}{C}$ .

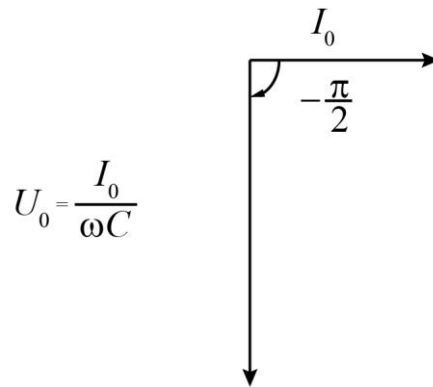
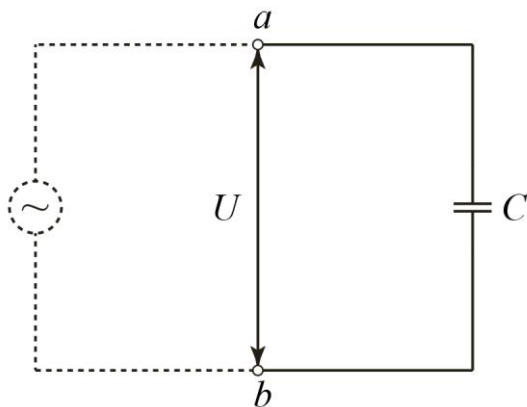


Рис. 3 Конденсатор (емкостное сопротивление) в цепи переменного тока.

Рис. 4. Векторная диаграмма для цепи, содержащей конденсатор.

Найдем заряд на конденсаторе из условия, что ток  $I = dq/dt$ , и, следовательно:  $q = \int I dt$ . Подставим выражение для силы тока в подынтегральное выражение, получим:  $q = \int I_0 \sin(\omega t) dt$ . Таким образом, напряжение на конденсаторе:

$$U = -\frac{I_0}{\omega C} \cos(\omega t) = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

Напряжение изменяется по синусоидальному закону, но колебания напряжения отстают по фазе от колебаний тока на  $\pi/2$ . Это объясняется тем, что напряжение на конденсаторе за период колебаний определяется накапливающимся и убывающим зарядом конденсатора. Поэтому колебания напряжения запаздывают

относительно колебаний тока (проявляется влияние предыдущего состояния).

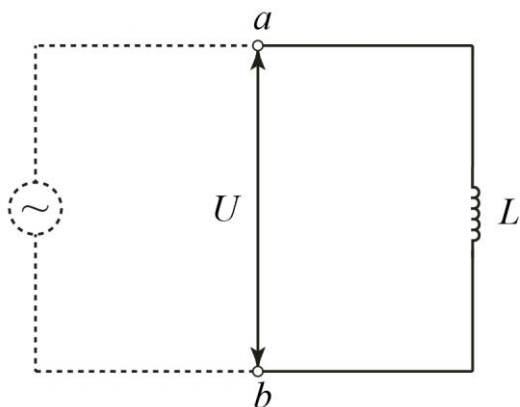
Как следует из выражения (3), амплитуда напряжения на конденсаторе равна:  $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$ . При сравнении полученного соотношения с законом Ома видно, что величина  $r_c = \frac{1}{\omega C}$  играет роль сопротивления. Если выразить  $C$  в Фарадах, а  $\omega$  в обратных секундах, то величина  $r_c$  будет выражаться в Омах. Полученное сопротивление можно назвать реактивным сопротивлением емкости. В этом случае на векторной диаграмме вектор (рис. 4), изображающий колебания напряжения, не совпадает с вектором токов, а повернут в отрицательном направлении (по часовой стрелке) на угол  $\pi/2$ , длина вектора определяется амплитудой напряжения  $\frac{I_0}{\omega C}$ .

Рассмотрим случай, когда в цепь подключена катушка индуктивности (рис. 5). Разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$  равна  $U = U_a - U_b$ . При изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции. Поэтому закон Ома для такой цепи выглядит следующим образом:  $U = Ir - E$ . В идеальном случае  $r = 0$ , и ЭДС самоиндукции  $E = -L \frac{dI}{dt}$ , а напряжение  $U = L \frac{dI}{dt}$ . Если исходить из того, что изменение силы тока описывается выражением (1), то для изменения напряжения получим:

$$U = I_0 \omega L \cos(\omega t) = I_0 \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

При сравнении выражений (1) и (4) видно, что колебания напряжения опережают по фазе колебания тока на  $\pi/2$ . Причина возникновения разности фаз заключается в том, что напряжение зависит от величины ЭДС самоиндукции, которая, в свою очередь, определяется скоростью изменения тока (реакция на изменение тока). Таким образом, как ЭДС, так и напряжение максимально, когда ток проходит через ноль. Амплитуда напряжения равна  $U_0 = I_0 \omega L$ , следовательно, сопротивление участка, содержащего индуктивность равно  $r_L = \omega L$ .

Если  $L$  выражено в Генри, а  $\omega$  в секундах, то величина  $r_L$  выражается в Омах. Это сопротивление можно назвать реактивным индуктивным сопротивлением.



$$U_0 = I_0 \omega L$$

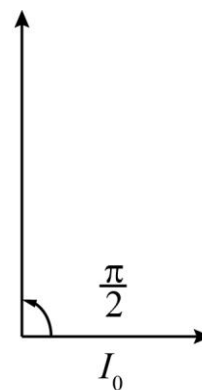


Рис. 5. Катушка (индуктивное сопротивление) в цепи переменного тока.

Рис. 6. Векторная диаграмма для цепи, содержащей катушку.

На векторной диаграмме для цепи, содержащей индуктивность (рис. 6), вектор напряжений будет повернут относительно вектора тока в положительном направлении (против часовой стрелки) на угол  $\pi/2$ . Длина вектора, определяемая амплитудой напряжения равна  $I_0 \omega L$ .

Сопротивления конденсатора (емкостное) и катушки (индуктивное) называют реактивными сопротивлениями в отличие от активного сопротивления резистора не случайно. Рассмотрим, чему равна работа в цепи переменного тока, содержащей эти сопротивления. Пусть цепь содержит только активное сопротивление. Так как сдвига фаз между током и напряжением в этом случае нет, мгновенная мощность переменного тока дается выражением:  $P_t = U_0 I_0 \sin^2(\omega t)$ . Эта величина положительна во все моменты времени. Мощность передается в цепь от генератора и преобразуется в тепло, выделяемое на активном сопротивлении, таким образом, покидая электрическую цепь.

Теперь найдем мгновенную мощность в цепи переменного тока, содержащей реактивное сопротивление. В этом случае выражение для мгновенной мощности:  $P_t = U_0 I_0 \sin(\omega t) \sin\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right)$ . Эта функция меняет свой знак. Изменение знака имеет простой физический смысл. Когда мощность положительна, генератор передает мощность в цепь переменного тока (зарядается конденса-



тор, преодолевается ЭДС самоиндукции). Когда мощность отрицательна, энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора или в магнитном поле катушки, переходит в генератор. Нетрудно показать, что среднее значение мощности за период колебаний равно нулю: энергия, передаваемая за четверть периода в цепь генератором, равна энергии, которая передается внешней цепью генератору в следующую четверть периода. То есть реактивное сопротивление не потребляет мощность.

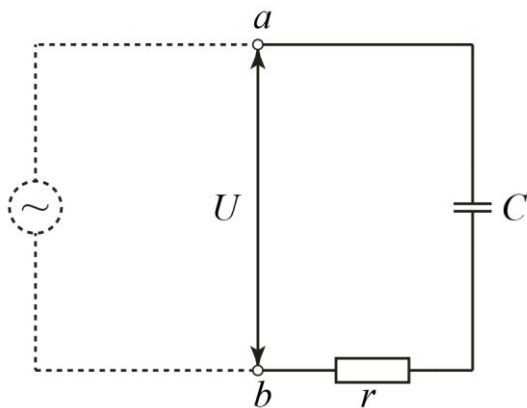


Рис. 7. Последовательное соединение конденсатора и резистора.

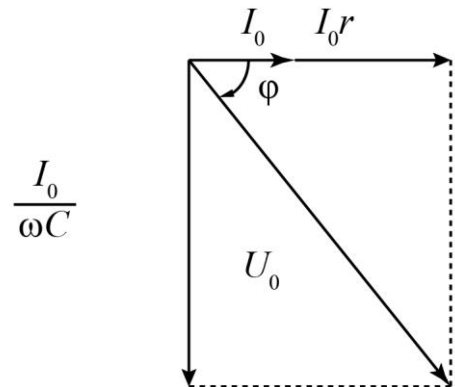


Рис. 8. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 7.

Так же можно найти соотношение между колебаниями тока и напряжения и более сложных цепях. Проведем анализ таких цепей с помощью векторных диаграмм. Пусть в цепь подключены конденсатор (емкостное сопротивление) и резистор (активное сопротивление). Схема приведена на рисунке 7. Ток, как и прежде, изменяется по синусоидальному закону, напряжение равно сумме падений напряжений на емкости  $U_C = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$  и сопротивлении  $U_r = I_0 r \sin(\omega t)$ . Вектора, изображающие колебания напряжений на емкости и сопротивлении, направлены перпендикулярно друг к другу (рис. 8). Сумма двух векторов дает общее падение напряжение на участке. Общее напряжение в цепи меняется по гармоническому закону:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $U_0$  — амплитуда, дается выражением:

$$U_0 = I_0 \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (5)$$

а сдвиг фазы между током и напряжением  $\varphi$  определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{r}{r_c} = \frac{1}{\omega C r}.$$

Сокращая значения токов, из векторной диаграммы напряжений получим треугольник сопротивлений. Полное сопротивление цепи равно векторной сумме реактивного и активного сопротивлений.

Связь (5) имеет место только для амплитудных значений токов и напряжений. **Отношение амплитуды полного напряжения к амплитуде тока является полным сопротивлением цепи для переменного тока:**  $|Z| = \frac{U_0}{I_0}.$

Величину  $Z$  называют **импедансом**. Перенеся векторную диаграмму на плоскость комплексных чисел, импеданс можно представить в виде комплексной величины  $Z = R + iX$ . Действительная часть такой величины будет определяться активным сопротивлением, мнимая — реактивным, величина полного сопротивления цепи равна модулю этого комплексного числа. В рассматриваемом случае оно равно:

$$|Z| = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (6)$$

Пусть элементы цепи включены в цепь параллельно (рис. 9) и действует гармонически изменяющаяся ЭДС

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t).$$

Общий ток есть сумма двух токов  $I = I_r + I_c$ . Ток в ветви  $I_c$ , содержащей емкость, будет опережать напряжение на  $\pi/2$ :  $I_c = \mathcal{E}_0 \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ . Ток в ветви  $I_r$ , содержащей активное сопротивление, изменяется в фазе с напряжением:

$I_r = \frac{\mathcal{E}_0}{r} \sin(\omega t)$ . Построим векторную диаграмму для параллельного подключения

элементов в цепь переменного тока (рис. 10). В этом случае откладываем по выбранной горизонтальной оси напряжение, затем относительно него строим вектора токов, и далее находим векторную сумму токов. Таким образом, ток в цепи:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $I_0 = U_0 \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_c^2}} = U_0 \sqrt{\frac{1}{r^2} + (\omega C)^2}$  — амплитуда,  $\varphi = \arctg \frac{r}{r_c} = \arctg r\omega C$  — сдвиг фаз.

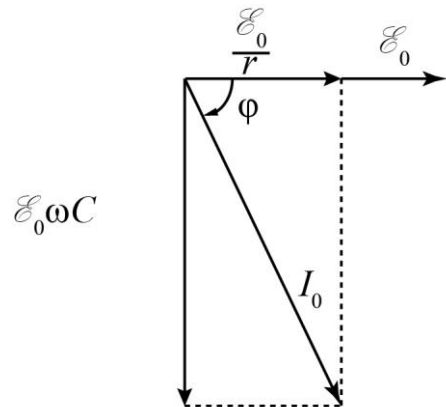
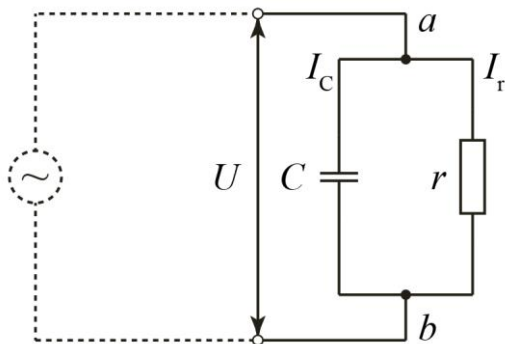


Рис. 9. Параллельное соединение конденсатора и резистора.

Рис. 10. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 9.

Полное сопротивление можно найти из соотношения:

$$\frac{1}{|Z|} = \sqrt{\frac{1}{r^2} + (\omega C)^2}. \quad (7)$$

Аналогично можно рассмотреть цепи, содержащие катушку индуктивности и активное сопротивление. Рассмотрим последовательное соединение элементов (рис. 11). Векторная диаграмма для этого случая приведена на рисунке 12.

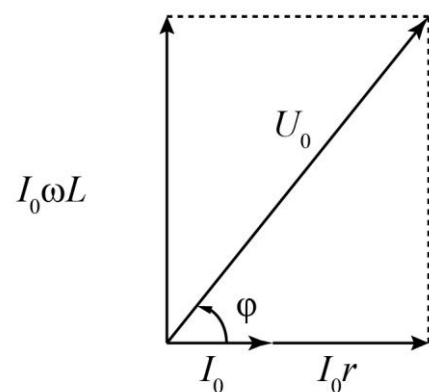
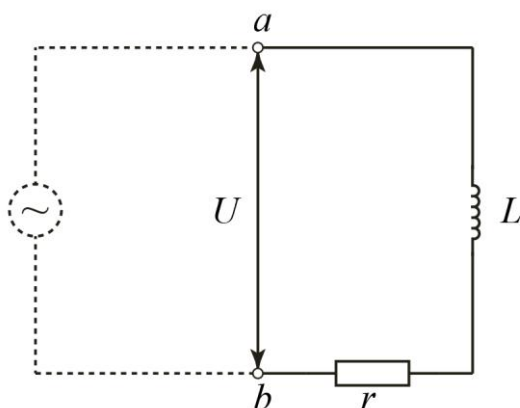


Рис. 11. Последовательное соединение катушки и резистора.

Рис. 12. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 11.

Ток в цепи:  $I = I_0 \sin(\omega t)$ . Напряжение между точками  $a$  и  $b$  есть сумма двух напряжений:  $U_r = I_0 r \sin(\omega t)$  — напряжения на активном сопротивлении и  $U_c = I_0 \omega L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$  — напряжения на катушке индуктивности.

Общее падение напряжения в цепи  $U = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $U_0 = I_0 \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$  — амплитуда напряжения,  $\varphi = \arctg\left(\frac{r_L}{r}\right) = \arctg\left(\frac{\omega L}{r}\right)$  — сдвиг фаз.

Полное сопротивление такой цепи равно:

$$|Z| = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}. \quad (8)$$

Рассмотрим параллельное соединение активного сопротивления и индуктивности (рис. 13). Векторная диаграмма для такой цепи приведена на рисунке 14.

При изменении ЭДС по закону  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t)$  ток, протекающий в ветви, содержащей активное сопротивление, равен  $I_r = \frac{\mathcal{E}_0}{r} \sin(\omega t)$ , а в ветви, содержащей

катушку индуктивности,  $I_L = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ . Полный ток через цепь:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $I_0 = U_0 \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_L^2}} = U_0 \sqrt{\frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}$  — амплитуда,  $\varphi = \arctg \frac{r}{\omega L} = \arctg \frac{r}{r_L}$  — сдвиг фаз.

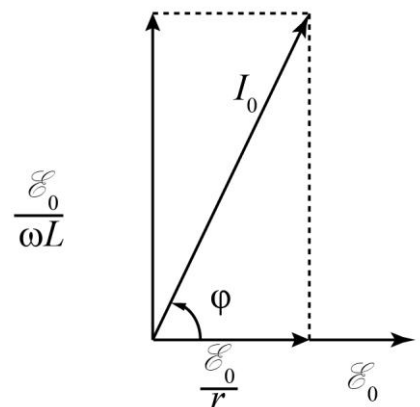
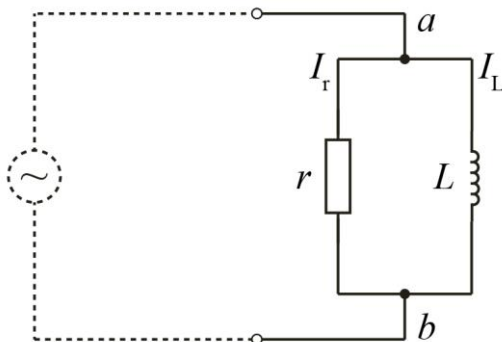


Рис. 13 Параллельное соединение катушки и резистора.

Рис. 14. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 13.

Полное сопротивление цепи находится из соотношения:

$$\frac{1}{|Z|} = \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{(\omega L)^2}}. \quad (9)$$

В случаях, когда в цепь подключены реактивные элементы, импеданс зависит от частоты колебаний протекающего тока. Изменение полного значения сопротивления с частотой определяется тем, какой тип реактивного сопротивления подключен в цепь, и от того, как последовательно или параллельно подключены в цепь элементы. Сдвиг фаз между током и напряжением тоже имеет частотную зависимость.

В настоящей работе предлагается изучить частотные зависимости импеданса, сдвига фаз для цепей, содержащих активное и реактивное сопротивления при их последовательном и параллельном подключении.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Описание экспериментальной установки

Предлагаемые к изучению электрические схемы приведены на рисунке 15. Исследуемая цепь питается от генератора S12. Генератор позволяет подавать на исследуемый объект напряжение синусоидальной формы, пилообразное напряжение и напряжение прямоугольной формы разных частот. Частота сигнала может меняться в диапазоне от 1 Гц до 20000 Гц. Измерения проводятся с помощью двухканального осциллографа. Схема собирается на специальной монтажной плате.

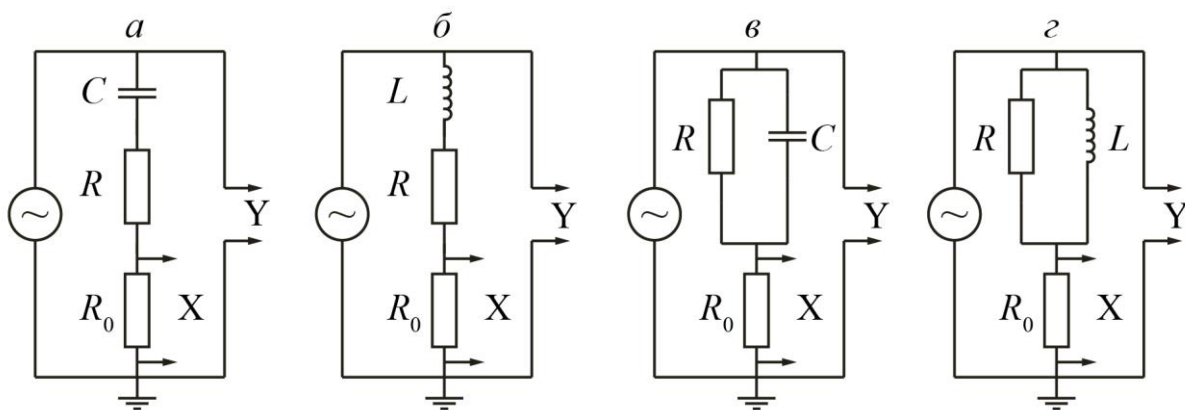


Рис. 15. Схемы электрических цепей, содержащих: а — последовательно подключенные конденсатор и резистор; б — последовательно подключенные конденсатор и катушку; в — параллельно подключенные конденсатор и резистор; г — параллельно подключенные конденсатор и катушку. Схемы содержат:  $R$  — резистор,  $C$  — конденсатор;  $L$  — катушку;  $R_0$  — калибровочный резистор 1 Ом. Стрелками и символами «X» и «Y» обозначены контакты для подключения к соответствующим входам осциллографа.

### 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений.

При изучении частотных характеристик, на входы осциллографа подаются два сигнала:

1. на первый канал осциллографа (на вход X) подается сигнал с резистора  $R_0 = 1$  Ом, включенного последовательно с исследуемой цепью. Этот сигнал пропорционален току в цепи;
2. на второй канал осциллографа (на вход Y) подается сигнал, который форми-

руется за счет падения напряжения на исследуемой цепи.

Сравнение сигналов можно проводить в двух режимах:

1. одновременно вывести на экран две синусоиды, измерить амплитуду синусоид, период и сдвиг фаз;
2. изучить сумму двух сигналов. Сигналы, один из которых подан на горизонтальные пластины осциллографа (канал I), а другой на вертикальные пластины (канал II), представляют собой ортогональные колебания. Так как сигналы обладают одинаковой частотой, в результате их сложения на экране будет наблюдаться эллипс. Вывести эллипс на середину экрана так, чтобы центр эллипса оказался в центре экрана. Измерить размах эллипса по осям X и Y и длину отрезка, отсекаемого эллипсом на оси X. Тогда сдвиг фаз можно получить из соотношения:

$$\sin \varphi = \frac{x}{A},$$

где  $A$  — размах эллипса по оси X;  $x$  — длина отрезка, отсекаемого эллипсом по оси X.

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

Уточнить задание у преподавателя. Собрать, одну из указанных схем (рис. 15). Для этого необходимо выбрать соответствующие (по согласованию с преподавателем) сопротивление, катушку, конденсатор и калибровочное сопротивление из имеющихся в комплектации к работе. Например, можно использовать следующий набор:  $R_0 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $C = 4,7 \text{ мкФ}$ , катушку в 500 витков с  $L = 4,4 \text{ мГн}$ .

1. Подключить регулируемый генератор напряжения, выбрать синусоидальную форму сигнала.
2. Включить и настроить осциллограф.
3. Установить частоту сигнала на генераторе напряжения.
4. Установить параметры развёртки и чувствительность каналов осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
5. Измерить по сетке экрана осциллографа амплитуды синусоидального тока и напряжения.

Амплитудное значение напряжения:

$$U_0 = A \cdot m_{U2},$$

где  $A$  [дел] — амплитуда кривой напряжения в делениях сетки,  $m_{U2}$  [Вольт/дел] — чувствительность второго канала осциллографа в делениях сетки.

Амплитудное значение тока:

$$I_0 = B \cdot m_{U1} / R,$$

где  $B$  [дел] — амплитуда кривой тока в делениях сетки,  $m_{U1}$  [Вольт/дел] — чувствительность первого канала осциллографа в делениях сетки.

6. Измерить фазовый сдвиг между током и напряжением в делениях сетки осциллографа. Сдвиг фаз

$$\varphi = 360 \cdot D / C \text{ (град.)},$$

где  $D$  (дел) — сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа;

$C$  (дел) — период в делениях сетки осциллографа.



7. Провести измерения для 10 разных частот.

При втором способе измерений вывести на экран эллипс, подобрав чувствительность каналов так, чтобы он занимал полный экран, вывести эллипс в центр экрана. Измерить размах эллипса и отрезок, отсекаемый эллипсом по оси X.

Вычислить сдвиг фаз, пользуясь формулой:  $\sin \varphi = \frac{x}{A}$ .

#### **4. Техника безопасности по работе с приборами**

Генератор и осциллограф подключаются к сети переменного тока 220 В. Будьте внимательны при подключении штатных приборов к сети.

## 5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета

Данные об амплитудных значениях тока и напряжения и сдвига фазы занести в таблицу. Рассчитать значения полного и реактивного сопротивлений цепи воспользовавшись формулами (6), (7), (8) и (9) и занести в ту же таблицу. Форма таблицы:

$\omega$ , Гц	$U_0$ , В	$I_0$ , В	$\varphi$ , рад	$Z$ , Ом	$X$ , Ом

Построить на отдельных графиках частотные зависимости полного сопротивления и сдвига фаз между током и напряжением. Сравнить с теоретическими кривыми. Построить векторные диаграммы для исследованных схем. Рассчитать значения емкости (сравнить с номиналом) и индуктивности.

### *Примерная структура отчета:*

1. Цель работы, конкретная постановка задачи.
2. Расчетные формулы с указанием единиц измерения.
3. Схемы исследованных электрических цепей.
4. Таблица с данными об амплитудных значениях напряжения и тока, сдвига фазы между током и напряжением, значение полного и реактивного сопротивления.
5. Графики зависимостей от частоты сдвига фаз между током и напряжением, полного и реактивного сопротивлений. На графике привести сопоставление экспериментальных данных и теоретических зависимостей (сопоставление выполняется с использованием Excel или Origin).
6. Векторные диаграммы для изученных схем.
7. Рассчитанные по полученным данным значения емкости (сравнить с номиналом) и индуктивности.
8. Выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. Что такое идеальные элементы электрической цепи?
2. Как соотносятся по фазе ток и напряжение резистивного (индуктивного, ёмкостного) элемента?
3. Как изменяется во времени энергия, соответствующая резистивному (индуктивному, ёмкостному) элементу?
4. Что такое активная мощность и чему равно её значение для резистивного (индуктивного, ёмкостного) элемента?
5. Какие энергетические процессы связаны с протеканием переменного тока через резистивный (индуктивный, ёмкостный) элемент?
6. Чему равно индуктивное (ёмкостное) сопротивление при очень высокой или очень низкой частоте?
7. Какой знак имеет реактивное (индуктивное и ёмкостное) сопротивление?
8. Дайте определение полного сопротивления цепи переменного тока?
9. Что такое импеданс?
10. Как можно рассчитать величину полного сопротивления цепи переменного тока?
11. Чему равно среднее значение мощности индуктивного (ёмкостного) элемента и почему?
12. В чём принципиальное отличие резистивного элемента от индуктивного и ёмкостного?

## 7. Список рекомендованной литературы и справочные данные

1. С.Г. Калашников. *Электричество*. Изд. 6. М. Физматлит. 2003.
2. Д.В. Сивухин. *Общий курс физики. Т. 3. Электричество*. Изд.3. М., Физматлит, 2005.
3. Э.Парселл. *Берклевский курс физики. Т.3. Электричество и магнетизм*. Изд.3. М., Наука, 1983.
4. А.Портис. *Берклевский курс физики. Физическая лаборатория*. Изд.2. М., Наука, 1978.