

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра радиофизики и электроники

С. Г. Новиков, Е. В. Лычагин, А. С. Кадочкин, С. В. Елисеева

Цепи переменного тока

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Электротехника и электроника»

Ульяновск 2014

УДК 621.314

ББК 32.884.16-57 я73

Н73

*Печатается по решению Ученого совета
инженерно-физического факультета высоких технологий
Ульяновского государственного университета
(протокол № 02/02-19-10 от 18.02.2014)*

Рецензенты:

кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе
ФГБУН Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН *А.А. Черторийский*,
кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физического материаловедения
ФГБОУ «Ульяновский государственный университет» *И.О. Явтушенко*

Новиков С. Г.

Н73 Цепи переменного тока : методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электротехника и электроника» / С. Г. Новиков, Е. В. Лычагин, А. С. Кадочкин, С. В. Елисеева. – Ульяновск : УлГУ, 2014. – 76 с.

В методических указаниях к лабораторным работам по дисциплине «Электротехника и электроника» определены цели, задачи и порядок выполнения лабораторных работ, требования к содержанию отчета по работе. В описании каждой лабораторной работы приводятся краткие теоретические сведения по исследуемому объекту и сформулированы контрольные вопросы. В экспериментальной части раскрывается техника проведения эксперимента. Работы знакомят студентов с определением параметров и характеристик основных элементов и методов анализа электрических цепей.

Пособие содержит пять лабораторных работ и предназначено для студентов инженерных специальностей.

УДК 621.314

ББК 32.884.16-57 я73

© Новиков С.Г., Лычагин Е.В., Кадочкин А.С., Елисеева С.В., 2014

© Ульяновский государственный университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цели и задачи лабораторного практикума	4
2. Правила оформления отчета по лабораторной работе	5
3. Порядок отчетности и приема зачета по лабораторным работам	6
4. Описание лабораторного стенда	7
5. Лабораторные работы	13
5.1. Лабораторная работа № 1. Электрическая емкость. Конденсаторы.....	13
5.2. Лабораторная работа № 2. Индуктивность. Катушки индуктивности.	21
5.3. Лабораторная работа № 3. Цепи синусоидального тока.....	27
5.4. Лабораторная работа № 4. Колебательные контуры.....	42
5.5. Лабораторная работа № 5. Трансформаторы	58
6. Литература	72
Приложение	73

1. Цели и задачи лабораторного практикума

Цели:

1. Ознакомление с работой лабораторного оборудования и измерительных приборов.
2. Рассмотрение и углубление профессиональных знаний.
3. Получение практических навыков постановки экспериментов по исследованию электронных элементов и компонентов.

Задачи:

1. Сформировать представление о принципах работы электронных элементов и узлов.
2. Изучить работу основных электронных элементов.
3. Ознакомиться с основными параметрами электронных элементов и компонентов.
4. Расширить знания об областях применения электронных элементов и компонентов.

Рабочее задание к каждой работе предусматривает:

1. Предварительную домашнюю подготовку студента к выполнению лабораторной работы, включающую:
 - проработку рекомендуемой литературы (см. раздел 5) и описания настоящих методических указаний по исследуемому объекту;
 - ответы на контрольные вопросы;
 - заготовку отчета (бланка протокола исследований) по выполняемой работе в соответствии с правилами оформления (см. раздел 2) со свободными местами для внесения результатов экспериментов и формулирования выводов по работе;
 - заготовку (при необходимости) требуемого количества листов кальки или клетчатой бумаги для копирования осциллограмм с экрана осциллографа.
2. Получение индивидуального задания (номера варианта) каждой бригадой студентов.
3. Ознакомление с лабораторным оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.
4. Проведение эксперимента по определению параметров и характеристик исследуемого объекта.

5. Выполнение необходимых расчетов и сравнение их результатов с данными экспериментальных исследований.
6. Формулирование выводов и оформление отчета по лабораторной работе.

2. Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет оформляется на листах белой (клетчатой) бумаги формата А4 (210×297 мм) или близком к нему. Допускается использовать обе стороны листа.

Текст следует оформлять с соблюдением размеров полей: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху – 20 мм, снизу – 30 мм.

Титульный лист отчета оформляется следующим образом:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ульяновский государственный университет»
Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра радиофизики и электроники**

Дисциплина «Электротехника и электроника»

**ОТЧЕТ
по лабораторной работе**

_____ (название работы)

Выполнил(и) студент(ы) группы _____ (группа) _____ (ФИО)

Ульяновск _____ (год)

Отчет должен содержать:

цель работы;

задание с исходными данными;

описание по пунктам выполненной работы с приведением необходимых схем, рисунков, таблиц, графиков, а также расчетных формул с численными значениями;

выводы по каждому пункту экспериментальной части задания.

Текст отчета, рисунки, таблицы выполняются чернилами, фломастером или пастой одного цвета и оформляются в соответствии с требованиями к отчетам по научно-исследовательским работам (ГОСТ 7.32-2001). Рисунки обязательно должны иметь номер и подрисовочные подписи, таблицы – номер и наименование.

Принципиальные схемы и схемы замещения представляются в виде рисунков и должны соответствовать ГОСТ 2.702-75, а обозначения в схемах – ГОСТ 2.721-74.

Графики представляются в виде рисунков и должны иметь поясняющие обозначения или надписи, указывающие на принадлежность к экспериментальным или расчетным характеристикам.

Рисунки, оформленные на кальке или клетчатой (миллиметровой) бумаге, в отчете размещаются по ходу описания работы и должны быть приклеены.

Все листы отчета должны быть пронумерованы и скреплены.

3. Порядок отчетности и приема зачета по лабораторным работам

Зачет по каждой лабораторной работе ставится преподавателем при наличии правильно оформленного отчета и в результате индивидуального собеседования со студентами по выявлению у них знаний и практических навыков по исследуемому объекту.

Допускается оформление одного отчета на бригаду студентов.

Прием зачета по лабораторной работе проводится во время текущего занятия или в любой период времени последующих занятий. Студенты, имеющие к началу очередного занятия более двух задолженностей, к занятию не допускаются.

По окончании лабораторного практикума организуется зачетное за-

нятие, на котором преподавателем подводятся итоги выполнения работ и после сдачи всех задолженностей проводится устный опрос студентов по тематике лабораторного практикума.

4. Описание лабораторного стенда

Основными компонентами лабораторного стенда являются:

блок генераторов напряжений;

наборная панель;

набор миниблоков;

набор трансформаторов;

блок мультиметров;

ваттметр;

соединительные провода и перемычки, питающие кабели.

Для осуществления в полном объеме всех экспериментов, описанных в данном руководстве, необходим двухканальный осциллограф, имеющий режим работы «X-Y».

Общая компоновка лабораторного стенда показана на рис. 4.1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков может изменяться для проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из миниблоков, может устанавливаться и непосредственно на столе.

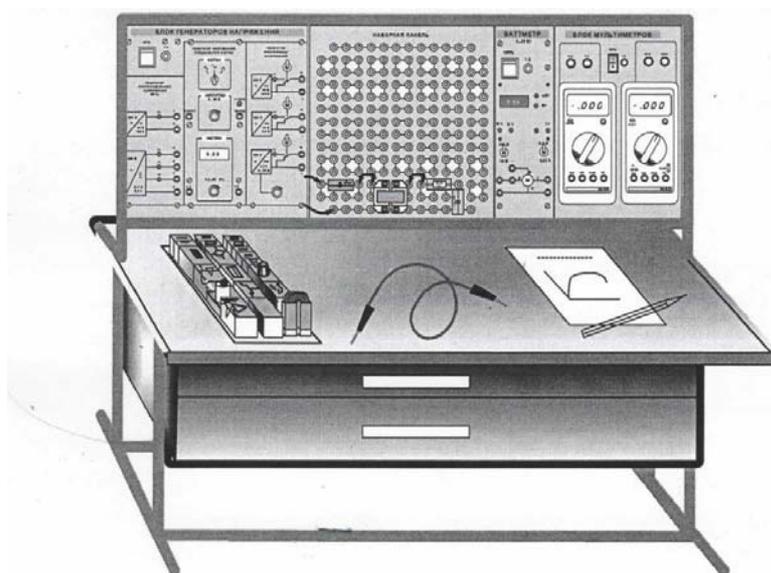


Рис. 4.1. Лабораторный стенд

В выдвижных ящиках хранятся наборы миниблоков и устройств, соединительные провода, переключки и кабели, методические материалы. Один из наборов миниблоков показан на рис. 4.1 на столе. Ящики имеют встроенные замки.

Лицевая панель **блока генераторов** напряжений показана на рис. 4.2. Блок состоит из генератора синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

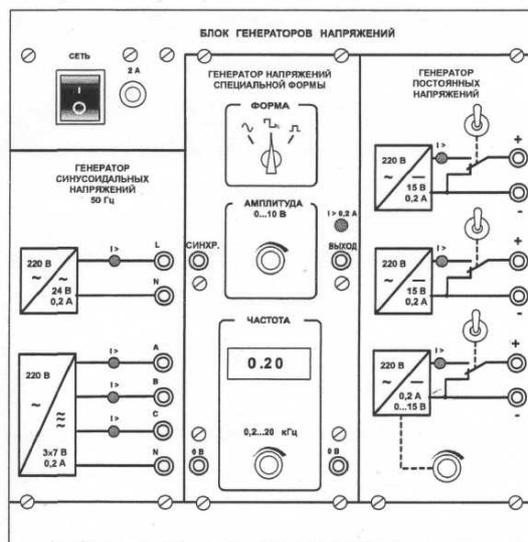


Рис. 4.2. Лицевая панель блока генераторов

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А.

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I>».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24 В (вторичная обмотка питающего трансформатора 220/24 В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «**ФОРМА**». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «**СИНХР**» и «**0 В**» генератора при любом положении переключателя «**ФОРМА**» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5 В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «**ЧАСТОТА**» и не зависит ни от формы и амплитуды сигнала, ни от тока нагрузки.

Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15 В, гальванически изолированных друг от друга. Выходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю, и все они допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15 В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

Наборная панель (рис. 4.3) служит для расположения на ней микроблоков в соответствии со схемой опыта.

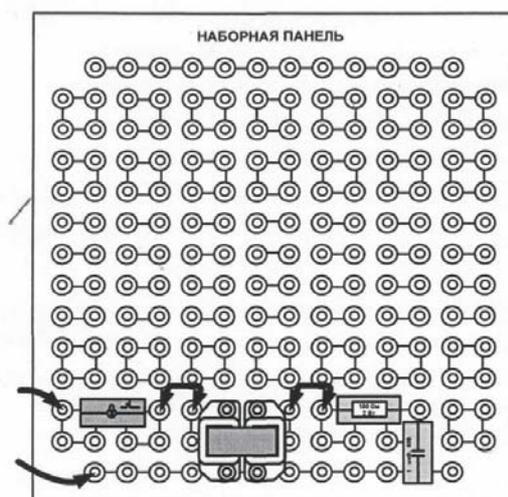


Рис. 4.3. Наборная панель

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке

миниблоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками. Так, на фрагменте цепи, показанной на рис. 3, напряжение подаётся проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и вместо неё в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.

Миниблоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые миниблоки содержат несколько элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках миниблоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Миниблоки хранятся в специальном контейнере.

Большинство миниблоков содержат по одному элементу электрических цепей. Состав этого набора приведён в табл. П.3 приложения.

Набор трансформаторов включает в себя четыре разборных трансформатора, выполненных на разъёмных U-образных сердечниках из электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16x12 мм. На трёх трансформаторах установлены катушки 900/300 витков, на четвёртом 100/100 витков, однако они легко переставляются. Номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. П.4 приложения.

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 4.4. В нём установлены два серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводятся в руководстве по эксплуатации. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

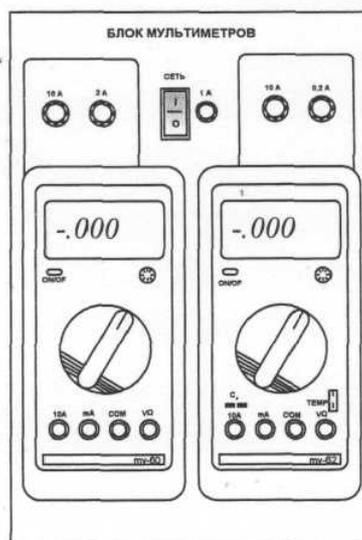


Рис. 4.4. Блок мультиметров

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы;

когда порядок измеряемой величины не известен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину;

перед тем как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи;

не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение;

не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.

Будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющих в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищен предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- 1) выбор измеряемой величины: $-V$, $\sim V$, $-A$, $\sim A$ или ;

- 2) выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- 3) правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 4.5.

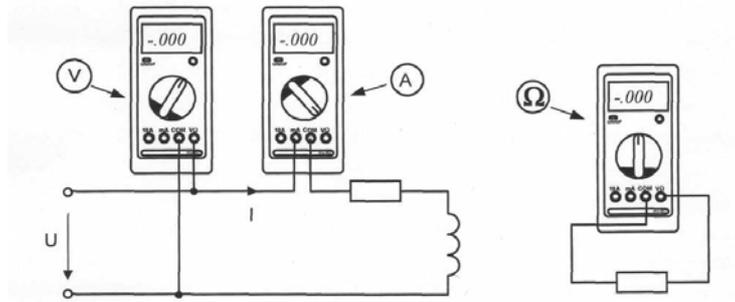


Рис. 4.5. Присоединение мультиметра

Общий вид **ваттметра** приведен на рис. 4.6. Его принцип действия основан на перемножении мгновенных значений тока и напряжения и отображении среднего значения этого произведения на дисплее прибора в цифровом виде.

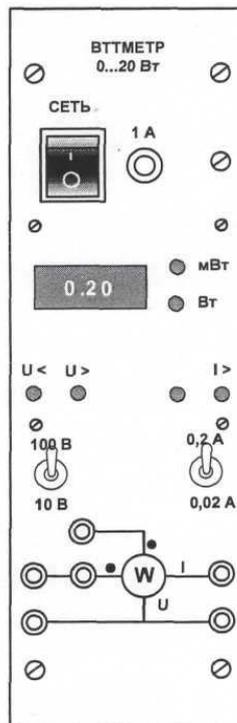


Рис. 4.6. Ваттметр

Прибор включается в цепь согласно приведённой на лицевой панели

схеме. Для измерения активной мощности гнезда, помеченные символом «•», должны быть соединены перемычкой. После сборки схемы необходимо включить выключатель «СЕТЬ» и установить необходимые пределы измерения по току и по напряжению тумблерами. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки «I>» или (и) «U>». Если, наоборот, предел превышен, то включается сигнализация «I<» или (и) «U<». Справа от окошка цифровых индикаторов с помощью светодиодов автоматически указывается размерность: Вт или мВт.

5. Лабораторные работы

5.1. Лабораторная работа № 1

Электрическая емкость. Конденсаторы

Цель работы: исследовать осциллограммы тока $i_C(t)$ и напряжения $u_C(t)$ для конденсатора; построить экспериментальную и расчетную зависимости реактивного сопротивления X_C от частоты сигнала; определить эквивалентную емкость последовательного и параллельного соединения конденсаторов.

Задачи:

1. Выполнить эксперименты по исследованию электрических цепей, содержащих конденсаторы.
2. Построить графики.
3. Сделать выводы по работе.

Общие сведения

Между двумя любыми проводящими телами, разделенными диэлектриком, существует электрическая емкость. Для создания определенного значения электрической емкости служат конденсаторы. Плоский конденсатор состоит из двух проводящих пластин (обкладок), разделенных диэлектриком. Если заряд на одной обкладке конденсатора $+q$, на другой $-q$, то в пространстве между обкладками существует электрическое поле и имеется напряжение U . Заряд q пропорционален U :

$$q = CU. \quad (5.1.1)$$

Коэффициент пропорциональности C называют емкостью:

$$C=q/U. \quad (5.1.2)$$

Емкость зависит от геометрических размеров конденсатора и от диэлектрика между обкладками. От величины напряжения U емкость, как правило, не зависит. Единицей емкости является фарад (Ф) или более мелкие единицы, например, микрофарад: $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$. На схемах емкостной элемент изображают так, как показано в табл. П.1 приложения.

Чтобы определить взаимосвязь тока $i_C(t)$, текущего через конденсатор, и напряжения $u_C(t)$ на нем, нужно продифференцировать выражение (5.1.1) по времени:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (5.1.3)$$

При приложении к конденсатору переменного напряжения он будет заряжаться или разряжаться. Ток, при котором наблюдается увеличение напряжения, является током заряда.

Если к конденсатору подключить синусоидальное напряжение $u_C(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$, периодически будет меняться полярность заряда конденсатора. Ток в конденсаторе, согласно (5.1.3), равен $i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} = U_m \omega C \cos(\omega t + \varphi_u) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$, где $I_m = U_m C$, $\varphi_i = \varphi_u + 90^\circ$ (рис. 5.1.1). Таким образом, синусоида тока i_C опережает синусоиду напряжения u_C на 90° . Фазовый сдвиг $\varphi = \varphi_i - \varphi_u = 90^\circ$.

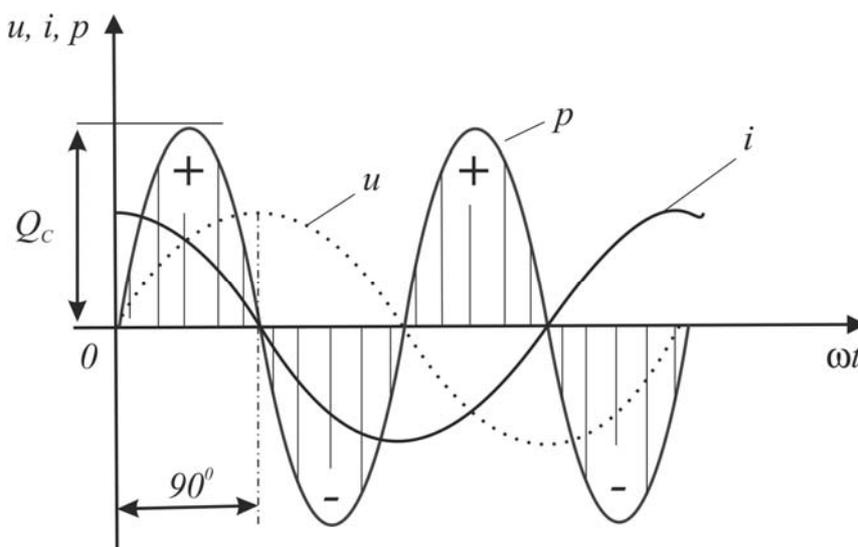


Рис. 5.1.1

Амплитуда синусоидального напряжения на конденсаторе пропорциональна амплитуде тока:

$$U_m = I_m / (C).$$

Коэффициент пропорциональности $X_C = 1/(C)$ называется ёмкостным (или реактивным) сопротивлением конденсатора. Таким образом, амплитуды и действующие значения тока и напряжения на конденсаторе связаны выражением, аналогичным закону Ома:

$$U_m = X_C I_m.$$

Ёмкостное сопротивление уменьшается с увеличением частоты. Реактивному сопротивлению конденсатора присваивают знак «-» в отличие от индуктивного реактивного сопротивления, которому приписывают знак «+».

Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором, определяется как произведение напряжения и тока:

$$p(t) = ui = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

График мощности (рис. 5.1.1) представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой

$$Q_C = U_m I_m / 2.$$

Когда $p > 0$, конденсатор заряжается, потребляя энергию и запасая ее в электрическом поле. Когда $p < 0$, он отдает ее другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина Q_C является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой конденсатором, и называется емкостной реактивной мощностью. Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр). Средняя за период мощность, потребляемая конденсатором, равна нулю.

В электрических цепях встречается последовательное и параллельное соединение конденсаторов.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 5.1.2) напряжение на них одинаковое, но каждый конденсатор накапливает собственный заряд. Поэтому общий заряд представляет собой сумму зарядов каждого конденсатора:

$$q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3 = C_1 u + C_2 u + C_3 u = (C_1 + C_2 + C_3) u.$$

Учитывая, что $q_{\Sigma} = C_{\Sigma} u$, находим, что эквивалентная емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3.$$

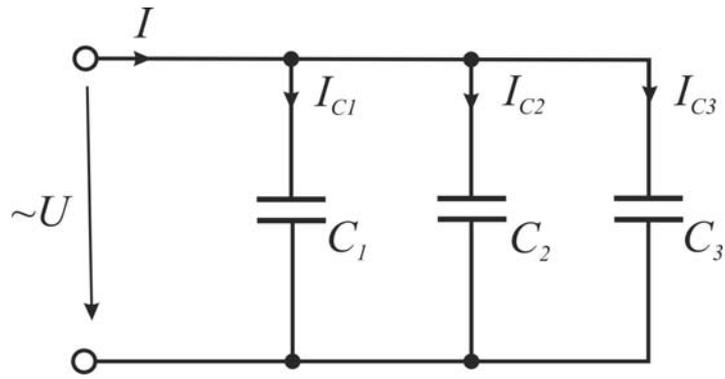


Рис. 5.1.2

Токи в параллельных ветвях (конденсаторах) пропорциональны соответствующим емкостям, причем сумма токов ветвей равна общему току цепи i .

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 5.1.3) общее напряжение определяется суммой напряжений на каждом конденсаторе. Ток в любой точке последовательной цепи один и тот же, поэтому все конденсаторы обладают одинаковым зарядом: $q_{\text{э}}=q_1=q_2=q_3$. Тогда

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3} = q_{\text{э}} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right).$$

Отсюда следует, что эквивалентная емкость последовательно соединенных конденсаторов равна

$$C_{\text{э}} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)^{-1}.$$

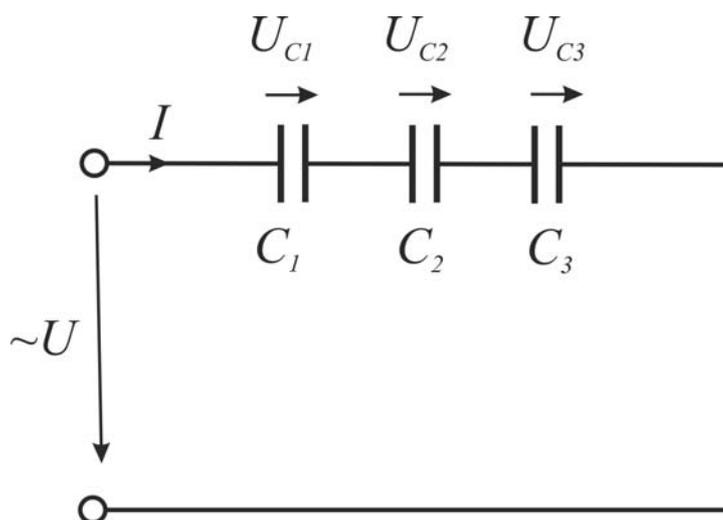


Рис. 5.1.3

Если последовательно соединено только 2 конденсатора, общая емкость равна

$$C_3 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Как видно, эквивалентная емкость меньше емкости наименьшего конденсатора.

Порядок выполнения эксперимента

1. Получите у преподавателя номер варианта. Величины, соответствующие вашему варианту, указаны в табл. 5.1.1.

Таблица 5.1.1

№ варианта	1	2	3	4
C_1 , мкФ	0,1	0,22	0,47	1,0
C_2 , мкФ	0,01	0,1	0,22	0,47
C_3 , мкФ	0,22	0,47	1,0	0,1
U , В	7	8	9	10
f , кГц	4,0	2,0	1,0	0,5

2. Соберите цепь согласно схеме на рис. 5.1.4, подключите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение с действующим значением U и с частотой f . Напряжение с конденсатора $u_C(t)$ подаётся на первый канал осциллографа, а инвертированное напряжение с токосъемного сопротивления $u_R(t) = R_I i_C(t)$ – на второй.

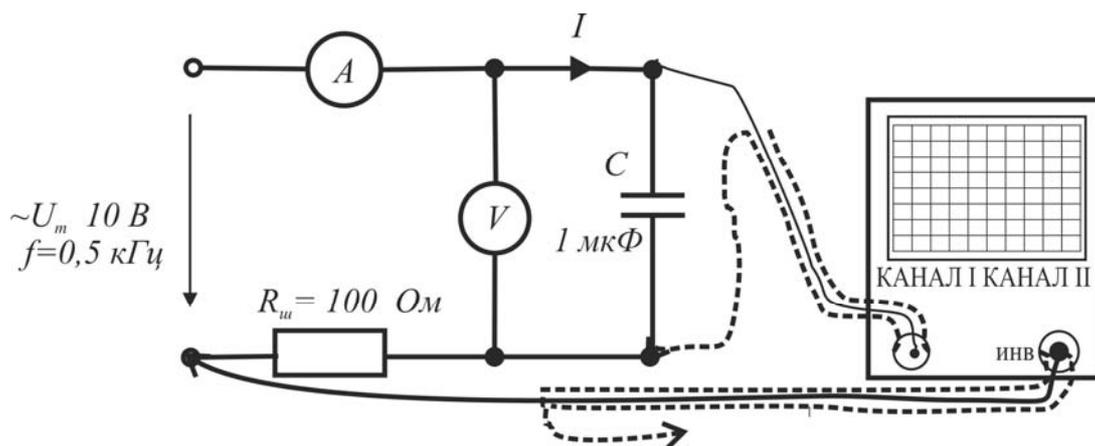


Рис. 5.1.4

3. Установите параметры развёртки и усиления осциллографа так, чтобы на экране было изображение полутора периодов напряжения и тока. Для измерений используйте режим прерывистого (не поочерёдного!)

изображения сигналов двух каналов осциллографа. Перенесите кривые $u_C(t)$ и $u_R(t)$ на миллиметровую бумагу, укажите на ней масштаб по оси времени, а также масштабы для каналов $u_C(t)$ и $u_R(t)$.

По каналу I: $m_u = \dots$ В/дел., по каналу II: $m_I = m_u / R_{uu} = \dots$ мА/дел.

Период: $T = C \cdot m_t = \dots$ мс, где $C = \dots$ дел. – период в делениях сетки осциллографа, $m_t = \dots$ мс/дел. – чувствительность осциллографа по каналу развертки. Фазовый сдвиг: $|\phi| = 360 \cdot D / C = \dots$ град. где $D = \dots$ дел. – сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа, $C = \dots$ дел. – период в делениях сетки осциллографа.

4. Определите период, фазовый сдвиг между напряжением $u_C(t)$ и током $i_C(t)$, а также максимальную мощность по формуле $Q_C = U_m I_m / 2$, учитывая, что $I_m = U_{mR} / R_T$. Результаты занесите в отчет по лабораторной работе.
5. Отсоедините от схемы осциллограф. Изменяя частоту сигнала, измерьте действующие значения тока I_C и напряжения U на конденсаторе мультиметрами при различных значениях частоты, указанных в табл. 5.1.2.

Таблица 5.1.2

f , кГц	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0
U , В					
I_C , мА					
U/I , кОм					
X_C , кОм					

6. Рассчитайте ёмкостные сопротивления по результатам этих измерений как U/I_C и по формуле: $X_C = 1 / (2 f C)$. Постройте экспериментальный и расчетный графики $X_C(f)$. Сравните результаты.
7. Соберите цепь с параллельным соединением конденсаторов как на рис. 5.1.5 и установите напряжение с действующим значением U и с частотой f . Для измерения токов одним прибором вставьте в соответствующих местах схемы перемычки.

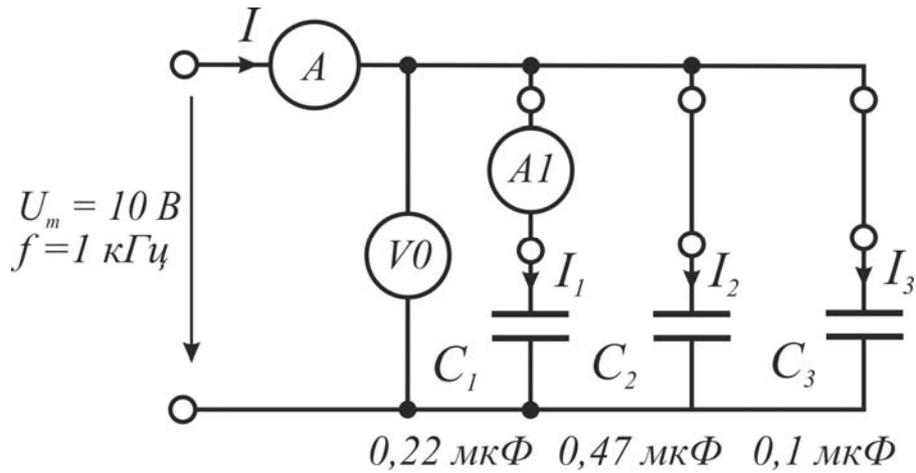


Рис. 5.1.5

8. Поочерёдно меняя перемычки на амперметр (мультиметр в режиме амперметра), измерьте общий ток цепи I , токи параллельных ветвей. Измерьте точно напряжение на конденсаторах U , занесите данные измерений в табл. 5.1.3.

Таблица 5.1.3

	U , В	I , мА	X_C , Ом	C , мкФ	Заданные значения C , мкФ
C_1					
C_2					
C_3					
$C_Э$					$C_Э = C_1 + C_2 + C_3 = \dots$

9. На основе полученных результатов измерений вычислите емкостные реактансы X_{C1} , X_{C2} , X_{C3} , $X_Э$ по формуле $X_C = U/I_C$, а также определите емкости отдельных конденсаторов и эквивалентную емкость цепи по формуле $C = 1/(2 f X_C)$. Результаты занесите соответствующие строки в табл. 5.1.3.
10. В столбец «Заданные значения» табл. 5.1.3 занесите величины емкостей, заданные для вашего варианта, а также вычислите $C_Э$. Сравните значение емкости $C_Э$, найденное экспериментально, с рассчитанным.
11. Соберите цепь с последовательным соединением конденсаторов по схеме на рис. 5.1.6. Измерьте с помощью мультиметра действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждом конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл. 5.1.4.

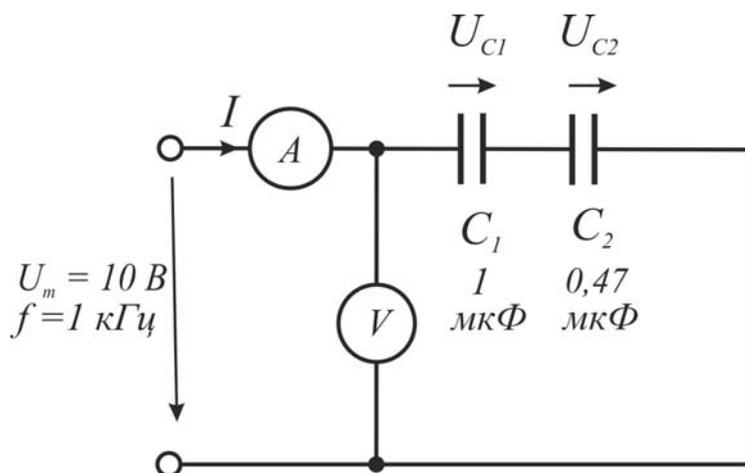


Рис. 5.1.6

Таблица 5.1.4

	U , В	I , мА	X_C , Ом	C , мкФ	Заданные значения C , мкФ
C_1					
C_2					
C_3					$C_3 = (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)^{-1} = \dots$

12. Вычислите емкостные реактансы X_3 , X_{C1} , X_{C2} по формуле $X_C = U/I_C$, а также определите емкости отдельных конденсаторов и эквивалентную емкость цепи по формуле $C = 1/(2 f X_C)$. Результаты занесите соответствующие строки в табл. 5.1.4.

13. В столбец «Заданные значения» табл. 5.1.4 занесите величины емкостей, заданные для вашего варианта, а также вычислите C_3 . Сравните значение емкости C_3 , найденное экспериментально, с рассчитанным.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая емкость?
2. Почему возникает напряжение между обкладками конденсатора?
3. Покажите взаимосвязь тока, текущего через конденсатор, и напряжения на нем.
4. Почему в эксперименте разность фаз между током и напряжением меньше 90 ?
5. Что такое реактивное сопротивление конденсатора?
6. Что такое реактивная мощность? Чему равна энергия, накопленная в заряженном конденсаторе?
7. Как определяется эквивалентная емкость последовательно и параллельно соединенных конденсаторов?

5.2. Лабораторная работа № 2

Индуктивность. Катушки индуктивности

Цель работы: исследовать осциллограммы тока $i_L(t)$ и напряжения $u_L(t)$ для индуктивности; построить экспериментальную и расчетную зависимости реактивного сопротивления X_L от частоты сигнала; определить эквивалентную индуктивность последовательного и параллельного соединения катушек индуктивности.

Задачи:

1. Выполнить эксперименты по исследованию электрических цепей, катушки индуктивности.
2. Построить графики.
3. Сделать выводы по работе.

Общие сведения

Каждый проводник с током i создает вокруг себя магнитное поле. Если проводник уложен в виде контура, например в виде кольца, создаваемое им потокосцепление (магнитный поток, пронизывающий этот контур) определяется как

$$\psi = L_K i,$$

где L_K – индуктивность контура, зависящая от геометрических параметров контура и свойств пространства. Для электрических цепей особое значение имеют так называемые соленоиды, представляющие собой катушки с большим количеством витков, намотанных одним проводом на одном сердечнике. В этом случае магнитный поток, создаваемый отдельным витком, в основном пронизывает и другие витки. При протекании тока i через катушку совокупный магнитный поток Φ представляет собой сумму частных потокосцеплений и равен

$$\Phi = Li,$$

где L – индуктивность катушки, зависящая от его геометрических параметров, количества витков и свойств пространства. Индуктивность измеряется в Генри (Гн) и меньших единицах, например, $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$. Катушки индуктивности в электрических цепях изображают, как показано в табл. П.1 приложения.

Если в катушке индуктивности ток изменяется, магнитный поток также будет изменяться, и, в соответствии с законом Фарадея, в ней будет возникать ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -L \frac{\partial i}{\partial t}.$$

При синусоидальном токе $i_L(t) = I_m \sin t$ напряжение на катушке $u_L = -e_L = LI_m \cos t$ опережает ток на 90° (рис. 5.2.1).

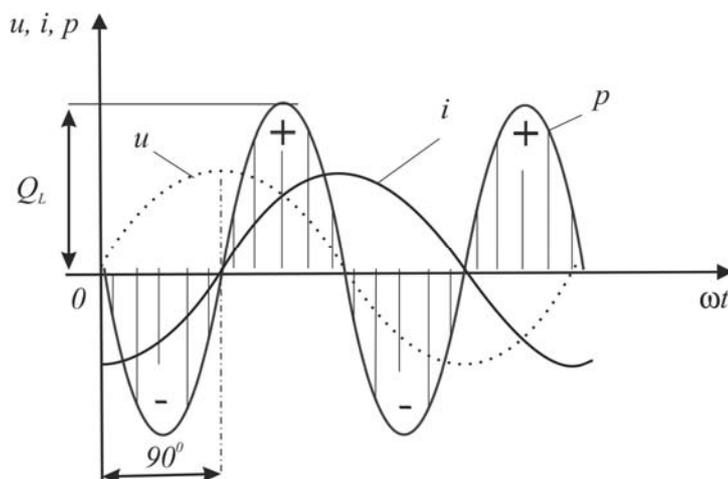


Рис. 5.2.1

Амплитуда синусоидального напряжения на катушке пропорциональна амплитуде тока:

$$U_m = I_m L.$$

Коэффициент пропорциональности $X_L = L$ называется индуктивным (или реактивным) сопротивлением катушки. Индуктивное сопротивление увеличивается с увеличением частоты. Таким образом, амплитуды и действующие значения тока и напряжения на катушке индуктивности связаны выражением, аналогичным закону Ома:

$$U_m = X_L I_m.$$

Реактивному сопротивлению катушки присваивают знак «+» в отличие от ёмкостного реактивного сопротивления, которому приписывают знак «-».

Мгновенная мощность, потребляемая идеальной катушкой, определяется как произведение напряжения и тока:

$$p(t) = ui = -\frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

График мощности (рис. 5.2.1) представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой:

$$Q_L = U_m I_m / 2.$$

Когда $p > 0$, катушка потребляет энергию, запасая ее в магнитном поле. Когда $p < 0$, она отдает энергию другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина Q_L является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой катушкой, и называется индуктивной реактивной мощностью. Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр). Средняя мощность, потребляемая за период идеальной катушкой индуктивности, равна нулю.

При последовательном соединении катушек через них протекает один и тот же ток, и если катушки расположены так, что их магнитные поля не влияют друг на друга, напряжение, приложенное к цепи, равно сумме напряжений на отдельных катушках:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + L_3 \frac{di}{dt} = (L_1 + L_2 + L_3) \frac{di}{dt}.$$

Следовательно, эквивалентная индуктивность цепи также равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3.$$

При параллельном соединении ко всем катушкам приложено одно и то же напряжение u , а ток, потребляемый от источника, равен сумме токов всех катушек:

$$\frac{di}{dt} = \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} = \frac{u}{L_1} + \frac{u}{L_2} + \frac{u}{L_3} = u \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right).$$

Учитывая, что $u = L \frac{\partial i}{\partial t}$, эквивалентная индуктивность параллельно соединенных катушек индуктивности определяется из выражения:

$$L_{\Sigma} = (1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3)^{-1}.$$

Порядок выполнения эксперимента

1. Получите у преподавателя номер варианта. Величины, соответствующие вашему варианту, указаны в табл. 5.2.1.

Таблица 5.2.1

№ варианта	1	2	3	4
L_1 , мГн	10	40	100	100
L_2 , мГн	40	100	100	10
L_3 , мГн	100	10	40	100
U , В	7	8	9	10
f , кГц	0,5	0,8	1,0	1,2

2. Соберите цепь согласно схеме на рис. 5.2.2, подключите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите действующее напряжение U с частотой f . Напряжение с катушки $u_L(t)$ подаётся на первый канал осциллографа, а инвертированное напряжение с токосъемного сопротивления $u_R(t) = R_T i_L(t)$ – на второй.

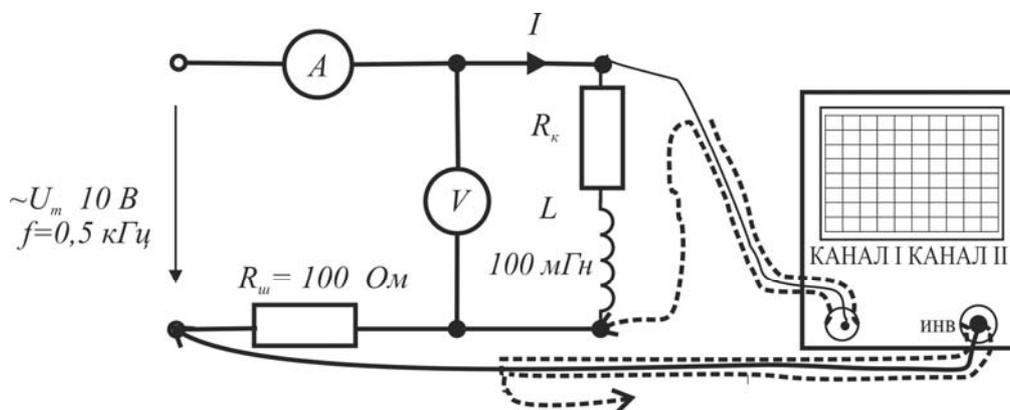


Рис. 5.2.2

3. Установите параметры развёртки и усиления осциллографа так, чтобы на экране было изображение полутора периодов напряжения и тока. Для измерений используйте режим прерывистого (не поочерёдного!) изображения сигналов двух каналов осциллографа. Перенесите кривые $u_L(t)$ и $u_R(t)$ на миллиметровую бумагу, укажите на ней масштаб по оси времени, а также масштабы для каналов $u_L(t)$ и $u_R(t)$.

По каналу I: $m_u = \dots$ В/дел., по каналу II: $m_I = m_u / R_o = \dots$ мА/дел.

Период: $T = C \cdot m_t = \dots$ мс, где $C = \dots$ дел. – период в делениях сетки осциллографа, $m_t = \dots$ мс/дел. – чувствительность осциллографа по каналу развёртки. Фазовый сдвиг: $|\varphi| = 360 \cdot D / C = \dots$ град. где $D = \dots$ дел. – сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа, $C = \dots$ дел. – период в делениях сетки осциллографа.

4. Определите период, фазовый сдвиг между напряжением $u_L(t)$ и током

$i_L(t)$, а также максимальную мощность по формуле $Q_C=U_m I_m/2$, учитывая, что $I_m=U_m R_T$. Результаты занесите в отчет по лабораторной работе.

- Отсоедините от схемы осциллограф. Изменяя частоту сигнала, измерьте действующие значения тока I_L и напряжения U на катушке индуктивности мультиметрами при различных значениях частоты, указанных в табл. 5.2.2.

Таблица 5.2.2

f , кГц	0,5	1,2	1,7	2,3	3,0
U , В					
I_L , мА					
U/I , Ом					
X_L , Ом					

- Рассчитайте индуктивные сопротивления по результатам этих измерений как U/I_L и по формуле $X_L=2\pi fL$. Постройте экспериментальный и расчетный графики $X_L(f)$. Сравните результаты.
- Соберите цепь с последовательным соединением катушек (рис. 5.2.4) и измерьте с помощью мультиметра действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждой катушке. Результаты измерений занесите в табл. 5.2.3.

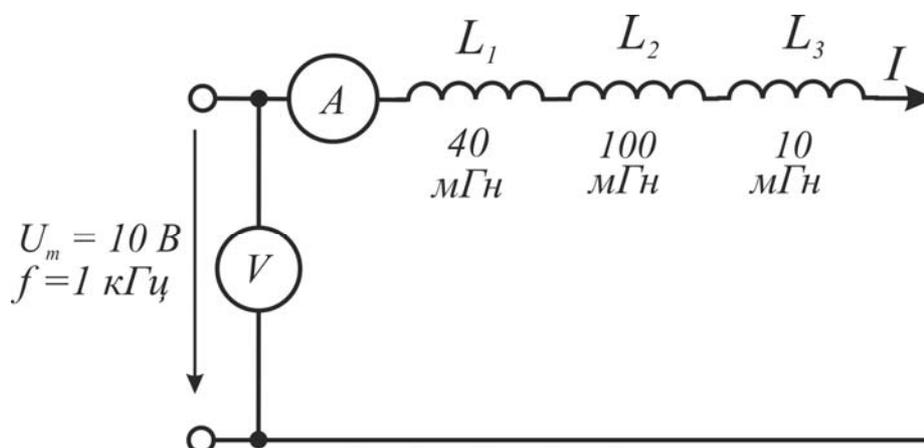


Рис. 5.2.4

Таблица 5.2.3

	U , В	I , мА	X_L , Ом	L , мГн	Заданные значения L , мГн
L_1					
L_2					
L_3					
L_{Σ}					$L_{\Sigma}=L_1+L_2+L_3=...$

8. Вычислите индуктивные сопротивления X_{Σ} , X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} по формуле $X_L=U_L/I_L$. Определите индуктивности отдельных катушек и эквивалентную индуктивность цепи по формуле $L=X_L/(2 f)$. Результаты вычислений занесите в табл. 5.2.3.
9. В столбец «Заданные значения» табл. 5.2.3 занесите величины индуктивностей, заданные для вашего варианта, а также вычислите L_{Σ} . Сравните значение индуктивности L_{Σ} , найденное экспериментально, с рассчитанным.
10. Соберите цепь с параллельным соединением катушек (рис. 5.2.5). Предусмотрите в схеме переключки для измерения токов мультиметром. Включите регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами U и f , соответствующими вашему варианту.

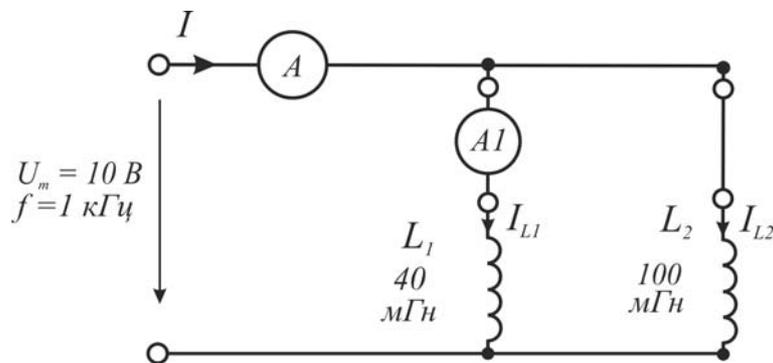


Рис. 5.2.5

11. Измерьте мультиметром общий ток цепи I , токи параллельных ветвей I_1 , I_2 и напряжения на входе цепи U , занесите данные измерений в табл. 5.2.4.

Таблица 5.2.4

	U , В	I , мА	X_L , Ом	L , мГн	Заданные значения L , мГн
L_1					
L_2					
L_{Σ}					$L_{\Sigma}=(1/L_1+1/L_2)^{-1}=\dots$

12. Вычислите индуктивные сопротивления X_{Σ} , X_{L1} , X_{L2} по формуле $X_L=U_L/I_L$. Определите индуктивности отдельных катушек и эквивалентную индуктивность цепи по формуле $L=X_L/(2 f)$. Результаты вычислений занесите в табл. 5.2.4.
13. В столбец «Заданные значения» табл. 5.2.4 занесите величины индук-

тивностей, заданные для вашего варианта, а также вычислите L_{Σ} . Сравните значение индуктивности L_{Σ} , найденное экспериментально, с рассчитанным.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения понятиям «потокосцепление» и «магнитный поток».
2. Что такое самоиндукция?
3. Как связаны ток и напряжение катушки индуктивности? Почему для катушки индуктивности $u_L = -e_L$?
4. Что такое реактивная мощность катушки индуктивности? Чему равна энергия, накопленная в катушке с током?
5. Почему в эксперименте разность фаз между током и напряжением меньше 90° ?
6. Как определяется эквивалентная индуктивность последовательно и параллельно соединенных катушек индуктивности?

5.3. Лабораторная работа № 3

Цепи синусоидального тока

Цели работы: исследовать цепи, содержащие активные и реактивные элементы; построить векторные диаграммы для этих цепей.

Задачи:

1. Для цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора, а также резистора и катушки индуктивности измерить потребляемую активную мощность, действующие значения напряжений на резисторе U_R и реактивном элементе U_C , U_L и ток I . Рассчитать угол сдвига фаз φ , полное сопротивление цепи Z , реактивное сопротивление X и активное сопротивление R , построить векторную диаграмму.
2. Для цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора, а также резистора и катушки индуктивности измерить потребляемую активную мощность, действующие значения тока в резисторе I_R и реактивном элементе I_C (I_L) и ток I . Рассчитать угол сдвига фаз φ , полную проводимость цепи Y , реактивную проводимость Y и активную проводимость G , построить векторную диаграмму.

Общие сведения

Переменные во времени токи и напряжения принято обозначать строчными буквами, например, ток – $i(t)$, напряжение – $u(t)$, величину ЭДС – $e(t)$ и т.д. Приведенные ниже выражения могут быть приложены к любой переменной величине. Частным случаем переменного сигнала является синусоидальный.

Синусоидальный ток представляет собой ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону (рис. 5.3.1):

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

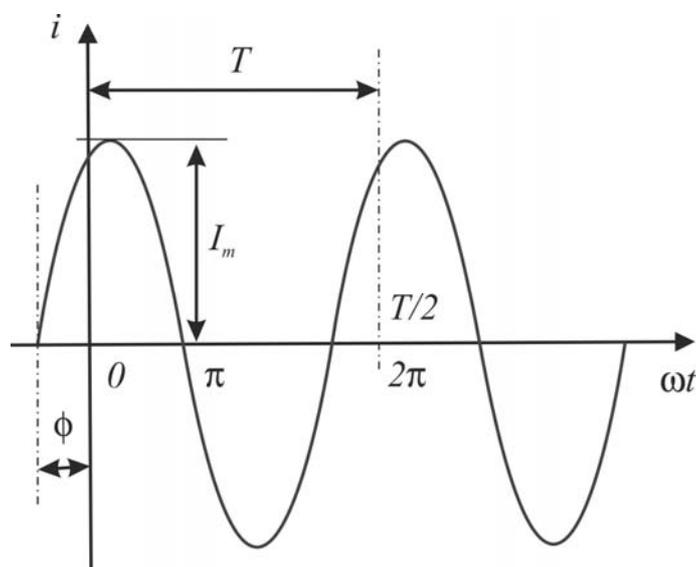


Рис. 5.3.1

Максимальное значение I_m называют амплитудой. Период T – это время, за которое совершается одно полное колебание. Частота равна числу колебаний в 1 с (единица частоты f – герц (Гц) или с^{-1}):

$$f = \frac{1}{T}.$$

Угловая частота (единица угловой частоты – рад/с или с^{-1})

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.$$

Аргумент синуса, т.е. $(\omega t + \varphi)$, называют фазой. Фаза характеризует состояние колебания в данный момент времени t . Величина φ – начальная фаза колебаний.

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

Действующее (среднеквадратичное) значение синусоидально изменяющейся величины определяется как

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$$

и численно равно значению такого постоянного тока, который за время, равное периоду синусоидального тока, выделяет такое же количество теплоты, что и синусоидальный ток. Большинство измерительных приборов показывает действующее значение измеряемой величины.

Для расчета параметров электрических цепей часто прибегают к символическому методу. Он состоит в представлении величин токов, напряжений и сопротивлений в виде комплексных чисел.

На рис. 5.3.2а дана комплексная плоскость, на которой можно изобразить комплексные числа. Комплексное число имеет действительную (вещественную) и мнимую части. По оси абсцисс (+1) откладывают действительную часть комплексного числа, а по оси ординат (+j) – мнимую часть ($j = \sqrt{-1}$).

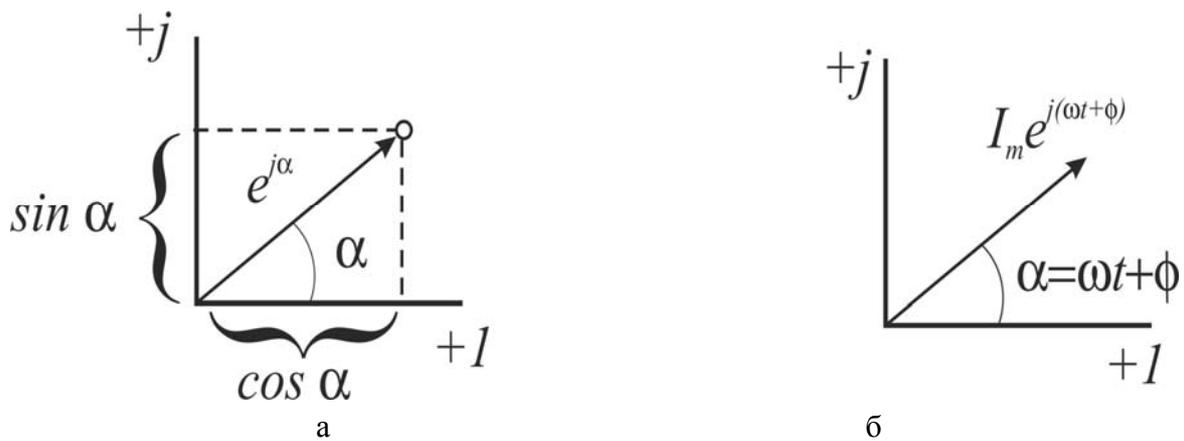


Рис. 5.3.2

Известна формула Эйлера:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha. \quad (5.3.1)$$

Комплексное число e^j изображают на комплексной плоскости вектором, численно равным единице ($|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1$) и составляю-

щим угол α с осью вещественных значений (+1). Угол α отсчитываем против часовой стрелки от оси +1.

Если вместо функции $e^{j\alpha}$ взять функцию $I_m e^{j\alpha}$, то $I_m e^{j\alpha} = I_m \cos \alpha + jI_m \sin \alpha$. На комплексной плоскости эта функция, как и $e^{j\alpha}$, изображается под углом α к оси +1, но длина вектора будет равна I_m (рис. 5.3.2б).

Угол α в формуле (5.3.1) может быть любым. Положим $\alpha = (\omega t + \varphi)$, тогда

$$I_m e^{j(\omega t + \varphi)} = I_m \cos(\omega t + \varphi) + jI_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Функция $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ есть коэффициент при мнимой части (Im) выражения $I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) = \text{Im } I_m e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Таким образом, синусоидально изменяющийся ток i можно представить как $\text{Im } I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$ или, что то же самое, как проекцию вращающегося вектора $I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$ на ось $+j$. (рис. 5.3.2б).

Принято на комплексной плоскости изображать векторы синусоидально изменяющихся во времени величин для момента времени $t=0$. При этом вектор

$$I_m e^{j(\omega t + \varphi)} = I_m e^{j\varphi} = \dot{I}_m,$$

где \dot{I}_m – комплексная величина, модуль которой равен I_m ; φ – угол, под которым вектор \dot{I}_m проведен к оси +1 на комплексной плоскости, равный начальной фазе.

Величину \dot{I}_m называют комплексной амплитудой тока i . Комплексная амплитуда изображает ток i на комплексной плоскости для момента времени $t=0$. Точка, поставленная над током \dot{I} или напряжением \dot{U} , означает, что эта величина во времени изменяется синусоидально.

Например, пусть известна комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi} = 25e^{j34^\circ}$. Тогда для перехода от комплексной амплитуды к мгновенным значениям умножим \dot{U}_m на $e^{j\omega t}$ и возьмем коэффициент при мнимой части от полученного произведения:

$$u(t) = \text{Im}(25e^{j34^\circ} e^{j\omega t}) = \text{Im}(25e^{j(\omega t + 34^\circ)}) = 25 \sin(\omega t + 34^\circ).$$

И обратное преобразование: если известна функция тока, например,

$$i(t) = 12 \sin(\omega t + \pi/4), \quad (5.3.2)$$

то комплексная амплитуда определяется как

$$\dot{I}_m = 12e^{j\frac{\pi}{4}}.$$

Комплекс тока (комплекс действующего значения) равен частному от деления комплексной амплитуды на $\sqrt{2}$:

$$\dot{i} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m e^{j\varphi}}{\sqrt{2}} = I e^{j\varphi}.$$

Например, для (5.3.2) комплекс тока равен $\dot{i} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{12e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2}} \approx 8,49e^{j\frac{\pi}{4}}$.

Допустим, необходимо сложить два тока $i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$ и $i_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$ одинаковой частоты. Сумма их дает ток той же частоты $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Требуется найти амплитуду I_m и начальную фазу

тока i . Для этого ток i_1 изобразим на комплексной плоскости вектором $\dot{I}_{m1} = I_{m1} e^{j\varphi_1}$, а ток i_2 – вектором $\dot{I}_{m2} = I_{m2} e^{j\varphi_2}$ (рис. 5.3.3). Геометрическая сумма векторов \dot{I}_{m1} и \dot{I}_{m2} даст комплексную амплитуду суммарного тока $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi}$, причем амплитуда I_m определяется длиной суммарного вектора, а начальная фаза – углом, образованным этим вектором и осью +1.

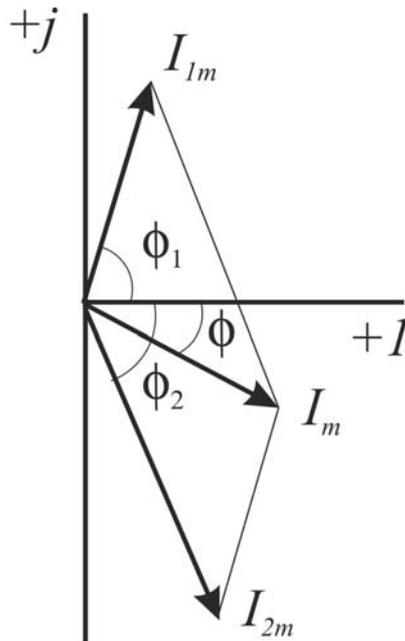


Рис. 5.3.3

Обратим внимание на то, что если бы векторы \dot{I}_{m1} , \dot{I}_{m2} и \dot{I}_m стали вращаться вокруг начала координат с угловой скоростью, то взаимное расположение векторов относительно друг друга осталось бы без изменений.

Векторной диаграммой называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга.

Расчет электрических цепей переменного тока осуществляется на основе правил работы с комплексными числами.

Пусть известны два комплексных числа \dot{A} и \dot{B} . Эти числа могут быть представлены в алгебраической, показательной и тригонометрической формах:

$$\dot{A} = a_1 + ja_2 = Ae^{j\alpha} = A\cos\alpha + jA\sin\alpha,$$

$$\dot{B} = b_1 + jb_2 = Be^{j\beta} = B\cos\beta + jB\sin\beta,$$

где $A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$, $B = \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$ – модули (длины) векторов, $\alpha = \arctan \frac{a_2}{a_1}$,

$\beta = \arctan \frac{b_2}{b_1}$ – углы наклона векторов относительно оси +1.

Сумма этих чисел $\dot{C} = Ce^{j\gamma} = \dot{A} + \dot{B}$ также будет комплексным числом

и может быть найдена геометрическим сложением векторов \dot{A} и \dot{B} или алгебраическим сложением комплексных чисел:

$$\dot{C} = \dot{A} + \dot{B} = (a_1 + ja_2) + (b_1 + jb_2) = (a_1 + b_1) + j(a_2 + b_2) = c_1 + jc_2,$$

где $c_1 = a_1 + b_1$, $c_2 = a_2 + b_2$ – действительная и мнимая части комплексного числа \dot{C} . Для показательной формы: модуль $C = \sqrt{(a_1 + b_1)^2 + (a_2 + b_2)^2}$,

$$\text{фаза } \gamma = \arctan \frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}.$$

Операции умножения и деления комплексных чисел наиболее удобно производить в показательной форме, например, произведение чисел

$$\dot{C} = Ce^{j\gamma} = \dot{A}\dot{B} = Ae^{j\alpha}Be^{j\beta} = ABe^{j(\alpha+\beta)},$$

откуда $C = AB$ и $\gamma = \alpha + \beta$, а частное

$$\dot{D} = De^{j\delta} = \frac{\dot{A}}{\dot{B}} = \frac{Ae^{j\alpha}}{Be^{j\beta}} = \frac{A}{B}e^{j(\alpha-\beta)},$$

откуда $D = \frac{A}{B}$ и $\delta = \alpha - \beta$.

Например, сумма двух токов $\dot{I}_1 = I_1e^{j\varphi_1}$ и $\dot{I}_2 = I_2e^{j\varphi_2}$ определяется как $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = I_1e^{j\varphi_1} + I_2e^{j\varphi_2} = (I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2) + j(I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2)$.

Общий ток равен

$$\dot{I} = Ie^{j\varphi} = I \cos \varphi + jI \sin \varphi,$$

где модуль тока

$$I = \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2)^2 + (I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2)^2},$$

начальная фаза

$$\varphi = \arctan \frac{I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2}.$$

Рассмотрим идеальные резистивный, емкостной и индуктивный элементы в цепи синусоидального тока.

Если через активное сопротивление R течет ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_1)$, где φ_1 – начальная фаза тока, то, в соответствии с законом Ома, на нем падает напряжение $u(t) = i(t)R$. Перепишем это выражение в виде $U_m e^{j(\omega t + \varphi_u)} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_1)} R$, где φ_u – начальная фаза напряжения. После деления обеих частей равенства на $e^{j\omega t}$ оно примет вид

$$U_m e^{j\varphi_U} = R I_m e^{j\varphi_I}, \quad (5.3.3)$$

или, в комплексных амплитудах, $\dot{U}_m = R \dot{I}_m$. Разделив обе части равенства (3.3) на $\sqrt{2}$, получим выражение закона Ома в комплексной форме для активного сопротивления:

$$\dot{U} = \dot{I}R. \quad (5.3.4)$$

Из выражения (5.3.3) следует, что $U_m = R I_m$, а также $\varphi_U = \varphi_I$, поэтому на векторной диаграмме векторы \dot{U} и \dot{I} будут расположены под одинаковым углом к оси $+1$. Векторная диаграмма представлена на рис. 5.3.4а (для простоты полагается, что $\varphi_I = 0$).

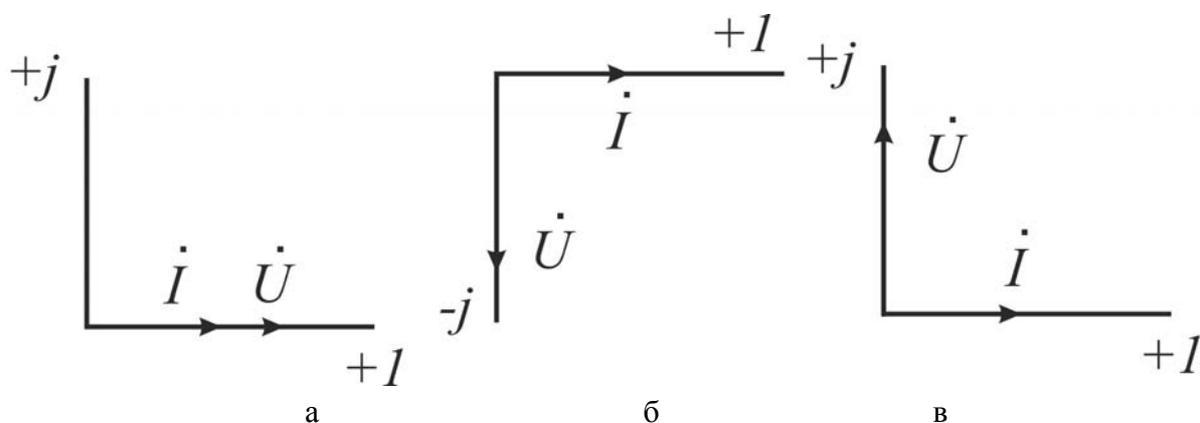


Рис. 5.3.4

Пусть через конденсатор C течет ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_I)$. Тогда напряжение $u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$. Перепишем это выражение следующим образом:

$$U_m e^{j(\omega t + \varphi_U)} = \frac{1}{C} \int I_m e^{j(\omega t + \varphi_I)} dt = \frac{1}{j\omega C} I_m e^{j(\omega t + \varphi_I)}. \quad (5.3.5)$$

Аналогично действиям в случае с активным сопротивлением поделим обе части равенства (5.3.5) на $e^{j\omega t} \sqrt{2}$. В результате получим выражение для комплексного напряжения

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_U} = \frac{1}{j\omega C} \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = \frac{1}{j} X_C \dot{I}, \quad (5.3.6)$$

где $X_C = 1/\omega C$ – реактивное сопротивление конденсатора. Выражение (5.3.6) является записью закона Ома в комплексной форме для емкости. Поскольку

$$j = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = e^{j90^\circ}, \quad (5.3.7)$$

то

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_U} = \frac{1}{j\omega C} \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = \frac{1}{e^{j90^\circ} \omega C} \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = \frac{1}{\omega C} \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\varphi_I - 90^\circ)}.$$

Отсюда следует, что $U_m = \frac{I_m}{\omega C}$, а также $\varphi_U = \varphi_I - 90^\circ$, поэтому на векторной диаграмме для конденсатора векторы \dot{U} и \dot{I} будут расположены под углом 90° друг к другу, причем напряжение отстает от тока на четверть периода. Векторная диаграмма представлена на рис. 5.3.4б (для простоты полагается, что $\varphi_I = 0$).

При протекании тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_I)$ через индуктивный элемент L напряжение, падающее на нем, равно $u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$. Тогда

$$U_m e^{j(\omega t + \varphi_U)} = L \frac{d(I_m e^{j(\omega t + \varphi_I)})}{dt} = j\omega L I_m e^{j(\omega t + \varphi_I)}. \quad (5.3.8)$$

Поделим обе части равенства (5.3.8) на $e^{j\omega t} \sqrt{2}$. В результате получим выражение для комплекса напряжения

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_U} = j\omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}, \quad (5.3.9)$$

где $X_L = \omega L$ – реактивное сопротивление индуктивности. Выражение (5.3.9) является записью закона Ома в комплексной форме для индуктивности. Учитывая (5.3.7), запишем

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_U} = j\omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = e^{j90^\circ} \omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_I} = \omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\varphi_I + 90^\circ)}.$$

Отсюда следует, что $U_m = \omega L I_m$, а также $\varphi_U = \varphi_I + 90^\circ$, поэтому на векторной диаграмме для индуктивности векторы \dot{U} и \dot{I} будут расположены под углом 90° друг к другу, причем напряжение опережает ток на четверть периода. Векторная диаграмма представлена на рис. 5.3.4в (для простоты полагается, что $\varphi_I = 0$).

В электрических схемах следует учитывать паразитные параметры реальных реактивных компонентов. Например, конденсатор обладает ненулевым активным сопротивлением обкладок, сопротивлением неидеального диэлектрика, через который идет ток утечки; кроме того, в самом диэлектрике имеются тепловые потери, обусловленные вязким трением ди-

польных молекул. Витки катушки индуктивности обладают активным сопротивлением, кроме того, при протекании переменного тока через катушку часть энергии тратится на перемагничивание ферромагнитного стержня. Из-за паразитных параметров угол между вектором напряжения и вектором тока будет меньше 90° . Поэтому реальные реактивные элементы иногда представляют в виде двухполюсника или эквивалентной схемы, содержащей идеальные емкости и индуктивности, последовательно и/или параллельно соединенные с резистором.

Любой участок электрической цепи можно представить в виде двухполюсника, имеющего два входных зажима. Через двухполюсник протекает ток $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$ и падает напряжение $\dot{U} = Ue^{j\varphi_U}$. Они связаны законом Ома в комплексной форме:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad (*)$$

где $Z = R + jX$ – полное входное сопротивление, или импеданс двухполюсника. Здесь R – активная, а X – реактивная составляющие полного сопротивления. Согласно (*),

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\varphi_U}}{Ie^{j\varphi_i}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\varphi_U - \varphi_i)} = ze^{j\psi},$$

где $z = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль комплексного сопротивления, $\psi = \varphi_U - \varphi_i$ – разность фаз между входными напряжением и током.

В цепи с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности (рис. 5.3.5а) в обоих компонентах цепи будет течь один и тот же синусоидальный ток, а напряжение на входе цепи будет равно сумме напряжений на двух компонентах. Согласно (5.3.4) и (5.3.6), напряжение на резисторе $\dot{U}_R = R\dot{I}$, т.е. совпадает с током \dot{I} по фазе, а напряжение на конденсаторе $\dot{U}_C = \frac{1}{j}X_C\dot{I}$, т.е. отстает от тока на 90° . Входное напряжение равно сумме векторов, как показано на векторной диаграмме на рис. 5.3.5б.

Тогда

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I\sqrt{R^2 + X_C^2} = Iz, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{U_C}{U_R}\right) = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right). \quad (5.3.10)$$

Здесь $z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ – модуль полного сопротивления цепи.

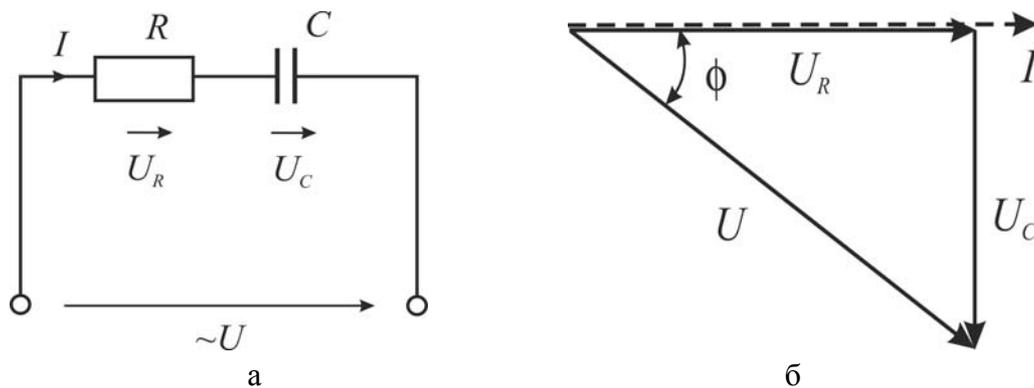


Рис. 5.3.5

Аналогично в цепи с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности (рис. 5.3.6а) ток в них одинаков. Согласно (5.3.9), напряжение на катушке индуктивности $\dot{U}_L = jX_L \dot{I}$ опережает ток на 90° . Входное напряжение равно сумме векторов, как показано на векторной диаграмме на рис. 5.3.6б. Тогда

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2} = Iz, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{U_L}{U_R}\right) = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right). \quad (5.3.11)$$

где $z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – модуль полного сопротивления цепи.

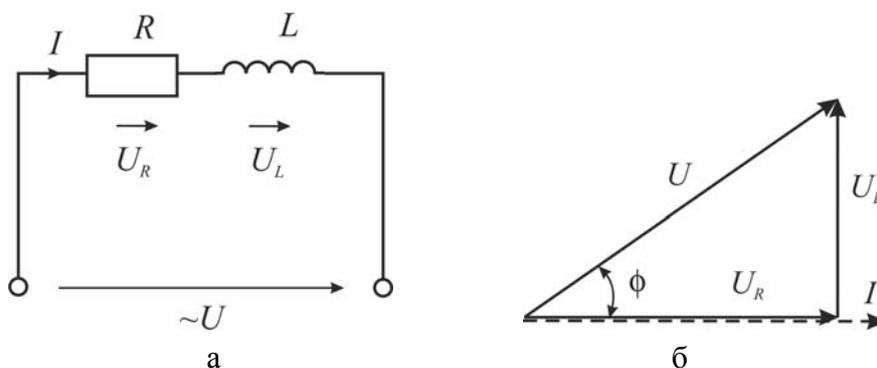


Рис. 5.3.6

Разделив каждую сторону треугольника напряжений (рис. 5.3.5б и 5.3.6б) на ток, получим треугольники сопротивлений, подобные треугольникам напряжений (рис. 5.3.7). Из треугольников сопротивлений для цепи с конденсатором на рис 5.3.7а и для цепи с катушкой индуктивности на рис. 5.3.7б следует, что

$$R = z \cos \varphi, \quad X_C = z \sin \varphi, \quad X_L = z \sin \varphi.$$

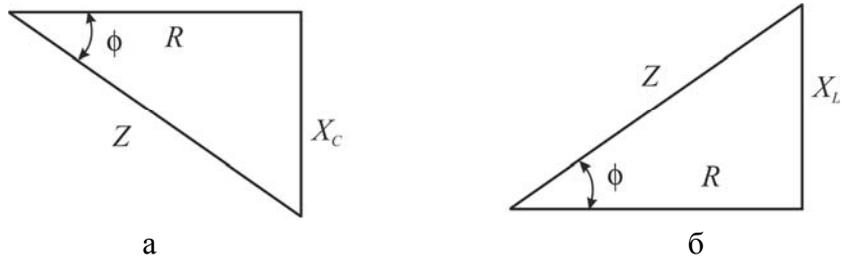


Рис. 5.3.7

В цепях с параллельным соединением элементов входное напряжение совпадает по фазе с током, проходящим через резистор, но отстает на 90° от тока, идущего через конденсатор (рис. 5.3.8а), и опережает на 90° ток, идущий через катушку индуктивности (рис. 5.3.8б).

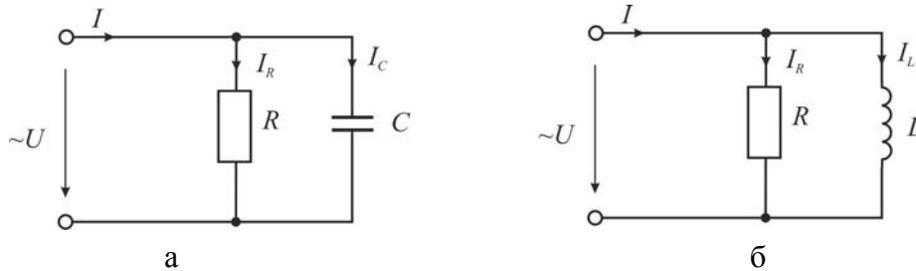


Рис. 5.3.8

Входной ток равен сумме токов, идущих через ветви. Для схемы с конденсатором на рис. 5.3.9а и для схемы с катушкой индуктивности на рис. 5.3.9б показано сложение этих токов.

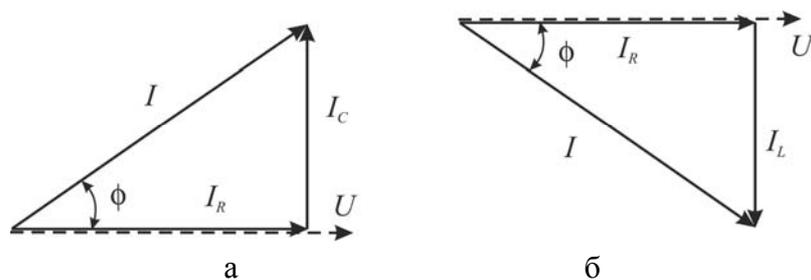


Рис. 5.3.9

Введем обозначения $G=1/R$ для активной проводимости резистора, $B_C=1/X_C$ для проводимости конденсатора и $B_L=1/X_L$ для индуктивной проводимости.

Из векторных диаграмм на рис. 5.3.9 следует, что в цепи с конденсатором

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = U\sqrt{G^2 + B_C^2} = Uy, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{I_C}{I_R}\right) = \arctan\left(\frac{B_C}{G}\right), \quad (5.3.12)$$

где $y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$ – модуль полной проводимости цепи.

Аналогично для цепи с индуктивностью:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = U\sqrt{G^2 + B_L^2} = Uy, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{I_L}{I_R}\right) = \arctan\left(\frac{B_L}{G}\right), \quad (5.3.13)$$

где $y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$ – модуль полной проводимости цепи.

Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей для цепи с конденсатором на рис. 5.3.10а и для цепи с катушкой индуктивности на рис. 5.3.10б.

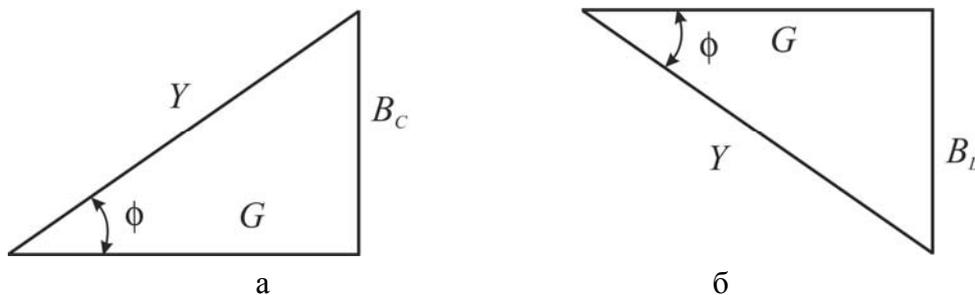


Рис. 5.3.10

Из треугольников проводимостей следует, что

$$G = y \cos \varphi, \quad B_C = y \sin \varphi \quad \text{и} \quad B_L = y \sin \varphi.$$

Протекание синусоидальных токов по участкам электрической цепи сопровождается потреблением энергии от источников. Скорость поступления энергии характеризуется мгновенной мощностью:

$$p(t) = ui.$$

Протеканию синусоидального тока оказывают сопротивление резистивные элементы (резисторы) – в них выделяется энергия в виде теплоты – и реактивные элементы (катушки индуктивности и конденсаторы) – они то запасают энергию, то отдают ее. На активных элементах выделяется в виде теплоты активная мощность

$$P = \frac{U_m I_m}{2} \cos \psi = UI \cos \psi,$$

где $\psi = \varphi - \theta$ – разность фаз между напряжением и током. Единица измерения активной мощности – ватт (Вт).

Реактивная мощность является мерой энергии, которой обмениваются реактивный элемент и источник питания, и численно равна

$$Q = \frac{U_m I_m}{2} \sin \psi = UI \sin \psi .$$

Единица измерения реактивной мощности – вольт-ампер реактивный (ВАр).

Полная мощность цепи синусоидального тока также является синусоидальной функцией (с удвоенной частотой), поэтому ее можно представить в виде комплекса:

$$\tilde{S} = P + jQ ,$$

причем величина полной мощности $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$. Единица измерения полной мощности – вольт-ампер (ВА).

Порядок выполнения работы

1. Получите у преподавателя номер варианта. Величины, соответствующие вашему варианту, указаны в табл. 5.3.1.

Таблица 5.3.1

№ варианта	1	2	3	4
$R, \text{ Ом}$	100	150	220	330
$C, \text{ мкФ}$	0,1	0,22	0,47	1,0
$L, \text{ мГн}$	100	100	100	100
$U, \text{ В}$	7	8	9	10
$f, \text{ кГц}$	0,2	0,3	0,4	0,5

2. Соберите цепь согласно схеме на рис. 5.3.11, подключите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите действующее значение синусоидального напряжения U с частотой f .

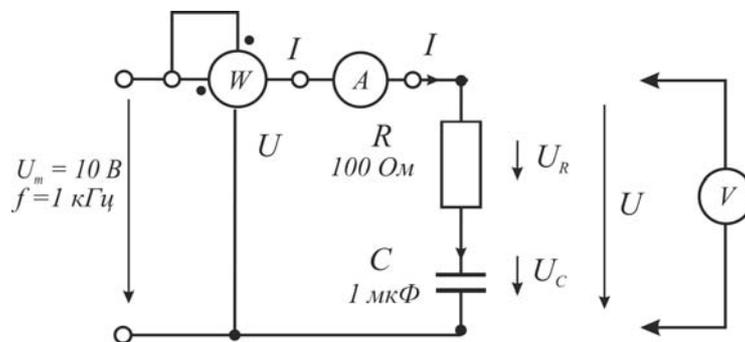


Рис. 5.3.11

3. Выполните измерения активной мощности (показания ваттметра), действующих значений тока и напряжений на резисторе и конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл. 5.3.2. Для измерения напряжений подключайте мультиметр к различным зажимам цепи.

Таблица 5.3.2

Цепь	P , Вт	U , В	U_R , В	U_X , В	I , мА	, ,	z , Ом	R , Ом	X , Ом
RC									
RL									

4. Вычислите: фазовый угол $\varphi = \arccos(P/IU)$, полное сопротивление цепи $z = U/I$, активное сопротивление цепи $R = z \cos \varphi$ и реактивное сопротивление $X = z \sin \varphi$. Результаты вычислений занесите в табл. 5.3.2.
5. Выберите масштаб и постройте векторную диаграмму напряжений.
6. Замените в схеме конденсатор на катушку индуктивности (рис. 5.3.12), повторите измерения (п. 3) и расчёт (п. 4). Результаты занесите в табл. 5.3.2 и постройте векторную диаграмму.

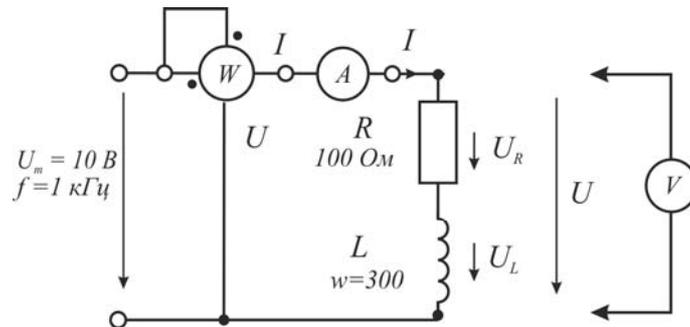


Рис. 5.3.12

7. Соберите цепь согласно схеме на рис. 5.3.13, подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите действующее значение синусоидального напряжения U с частотой f .

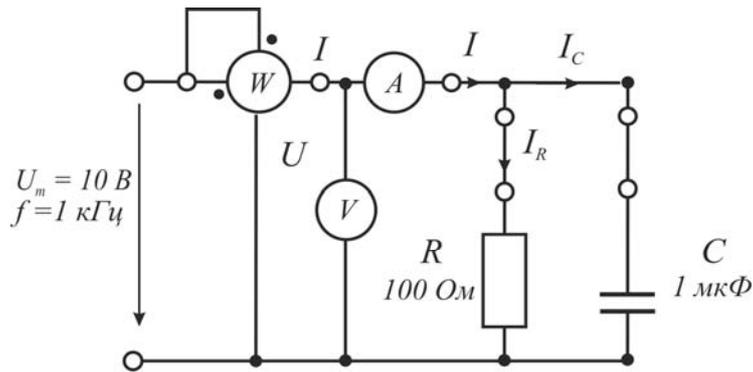


Рис. 5.3.13

8. Выполните измерения активной мощности (показания ваттметра), действующих значений токов и напряжения на резисторе и конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл. 5.3.3. Для измерения токов включайте мультиметр вместо перемычек, показанных на схеме.

Таблица 5.3.3

Цепь	P , Вт	U , В	I_R , мА	I_X , мА	I , мА	, ,	y , Ом ⁻¹	G , Ом ⁻¹	B , Ом ⁻¹
RC									
RL									

9. Вычислите: фазовый угол $\varphi = \arccos(P/IU)$, полную проводимость цепи $y = I/U$, активную проводимость цепи $G = y \cos \varphi$ и реактивную проводимость $B = y \sin \varphi$. Результаты вычислений занесите в табл. 5.3.3.
10. Выберите масштаб и постройте векторную диаграмму токов.
11. Замените в схеме конденсатор на катушку индуктивности (рис. 5.3.14), повторите измерения (п. 8) и расчёт (п. 9). Результаты занесите в табл. 5.3.3 и постройте векторную диаграмму токов.

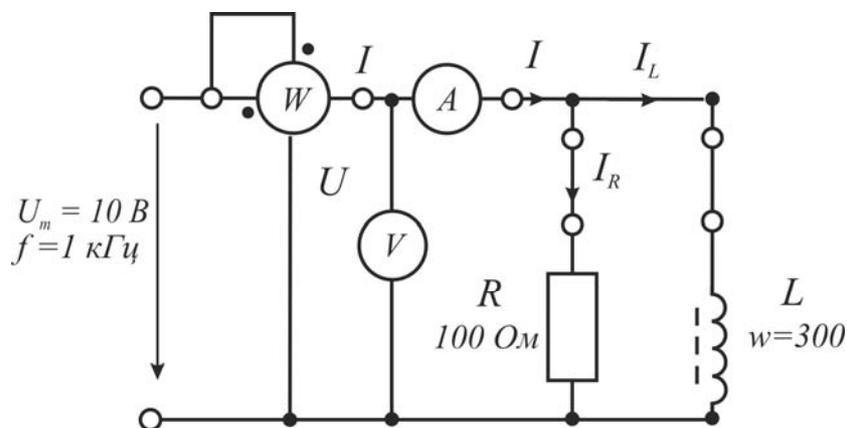


Рис. 5.3.14

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «мгновенное», «амплитудное», «действующее значение тока».
2. Дайте определение понятиям «частота», «период», «угловая частота», «фаза».
3. Что такое комплексное число, комплексная плоскость? Какие формы записи комплексного числа существуют?
4. С помощью формулы Эйлера поясните: $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) = \text{Im } I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$.
5. Что такое комплексная амплитуда тока, комплекс тока?
6. Как для записи синусоидально изменяющихся величин осуществляется переход от формы мгновенных значений к изображению на комплексной плоскости и наоборот?
7. Запишите закон Ома в комплексной форме. Что такое импеданс?
8. Что такое активная, реактивная и полная мощности?

5.4. Лабораторная работа № 4

Колебательные контуры

Цель работы: изучить физические процессы, происходящие в последовательном и параллельном колебательных контурах; определить резонансную частоту, построить векторные диаграммы и амплитудно-частотные характеристики для данных колебательных контуров.

Задачи:

1. Измерить токи, напряжения и мощность в разветвлённой цепи синусоидального тока. Проверить баланс активных и реактивных мощностей.
2. Определить характеристики для цепи с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности, построить векторные диаграммы.
3. Определить характеристики для цепи с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности, построить векторные диаграммы.
4. Построить частотные характеристики последовательного резонансного контура.

5. Построить частотные характеристики параллельного резонансного контура.

Общие сведения

На рис. 5.4.1а изображена произвольная пассивная цепь синусоидального тока с двумя зажимами для подключения источника питания (пассивный двухполюсник). В общем случае ток и напряжение на входе этой цепи различаются по фазе на угол φ :

$$u = U_m \sin(\omega t); i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

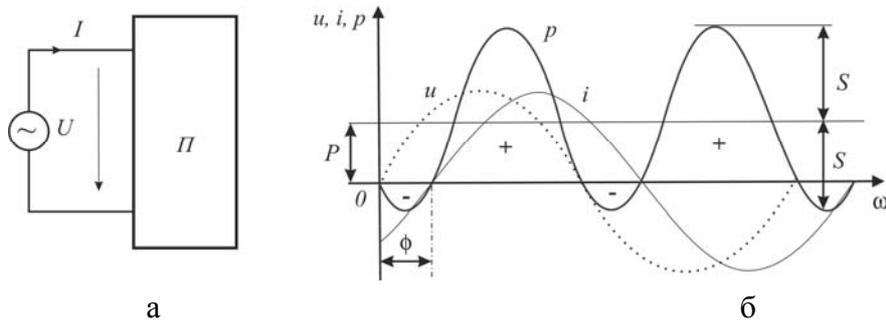


Рис. 5.4.1

Мгновенная мощность, потребляемая цепью от источника:

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2(\omega t - \varphi)).$$

График изменения этой мощности представлен на рис. 5.4.1б вместе с графиками изменения тока и напряжения. Мощность колеблется с двойной частотой. Большую часть периода она имеет положительное значение, а меньшую – отрицательное. Отрицательное значение мощности свидетельствует о возврате части накопленной в конденсаторах и катушках энергии в питающий цепь источник энергии.

Среднее значение потребляемой мощности

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R$$

называется активной мощностью. Она характеризует среднюю скорость преобразования электрической энергии в другие виды энергии.

Потребляемая в пассивной цепи активная мощность имеет всегда положительное значение. Она измеряется ваттметром. Единицей измерения активной мощности является ватт (Вт).

Амплитуда переменной составляющей мощности

$$S = UI = I^2 Z$$

называется полной мощностью. Она характеризует максимальную мощ-

ность, на которую должен быть рассчитан источник для питания данной цепи. Её иногда называют кажущейся, габаритной или аппаратной мощностью. Единицей её измерения является вольт-ампер (ВА). Здесь $U=IZ$, где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – полное сопротивление цепи синусоидального тока. Величина

$$Q=UI\sin\varphi=I^2X$$

называется реактивной мощностью. Она характеризует максимальную скорость обмена энергией между источником и цепью. Она может быть как положительной (при $\varphi>0$, т.е. в индуктивной цепи), так и отрицательной (при $\varphi<0$, т.е. в ёмкостной цепи). В связи с этим иногда говорят, что индуктивность потребляет «реактивную энергию», а ёмкость вырабатывает её. Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАр).

В электрической цепи синусоидального тока соблюдается баланс как активных, так и реактивных (но не полных!) мощностей, т.е. сумма мощностей всех источников равна сумме мощностей всех потребителей:

$$\Sigma P_{\text{ист}} = \Sigma P_{\text{потр}}; \quad \Sigma Q_{\text{ист}} = \Sigma Q_{\text{потр}}.$$

Соотношения между различными мощностями в цепи синусоидального тока можно наглядно представить в виде треугольника мощностей (рис. 5.4.2).

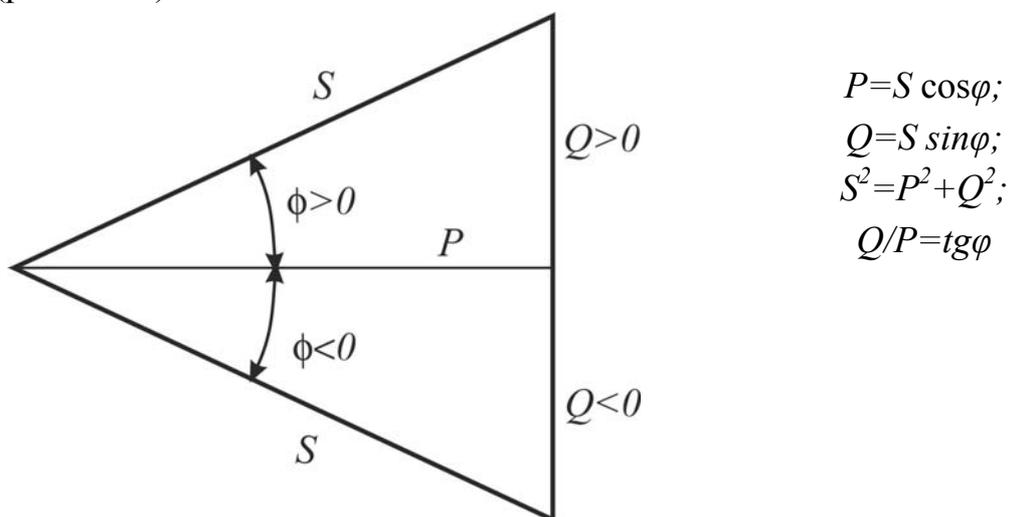


Рис. 5.4.2

По цепи (рис. 5.4.3) с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности протекает один и тот же синусоидальный ток I , но напряжение на конденсаторе U_C отстает от тока I на 90° , а напряжение на катушке индуктивности U_L опережает ток на 90° . Эти напряжения нахо-

дятся в противофазе (повернуты относительно друг друга на 180°).

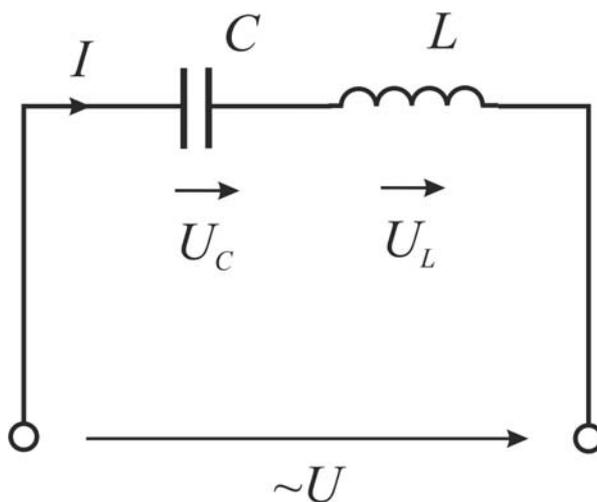


Рис. 5.4.3

Если одно из напряжений больше другого, цепь оказывается либо преимущественно индуктивной (рис. 5.4.4), либо преимущественно емкостной (рис. 5.4.5). Если напряжения U_L и U_C имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга, то суммарное напряжение на участке цепи L - C оказывается равным нулю. Остается только небольшая составляющая напряжения на активном сопротивлении катушки и проводов. Такое явление называется резонансом напряжений (рис. 5.4.6).

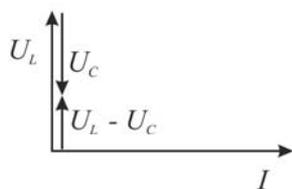


Рис. 5.4.4

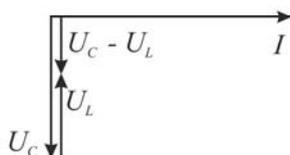


Рис. 5.4.5

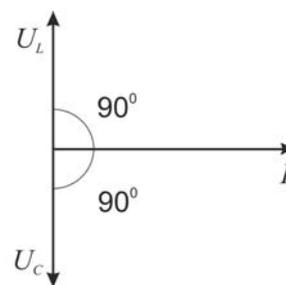


Рис. 5.4.6

При резонансе напряжений реактивное сопротивление цепи

$$X = X_L - X_C$$

оказывается равным нулю. При заданных значениях L и C резонанс может быть получен путем изменения частоты.

Поскольку $X_L = \omega L$, а $X_C = 1/\omega C$, то резонансная частота ω_0 может быть определена из уравнения

$$\omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полное сопротивление цепи при резонансе оказывается равным небольшому активному сопротивлению катушки, поэтому ток в цепи совпадает по фазе с напряжением и может оказаться довольно большим даже при маленьком приложенном напряжении. При этом напряжения U_L и U_C могут существенно превышать приложенное напряжение.

Когда к цепи (рис. 5.4.7) с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности подается переменное синусоидальное напряжение U , одно и то же напряжение приложено к обоим элементам цепи.

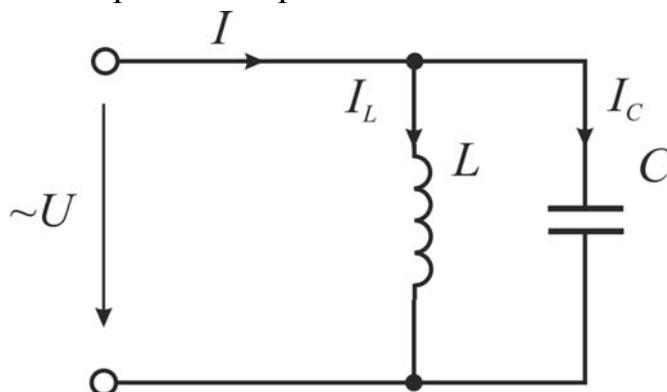


Рис. 5.4.7

Общий ток цепи I разветвляется на ток в конденсаторе I_C (емкостная составляющая общего тока) и ток в катушке I_L (индуктивная составляющая общего тока), причем ток I_L отстает от напряжения U на 90° , а I_C опережает на 90° .

Токи I_C и I_L имеют противоположные фазы (180°) и в зависимости от их величин компенсируют друг друга полностью или частично. Они могут быть представлены с помощью векторных диаграмм токов (рис. 5.4.8–5.4.10).

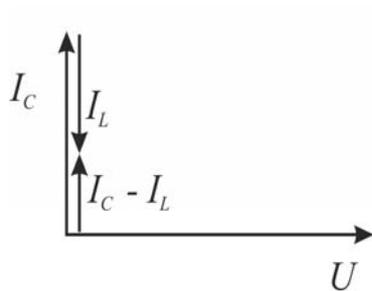


Рис. 5.4.8

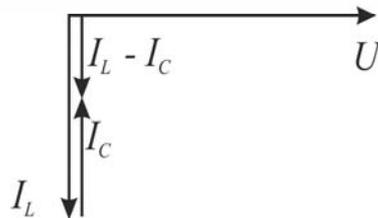


Рис. 5.4.9

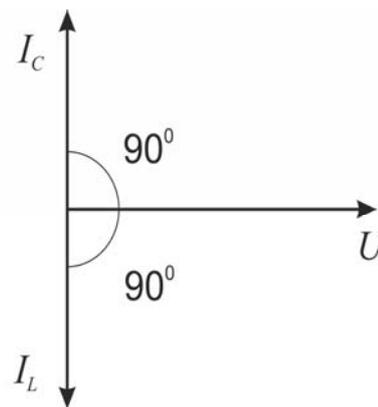


Рис. 5.4.10

Когда $I_C > I_L$, т.е. преобладает ток конденсатора, общий ток цепи I является по характеру емкостным и опережает напряжение U на 90° (рис. 5.4.8).

Когда $I_C < I_L$, т.е. преобладает ток катушки, общий ток цепи I является индуктивным и отстает от напряжения U на 90° (рис. 5.4.9).

Когда же $I_C = I_L$ и общий ток цепи равен нулю, имеет место резонанс токов (векторная диаграмма рис. 5.4.10)

Эти рассуждения проведены при пренебрежении потерями активной мощности в конденсаторе и катушке.

При резонансе токов реактивная проводимость цепи $B = B_L - B_C$ равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения

$$1/\omega L - \omega C = 0$$

откуда так же, как и при резонансе напряжений,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полная проводимость при резонансе токов оказывается близкой к нулю. Остается некомпенсированной лишь небольшая активная проводимость, обусловленная активным сопротивлением катушки и несовершенной изоляцией конденсатора. Поэтому ток в неразветвленной части цепи имеет минимальное значение, тогда как токи I_C и I_L могут превышать его в десятки раз.

Частотными характеристиками обычно называют зависимости сопротивлений и проводимостей цепи от частоты синусоидального приложенного напряжения. Иногда к ним относят также зависимости от частоты

токов, напряжений, фазовых сдвигов и мощностей.

В последовательном резонансном контуре (рис. 5.4.11а) активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, ёмкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$X_L(\omega) = \omega L, X_C(\omega) = 1/\omega C, X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega).$$

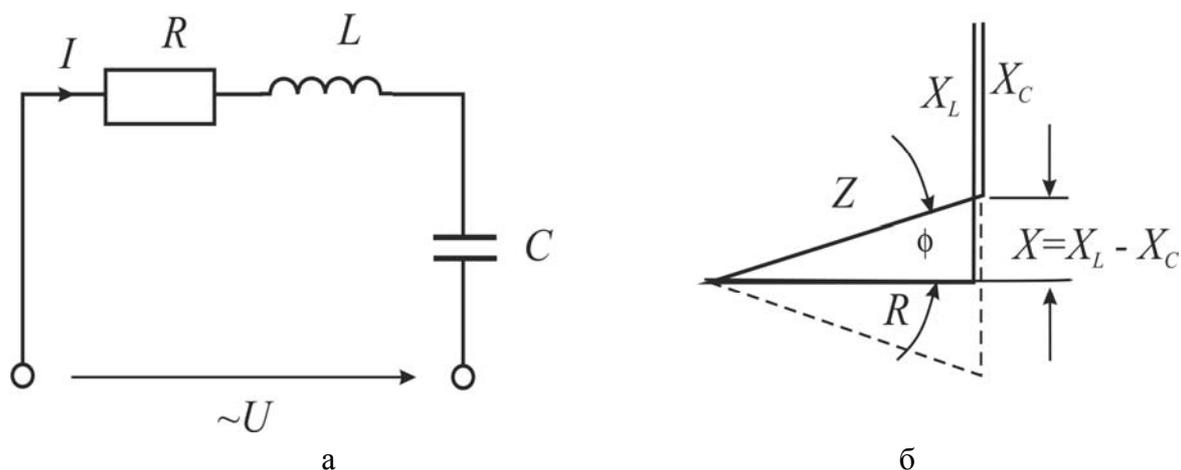


Рис. 5.4.11

Полное сопротивление, как следует из треугольника сопротивлений (рис. 5.4.11б): $Z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$. Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис. 5.4.12а. При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ величина $\rho = X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) = \sqrt{L/C}$ называется характеристическим сопротивлением резонансного контура, а величина $Q = \rho/R$ – добротностью резонансного контура.

На рис. 5.4.12б показаны графики изменения тока, напряжений на участках цепи и фазового сдвига при изменении частоты и неизменном приложенном напряжении в соответствии со следующими формулами:

$$I(\omega) = U/Z(\omega), U_L(\omega) = \omega LI(\omega), U_C(\omega) = I(\omega)/\omega C, \varphi = \arctg[\omega L - 1/(\omega CR)].$$

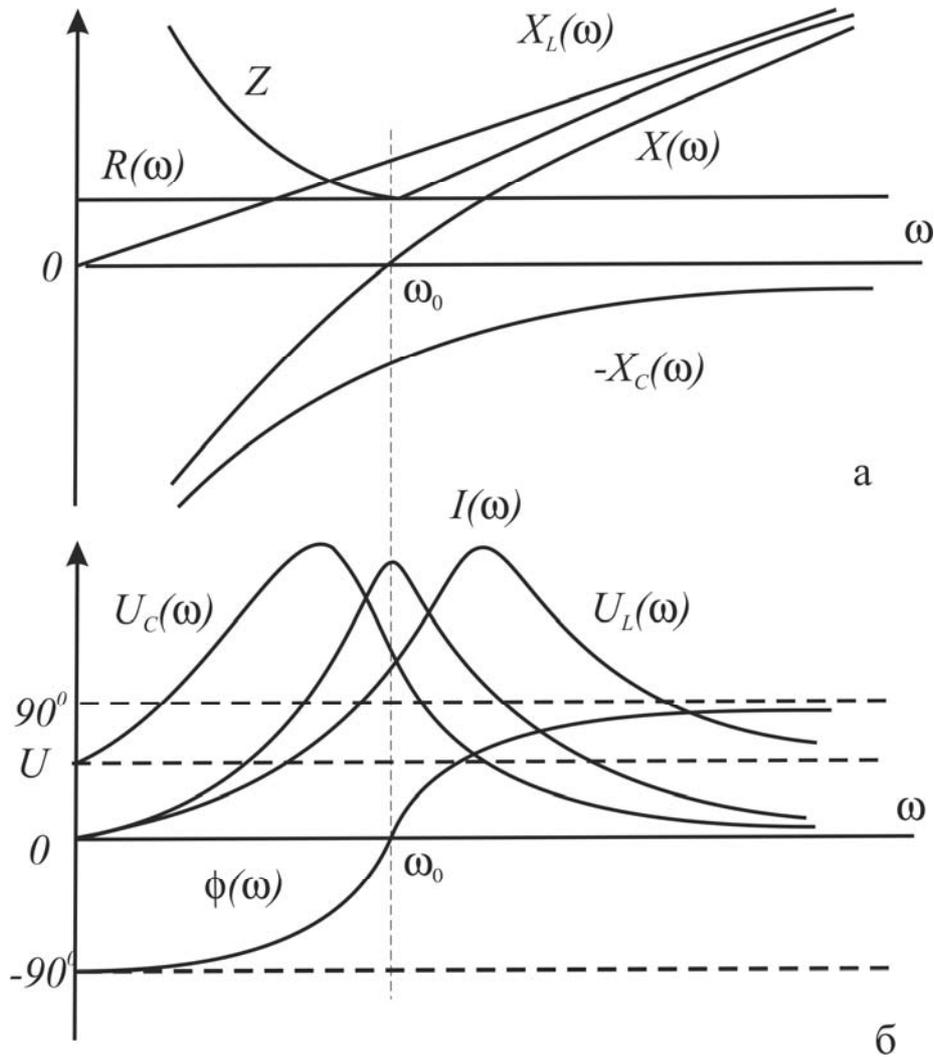


Рис. 5.4.12

Если $Q > 1$, то при резонансе напряжения $U_L(\omega_0)$ и $U_C(\omega_0)$ превышают приложенное напряжение в Q раз.

При $\omega < \omega_0$ цепь носит ёмкостный характер (ток опережает напряжение на угол ϕ), при $\omega = \omega_0$ – активный, а при $\omega > \omega_0$ – индуктивный (ток отстаёт от напряжения).

В параллельном резонансном контуре (рис. 5.4.13а) активная проводимость не зависит от частоты, а индуктивная, ёмкостная и реактивная проводимости изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$B_L(\omega) = 1/\omega L, B_C(\omega) = \omega C, B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega).$$

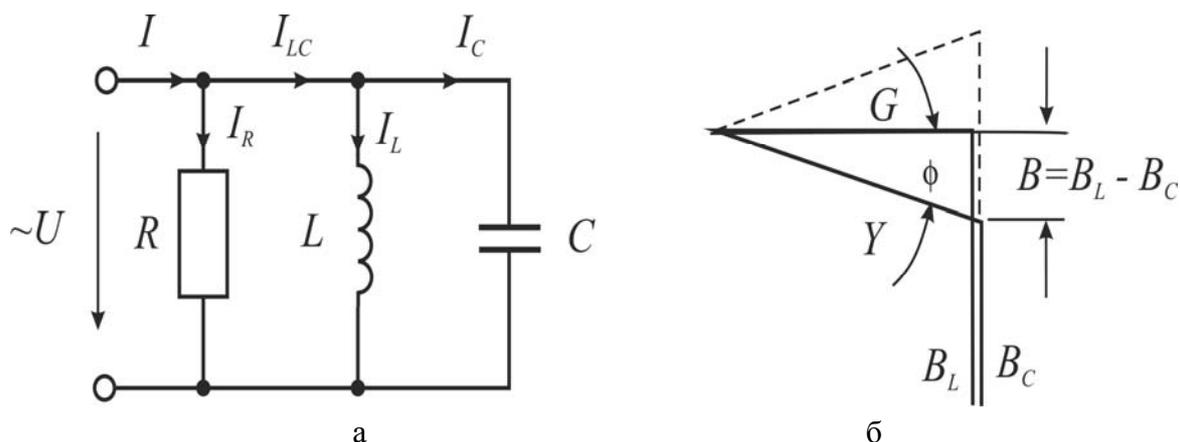


Рис. 5.4.13

Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей (рис. 5.4.13б):

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис. 5.4.14а. При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ величина $\gamma = B_L(\omega_0) = B_C(\omega_0) = \sqrt{C/L}$ называется характеристической проводимостью резонансного контура, а величина $Q = \gamma/G$ – добротностью.

При изменении частоты и неизменном приложенном напряжении токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega) = UY(\omega), I_L(\omega) = U/\omega L, I_C = U\omega C, I_{LC} = UB(\omega).$$

При резонансной частоте $\omega = \omega_0$ ток I , потребляемый от источника, имеет минимальное значение и равен току в активном сопротивлении I_R , а ток на реактивном участке цепи I_{LC} равен нулю (см. рис. 5.4.13а). Реальные кривые могут несколько отличаться от рассмотренных идеальных, так как здесь не учитывалось активное сопротивление катушки.

Угол сдвига фаз (рис. 5.4.13б) изменяется в соответствии с выражением

$$\varphi = \text{arctg}[(1/\omega L - \omega C)/G].$$

При $\omega < \omega_0$ цепь носит индуктивный характер (ток отстаёт от напряжения на угол φ), при $\omega = \omega_0$ – активный, а при $\omega > \omega_0$ – ёмкостный (ток опережает напряжение). Если $Q > 1$, то при резонансе токов $I_L(\omega_0)$ и $I_C(\omega_0)$ превышают ток источника I в Q раз.

На рис. 5.4.14б кроме $I(\omega)$ построены также зависимости от частоты

полного $Z(\omega)$ и реактивного $X(\omega)$ сопротивлений. В общем случае (см. сплошные линии на рисунке):

$$Z(\omega) = \frac{1}{Y(\omega)} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B^2}} \text{ и } X(\omega) = \frac{B}{G^2 + B^2}.$$

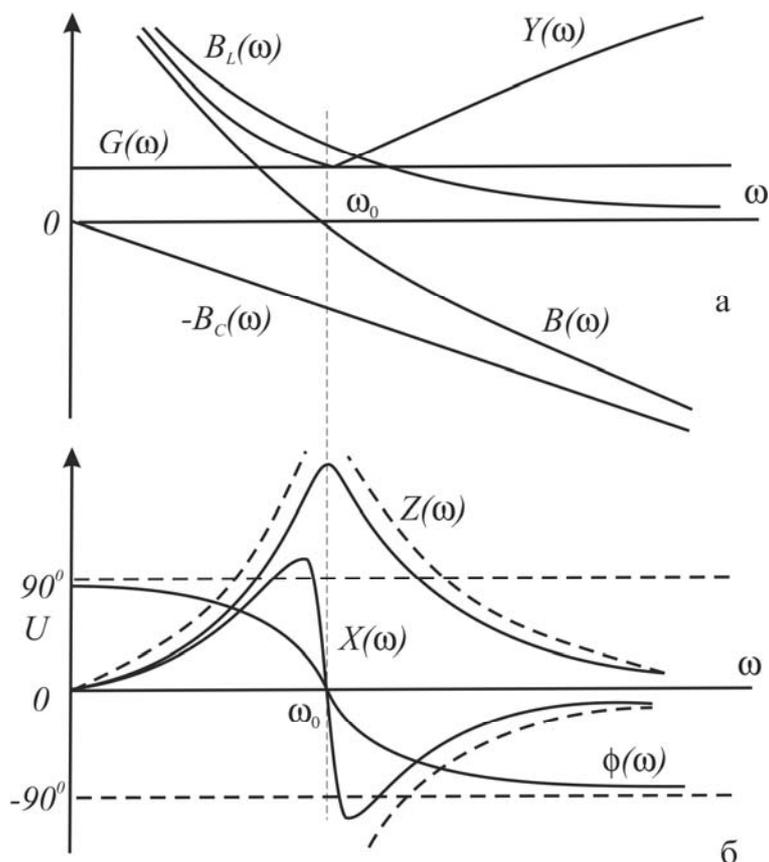


Рис. 5.4.14

При резонансе полное сопротивление принимает максимальное значение, а реактивное обращается в ноль.

В идеализированном случае, когда активная проводимость настолько мала, что ею можно пренебречь ($G=0$):

$$X(\omega) = 1/|B|; \quad Z(\omega) = 1/B.$$

Тогда в точке резонанса кривые $X(\omega)$ и $Z(\omega)$ имеют разрыв (см. пунктирные линии на рис. 5.4.14б).

Порядок выполнения работы

1. Измерьте токи, напряжения и мощность в разветвлённой цепи синусоидального тока. Расчётом проверьте баланс активных и реактивных мощностей.

- 1.1. Измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности 40 мГн:
 $R_K = \quad \text{Ом.}$
- 1.2. При частоте $f = 500$ Гц вычислите реактивные сопротивления катушки $L=40$ мГн и конденсатора $C=1$ мкФ:
 $X_L = 2\pi fL = \quad \text{Ом;}$
 $X_C = 1/(2\pi fC) = \quad \text{Ом.}$
- 1.3. Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.4.15), предусмотрев в ней переключки для измерения токов мультиметром. Подайте на схему синусоидальное напряжение 500 Гц и установите максимальную амплитуду, которую может дать генератор.

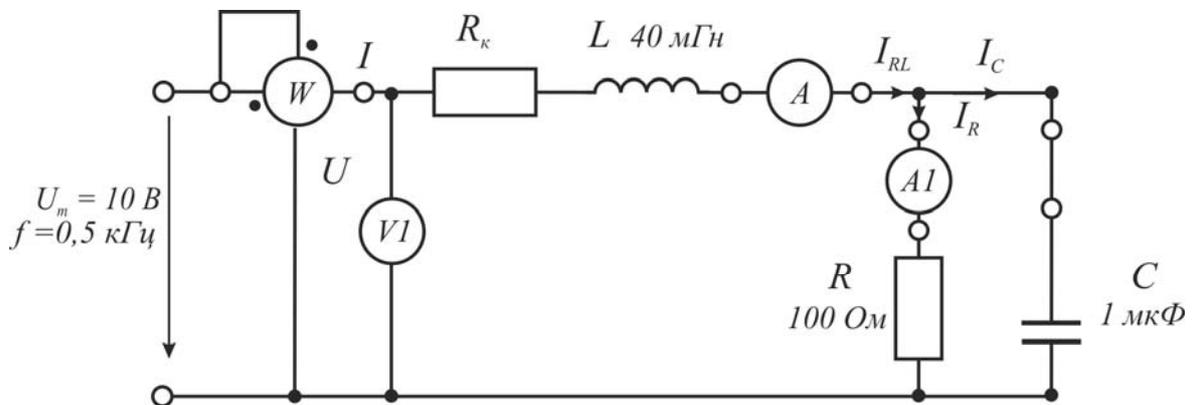


Рис.5.4.15

- 1.4. Запишите в табл. 5.4.1 значения токов I_{RL} , I_R , I_C и мощности, отдаваемой источником $P_{ИСТ}$. Вычислите $S_{ИСТ} = UI$ и $Q_{ИСТ} = \sqrt{S_{ИСТ}^2 - P_{ИСТ}^2}$ и запишите в таблицу значение $Q_{ИСТ}$.

Таблица 5.4.1

Ветвь	$R_K L$	R	C	Баланс мощностей, мВт, мВАр			
I , мА							
$P = I^2 R$, мВт			0	$P_{ИСТ}$		$P_{ПОТР}$	
$Q = I^2 X$, мВАр		0		$Q_{ИСТ}$		$Q_{ПОТР}$	

- 1.5. Вычислите по приведённым в таблице формулам значения активной и реактивной мощностей каждого потребителя. Вычислите сумму активных и алгебраическую сумму реактивных мощностей потребителей и проверьте баланс мощностей.

2. Для цепи с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности измерьте действующие значения тока I и напряжений U , U_C , U_L при $\omega = \omega_0$, $\omega > \omega_0$ и $\omega < \omega_0$. Постройте векторные диаграммы.

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.4.16), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение на его входе 2 В и частоту 500 Гц. В качестве элемента индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

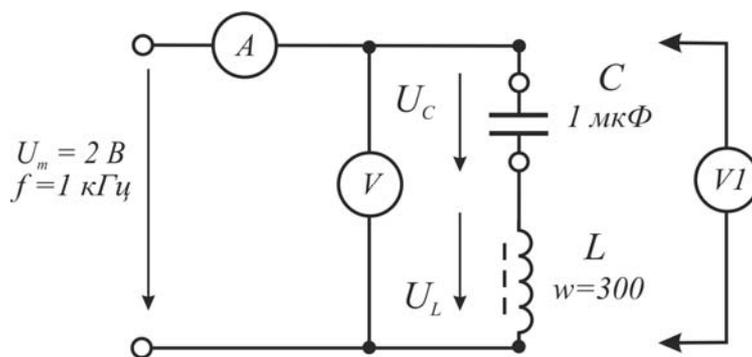


Рис. 5.4.16

2.2. Изменяя частоту приложенного напряжения, добейтесь резонанса по максимальному току.

2.3. Произведите измерения и запишите в табл. 5.4.2 результаты измерений при резонансе ($f=f_0$), при $f_1 = 0,75f_0$ и $f_2 = 1,25f_0$.

Таблица 5.4.2

f , Гц	I , мА	U , В	U_L , В	U_C , В
$f_0 =$				
$f_1 =$				
$f_2 =$				

2.4. Постройте в одинаковом масштабе векторные диаграммы для каждого из рассмотренных случаев.

3. Параллельное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе токов.

3.1. Для цепи с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности измерьте действующие значения напряжения U и

токов I , I_C и I_L при $\omega = \omega_0$, $\omega > \omega_0$ и $\omega < \omega_0$. Постройте векторные диаграммы.

- 3.2. Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.4.17), предусмотрев в ней переключки для измерения токов. Включите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U=7$ В, $f=500$ Гц. В качестве элемента индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

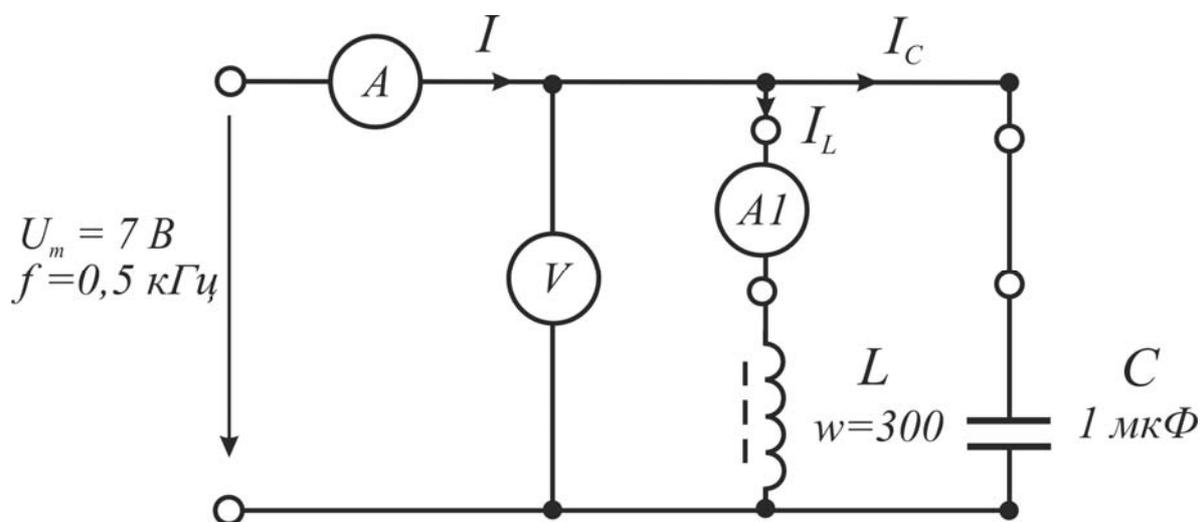


Рис. 5.4.17

- 3.3. Изменяя частоту приложенного напряжения, добейтесь резонанса по минимальному току I .
- 3.4. Произведите измерения при $f=f_0$, $f_1 = 0,75f_0$ и $f_2 = 1,25f_0$ и запишите результаты измерений в табл. 5.4.3.

Таблица 5.4.3

f , Гц	U , В	I , мА	I_L , мА	I_C , мА
$f_0 =$				
$f_1 =$				
$f_2 =$				

- 3.5. Постройте в одинаковом масштабе векторные диаграммы для каждого из рассмотренных случаев.
4. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.
- 4.1. Снимите экспериментально частотные характеристики последова-

тельного резонансного контура – $R(\)$, $X(\)$, $Z(\)$, $I(\)$, $U_L(\)$, $U_C(\)$ и $(\)$ – при $Q > 1$.

- 4.2. Измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности 40 мГн.

$R =$ Ом.

- 4.3. Вычислите резонансную частоту, характеристическое сопротивление и добротность резонансного контура при $C = 1$ мкФ и $L = 40$ мГн:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \text{Гц}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Ом}, \quad Q = \frac{\rho}{R} =$$

- 4.4. Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.4.18). Добавочное сопротивление $R_{доб}$ на этом этапе примите равным нулю, а сопротивление R – внутреннее сопротивление катушки индуктивности. Подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U = 5$ В, $f = f_0$.

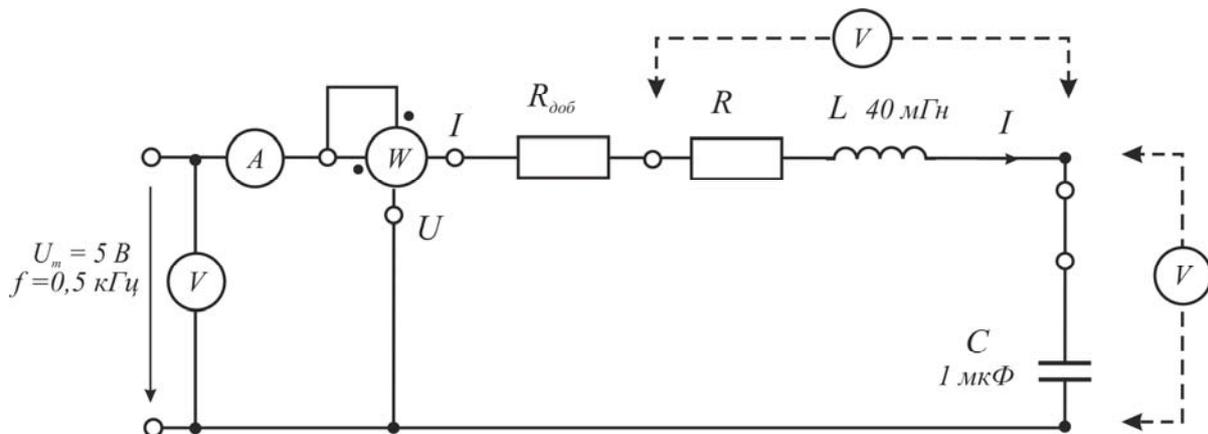


Рис. 5.4.18

- 4.5. Настройте более точно резонансный режим по максимуму тока, изменяя частоту приложенного напряжения. Сравните экспериментальную резонансную частоту с расчётной:

Экспериментальная $f_0 =$ Гц.

Расчётная $f_0 =$ Гц.

- 4.6. Изменяя частоту от 0,2 до 2 кГц, запишите в табл. 5.4.4 мощность, ток и напряжения на конденсаторе и на катушке индуктивности.

2. При каких условиях последовательный контур работает как избирательный усилитель напряжения?
3. Какого рода резонанс (токов или напряжений) наблюдается в параллельном колебательном контуре?
4. В каких устройствах применяется параллельный колебательный контур?

5.5. Лабораторная работа № 5

Трансформаторы

Цель: изучить физические процессы, происходящие в трансформаторе; определить основные характеристики и построить векторные диаграммы трансформатора.

Задачи:

1. Определить коэффициент магнитной связи между катушками.
2. Определить коэффициенты трансформации при различном количестве витков обмоток.
3. Прodelать опыт короткого замыкания.
4. Изучить преобразование сопротивлений с помощью трансформатора.
5. Определить параметры схемы замещения и построить векторную диаграмму трансформатора.
6. Снять экспериментально внешнюю характеристику и зависимость КПД от тока трансформатора, нагруженного на активное сопротивление.

Трансформатор состоит из двух или большего числа катушек (обмоток), магнитная связь между которыми обеспечивается с помощью ферромагнитного сердечника. Трансформаторы используются для преобразования и согласования напряжений, токов и сопротивлений, а также для развязывания электрических цепей (гальваническая развязка).

В идеальном трансформаторе потребляемая им мощность равна мощности, отдаваемой в нагрузку. В реальности, однако, имеют место потери мощности в меди обмоток (в омических сопротивлениях обмоток) и в сердечнике трансформатора, поэтому резистору нагрузки отдается только часть потребляемой трансформатором мощности.

Общие сведения

Чтобы обеспечить требуемую магнитную связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора, их помещают на общем сердечнике (рис. 5.5.1).

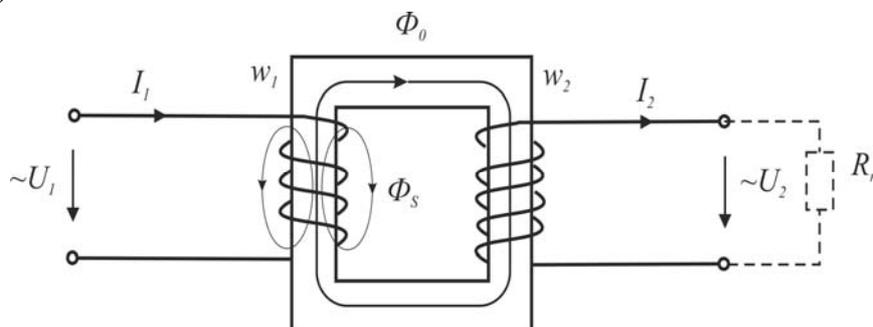


Рис. 5.5.1

Когда по первичной обмотке W_1 протекает ток I_1 , большая часть создаваемого им магнитного потока Φ_0 сцепляется также и с витками вторичной катушки W_2 . Однако часть создаваемого первой катушкой потока Φ_S замыкается, минуя вторую катушку. Эта часть потока называется потоком рассеяния.

Отношение $K_{CB} = \frac{\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_S}$ называется коэффициентом магнитной связи. Его можно выразить через напряжения U_1 и U_2 при холостом ходе и число витков:

$$K_{CB} = \frac{U_2 W_1}{U_1 W_2}$$

или через индуктивности и взаимную индуктивность: $K_{CB} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$.

В идеальном трансформаторе коэффициент связи стремится к единице, однако равным или больше единицы он быть не может.

Во избежание искажения сигналов при их трансформировании и для исключения преждевременного магнитного насыщения материала сердечника постоянным током иногда в сердечнике создают зазор из неферромагнитного материала. Но тогда коэффициент связи уменьшается.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки трансформатора называют коэффициентом трансформации.

Отношение чисел витков соответствует отношению первичного напряжения к вторичному при отсутствии нагрузки (холостом ходе) трансформатора и отношению вторичного тока к первичному при коротком замыкании.

В идеальном трансформаторе (т.е. при отсутствии потерь, при $K_{CB} = 1$ и бесконечно больших индуктивностях обмоток L_1 и L_2) при любой нагрузке выполняется условие:

$$K_{TP} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Когда трансформатор не нагружен (холостой ход), отношение первичного напряжения к вторичному приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Коэффициент трансформации:

$$K_{TP} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (5.5.1)$$

При нагрузке имеет место ток I_2 в нагрузочном резисторе R_H , подключенном к выводам вторичной обмотки. Этот ток вызывает появление соответствующего тока в первичной обмотке $I_1 = I_2 / K_{TP}$. Через первичные напряжение и ток можно найти входное сопротивление трансформатора $R_{BX} = U_1 / I_1$. Нагрузочное сопротивление можно определить как $R_H = U_2 / I_2$. Взяв отношение сопротивлений, получаем

$$R_{BX} / R_H = (U_1 / I_1) / (U_2 / I_2) = K_{TP}^2$$

или

$$R_{BX} = R_H K_{TP}^2.$$

Это означает, что сопротивление нагрузки R_H преобразуется к первичной стороне трансформатора. В реальном трансформаторе, если учесть сопротивление обмоток, R_{BX} получается несколько больше, чем $R_H K_{TP}^2$.

Ввиду наличия активных сопротивлений и магнитных потоков рассеяния выходное напряжение зависит от тока нагрузки. Эта зависимость называется внешней характеристикой. Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная или емкостная). По оси абсцисс откладывают обычно ток нагрузки в относительных единицах $I_2 / I_{2НОМ}$, а по оси ординат $U_2 / U_{2НОМ}$.

От нагрузки зависят потери мощности и КПД трансформатора. В случае активной нагрузки КПД имеет максимальное значение при

$$I_2/I_{2i\dot{i}} = \sqrt{P_{1X}/P_{1K}}.$$

При расчете электрических цепей с трансформаторами их чаще всего заменяют Т- или Г-образной схемой замещения, приведенной к первичной или вторичной стороне. Наиболее точной является Т-образная схема замещения. Она изображена на рис. 5.5.2а. Все сопротивления схемы приведены к первичной стороне.

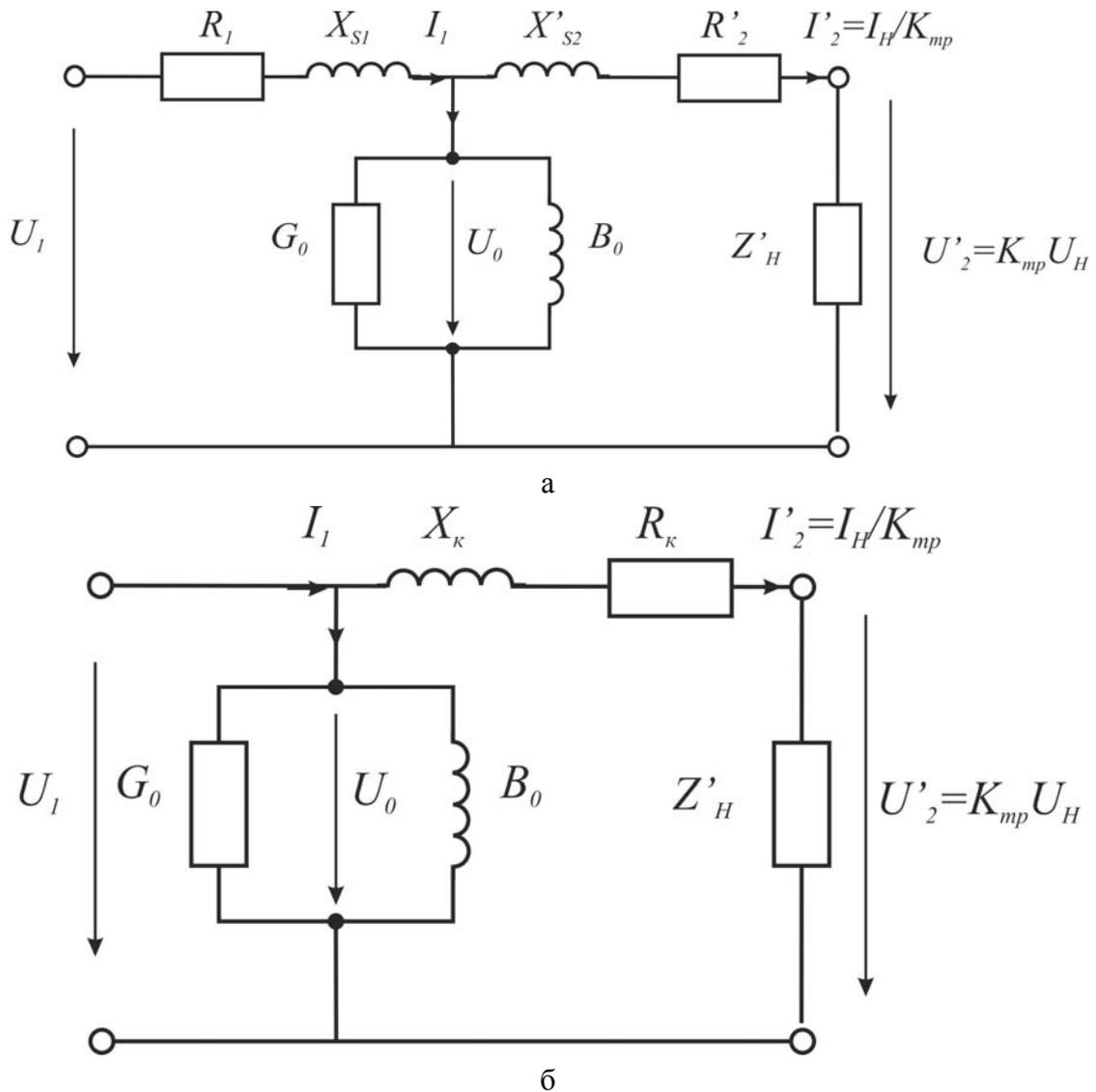


Рис. 5.5.2

В этой схеме:

G_0 – активная проводимость, учитывающая потери на вихревые токи и перемагничивание сердечника;

B_0 – реактивная проводимость, обусловленная основным магнитным потоком;

R_1 – активное сопротивление первичной обмотки, R'_2 – вторичной обмотки,

приведенные к первичной стороне ($R'_2 = K_{TP}^2 R_2$);

X_{S1} и X'_{S2} – реактивные сопротивления рассеяния обмоток ($X'_{S2} = K_{TP}^2 X_{S2}$);

Z'_H – сопротивление нагрузки ($Z'_H = K_{TP}^2 Z_H$).

Часто используется упрощённая Г-образная схема замещения (рис. 5.5.2б). В этой схеме сопротивления первичной и вторичной обмоток объединены:

$$R_K = R_1 + R'_2; \quad X_K = X_{S1} + X'_{S2}.$$

Параметры схемы замещения трансформатора определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода к первичной обмотке подводят напряжение $U_{1X} = U_{1НОМ}$, измеряют P_{1X} , I_{1X} и U_{1X} (вместо P_{1X} можно измерить φ_{1X} – угол сдвига фаз между входным напряжением и током).

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении U_{1K} , при котором токи обмоток достигают номинальных значений $I_{1K} = I_{1НОМ}$, $I_{2K} = I_{2НОМ}$. Измеряют P_{1K} (либо φ_{1K}), I_{1K} , U_{2K} , I_{2K} .

По этим данным определяют следующие параметры Г-образной схемы замещения:

Из опыта х.х.	Из опыта к.з.
$K_{TP} = U_{1X} / U_{2X}$, $Y_{1X} = I_{1X} / U_{1X}$	$K_{TP} = I_{2K} / I_{1K}$, $Z_{1K} = U_{1K} / I_{1K}$
$G_0 = Y_{1X} \cos \varphi_{1X}$, $B_0 = Y_{1X} \sin \varphi_{1X}$	$R_K = Z_{1K} \cos \varphi_{1K}$, $X_K = Z_{1K} \sin \varphi_{1K}$

Параметры Т-образной схемы вычисляют приближённо:

$$R_1 = R'_2 = R_K / 2 \text{ Ом}; \quad X_{S1} = X'_{S2} = X_K / 2 \quad (\text{Ом}).$$

Векторная диаграмма для схемы замещения строится исходя из уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Для Т-образной схемы в комплексной форме:

$$I_1 = I'_2 + I_0,$$

$$U_0 = U'_2 + R'_2 I'_2 + j X'_{S2} I'_2,$$

$$U_1 = U_0 + R_1 I_1 + j X_{S1} I_1.$$

Можно предложить следующую последовательность при построении (рис. 5.5.3).

В произвольно выбранном направлении строим вектор напряжения нагрузки $U'_2 = K_{TP} U_H$ и под углом φ_H к нему – вектор тока нагрузки $I'_2 = I_H / K_{TP}$ (см. рис. 5.5.3). На рисунке принято $\varphi_H > 0$, а опыт в данной лаборатор-

ной работе делается при $\phi_H = 0$. Из конца вектора U'_2 строим векторы $R'_2 I'_2$ (параллельно I'_2) и $X'_{s2} I'_2$ (перпендикулярно I'_2). Полученная сумма равна напряжению U_0 . Вектор магнитного потока Φ_0 отстает от него на 90° .

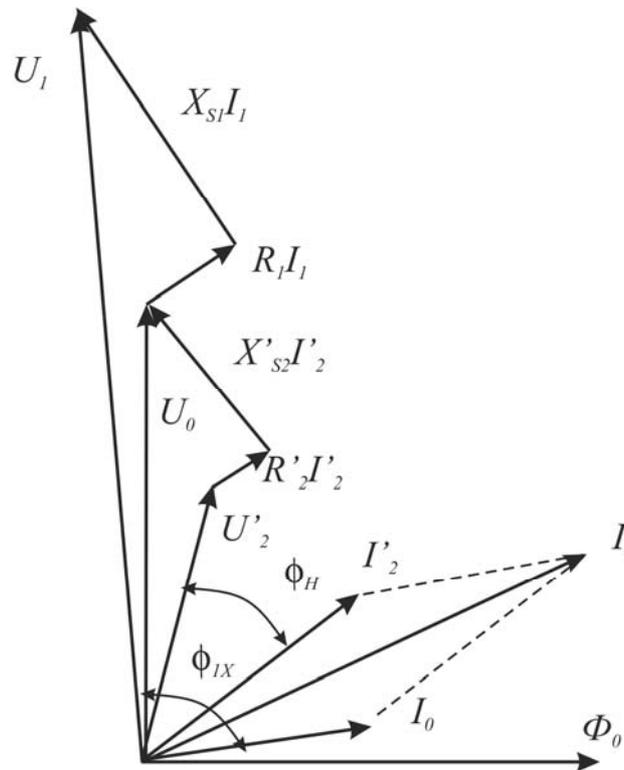


Рис. 5.5.3

Далее под углом ϕ_{1X} к вектору U_0 строим вектор I_0 I_{1X} и находим вектор тока I_1 как сумму I'_2 и I_0 .

Затем от конца вектора U_0 откладываем падения напряжений $R_1 I_1$ (параллельно I_1) и $X_{s1} I_1$ (перпендикулярно I_1) и находим U_1 как сумму этих трех векторов.

В лабораторной работе используются трансформаторы с разъемным сердечником и сменными катушками. Номинальные параметры этих трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. П.4 приложения.

Порядок выполнения эксперимента

1. Измеряя напряжения, определите коэффициент магнитной связи между катушками:

- 1) при наличии замкнутого сердечника, 2) при наличии сердечника с зазором, 3) при наличии половины сердечника, 4) при отсутствии сердечника.

- 1.1. Разместите первичную и вторичную катушки, имеющие по 900 витков каждая, на разъемном сердечнике, состоящем из двух половин, как показано на рис. 5.5.4.

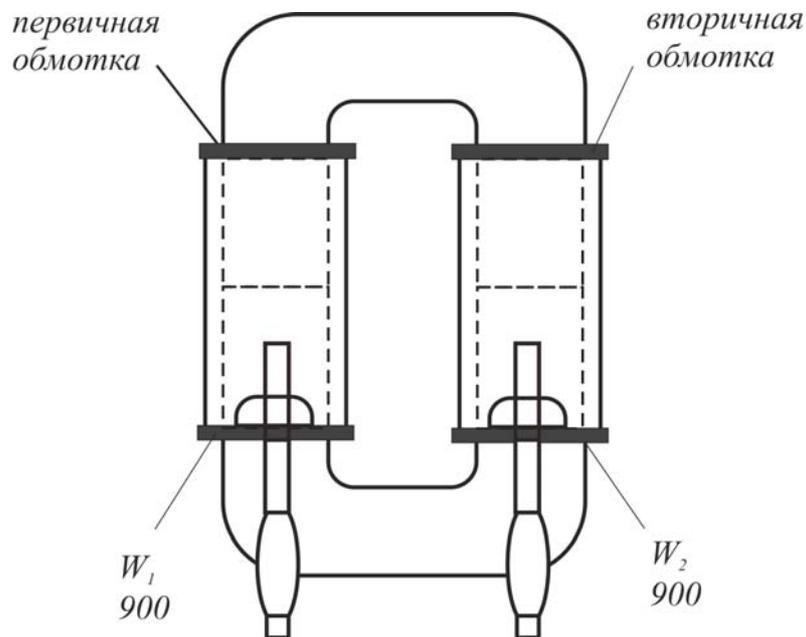


Рис. 5.5.4

- 1.2. Подсоедините источник синусоидального напряжения к выводам первичной обмотки согласно схеме (рис. 5.5.5) и установите напряжение $U_1 = 6...7$ В, $f = 1$ кГц.

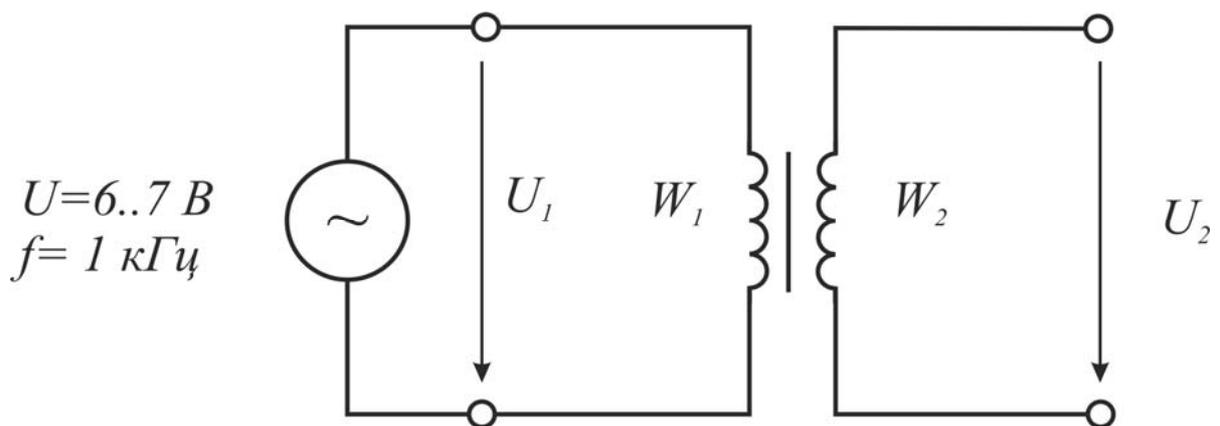


Рис. 5.5.5

- 1.3. Измерьте мультиметром первичное и вторичное напряжения и занесите результат в табл. 5.5.1 (строка «При наличии замкнутого сердечника»). Вычислите K_{CB} .

Таблица 5.5.1

	U_1 , В	U_2 , В	$K_{CB}=U_2/U_1$
При наличии замкнутого сердечника			
При наличии сердечника с воздушным зазором			
При наличии половины сердечника			
При отсутствии сердечника			

- 1.4. Для образования зазора в магнитопроводе поместите квадратики плотной бумаги между верхней и нижней половинами разъемного сердечника и повторите опыт.
- 1.5. Удалите одну подкову разъемного сердечника и снова повторите измерения.
- 1.6. Удалите сердечник полностью и заполните последнюю строку табл. 5.5.1.
2. Изменяя напряжения и токи, определите коэффициенты трансформации при различных числах витков обмоток.
 - 2.1. Соберите первичную (300 витков) и вторичную (100 витков) обмотки на разъемном сердечнике, как показано на рис. 5.5.6.

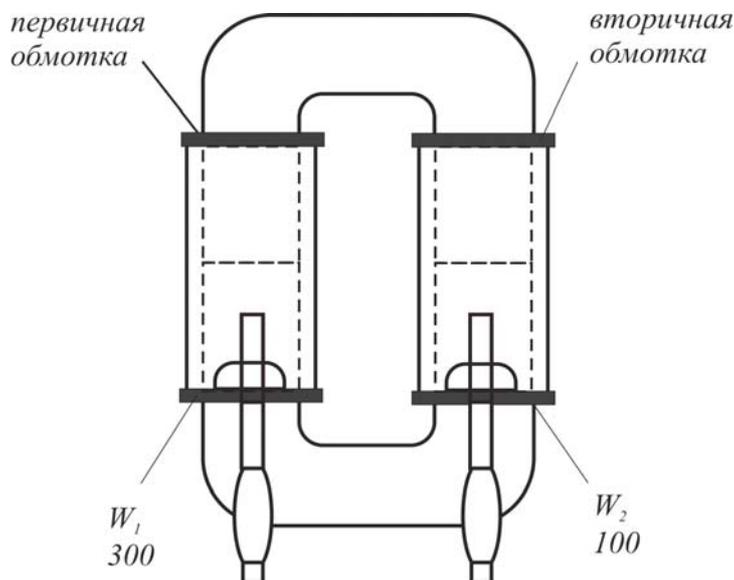


Рис. 5.5.6

- 2.2. Подключите источник питания к выводам первичной обмотки согласно рис. 5.5.7 и установите синусоидальное напряжение $U_1 = 6$ В, $f = 1$ кГц.

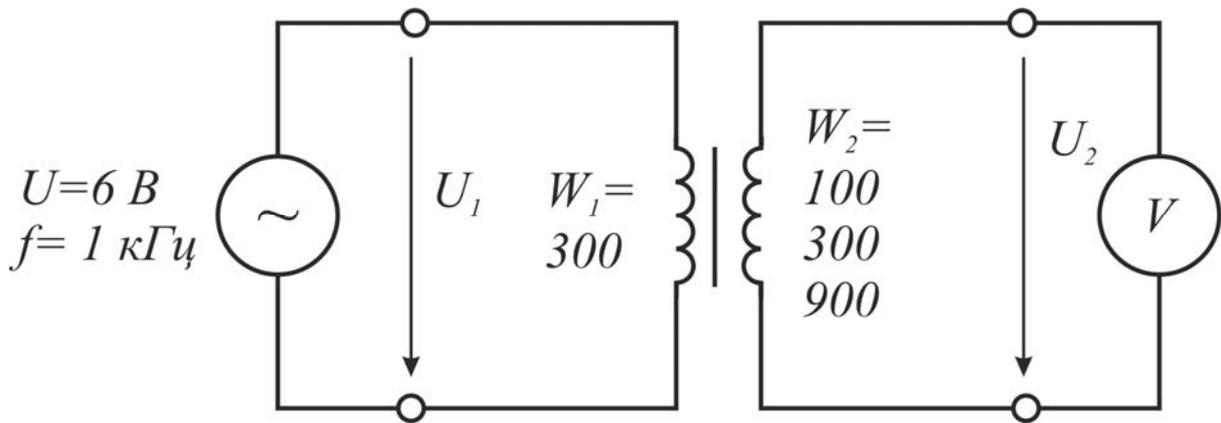


Рис. 5.5.7

2.3. Измерьте вторичные напряжения U_2 на выводах вторичных обмоток с числами витков 100, 300 и 900 при холостом ходе. Занесите результаты в табл. 5.5.2.

Таблица 5.5.2

W_1	W_2	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$K_{ТР}$
300	100	6		
300	300	6		
300	900	6		

2.4. Вычислите значения коэффициента трансформации по формуле (5.5.1)

3. Прделайте опыт короткого замыкания, измерив первичные и вторичные токи при числах витков вторичной обмотки 100, 300 и 900, как показано на рис. 5.5.8 и занесите результаты измерений в табл. 5.5.3. Ток I_1 следует поддерживать неизменным, равным 50 мА.

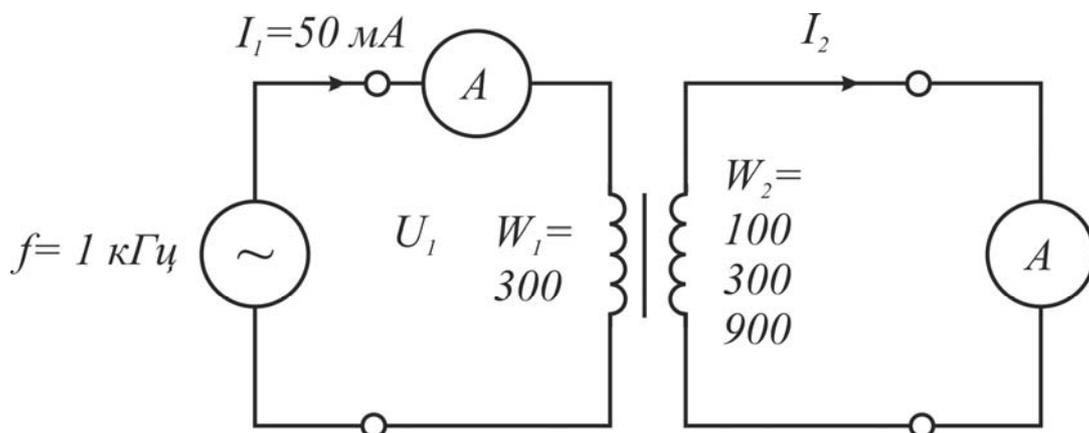


Рис. 5.5.8

Таблица 5.5.3

W_1	W_2	I_1 , мА	I_2 , мА	K_{TP}
300	100	50		
300	300	50		
300	900	50		

Вычислите коэффициент трансформации тока по формуле $K_{TP} = \frac{I_2}{I_1}$.

4. Преобразование сопротивлений с помощью трансформатора.

- 4.1. Определите величины сопротивлений R_{BX} и R_H , измеряя токи и напряжения на первичной и вторичной сторонах трансформатора при различных соотношениях чисел витков обмоток и значениях сопротивления нагрузки R_H . Определите входное сопротивление как $R_H K_{TP}^2$ и сравните его с R_{BX} .
- 4.2. Соберите трансформатор на разъемном сердечнике с катушками, имеющими числа витков $W_1 = 300$ и $W_2 = 100$.
- 4.3. Подключите источник питания, как показано на рис. 5.5.9, и установите синусоидальное напряжение $U_1 = 6$ В, $f = 1$ кГц (при $R_H = 10$ Ом).

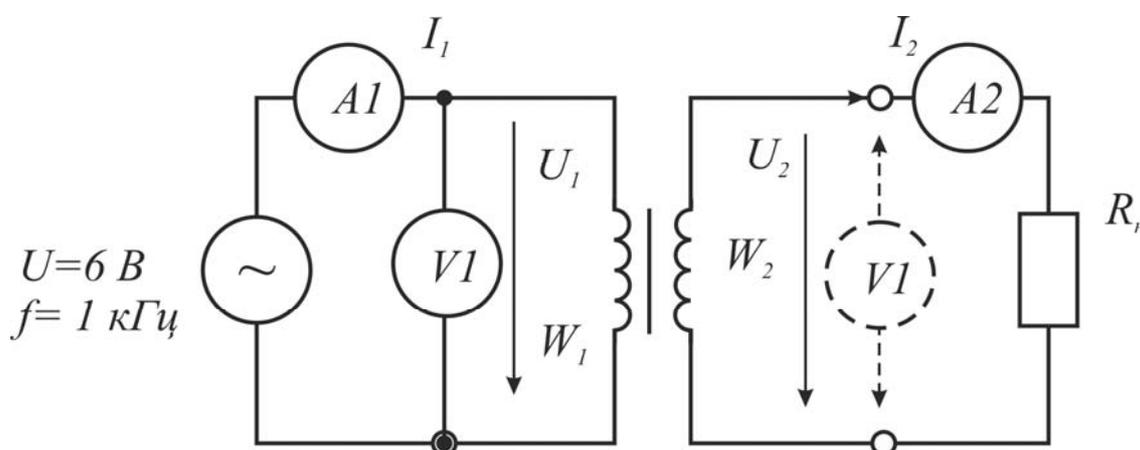


Рис. 5.5.9

- 4.4. Измерьте токи и напряжения при числах витков обмоток и сопротивлениях нагрузки согласно табл. 5.5.4.

Таблица 5.5.4

W_1	W_2	K_{TP}	R_H , Ом	U_1 , В	U_2 , В	I_1 , мА	I_2 , мА	R_{BX} , Ом	R_H , Ом	$R_H K_{TP}^2$
300	100	3	10							
300	300	1	100							
300	900	0,33	1000							

- 4.5. Вычислите сопротивления R_{BX} и R_H по формуле $R = U/I$.
- 4.6. Затем вычислите входное сопротивление по формуле $R_H K_{TP}^2$ и сравните его со значениями, найденными как U_1/I_1 .
5. Определение параметров схемы замещения и построение векторной диаграммы трансформатора.
- 5.1. Проведите опыты холостого хода и короткого замыкания, определите параметры Т-образной схемы замещения, сделайте измерения первичных и вторичных величин при заданной нагрузке и постройте векторную диаграмму.
- 5.2. Соберите трансформатор с числом витков $W_1 = 300$, $W_2 = 100$, 300 или 900 по указанию преподавателя.
- 5.3. Соберите цепь по схеме (рис. 5.5.10). Сопротивление $R_{ДОБ}$ служит для ограничения тока в опыте короткого замыкания, и в первом опыте нужно вставить вместо него перемычку.

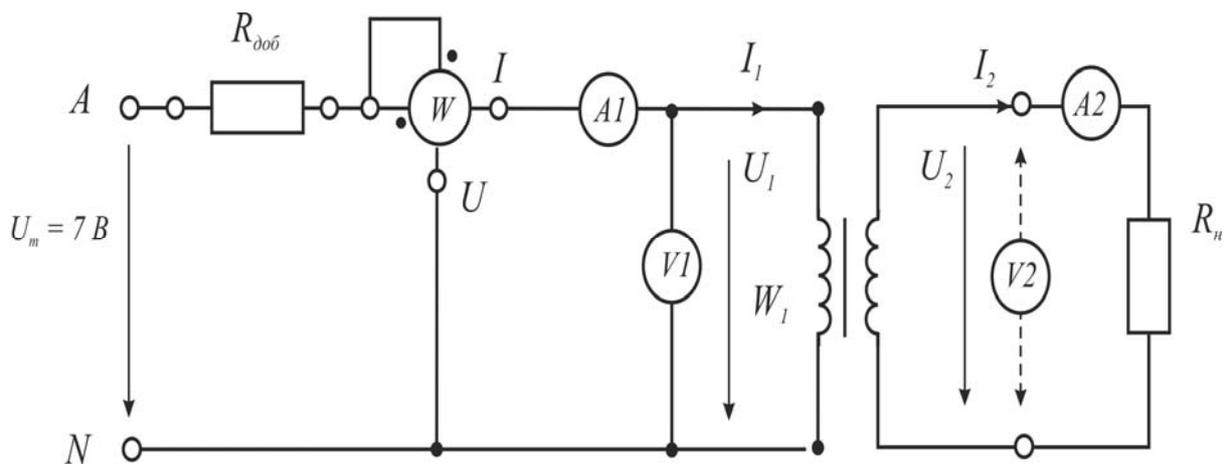


Рис. 5.5.10

- 5.4. Сделайте измерения при холостом ходе ($R_H = \quad$) и запишите результаты в табл. 5.5.5. Вычислите разность фаз: $\varphi = \arccos [P_1 / (U_1 I_1)]$, коэффициент трансформации U_1/U_2 и тоже запишите их значения в табл. 5.5.5.

Таблица 5.5.5

	U_1 , В	U_2 , В	I_1 , мА	I_2 , мА	P_1 , Вт	φ , град.	U_1/U_2	I_2/I_1
Опыт х.х.								-
Опыт к.з.							-	
Нагрузочный режим								

5.5. Прделайте опыт короткого замыкания. Для этого вставьте добавочное сопротивление $R_{ДОБ} = 22$ Ом и перемычку между выходными зажимами вместо R_H . Подберите более точно $R_{ДОБ}$ так, чтобы ток I_1 был примерно (с точностью $\pm 5\%$) равен номинальному току (200 мА) обмотки 300 витков. Для этого можно использовать параллельное или последовательное соединение сопротивлений, имеющихся в наборе. Запишите результаты измерений.

Вычислите угол φ_1 , коэффициент трансформации I_2/I_1 и тоже запишите в табл. 5.5.5.

5.6. Замените $R_{ДОБ}$ снова на перемычку и подберите сопротивление R_H так, чтобы токи были близки к номинальным (с точностью $\pm 20\%$). Сделайте измерения и вычислите φ_1 , U_1/U_2 , I_2/I_1 и запишите результаты в таблицу.

Сделайте расчет параметров Т-образной схемы замещения трансформатора и запишите результаты в табл. 5.5.6.

Таблица 5.5.6

Из опыта х.х.		Из опыта к.з.	
$K_{TP} = U_{1X}/U_{2X} =$		$K_{TP} = I_{2K}/I_{1K} =$	
$Y_{1X} = I_{1X}/U_{1X} =$	1/Ом	$Z_{1K} = U_{1K}/I_{1K} =$	Ом
$G_0 = Y_{1X} \cos \varphi_{1X} =$	1/Ом	$R_K = Z_{1K} \cos \varphi_{1K} =$	Ом
$B_0 = Y_{1X} \sin \varphi_{1X} =$	1/Ом	$X_K = Z_{1K} \sin \varphi_{1K} =$	Ом

Сделайте необходимые расчеты и постройте на рис. 5.5.11 векторную диаграмму в нагрузочном режиме. Сравните величину напряжения U_1 , полученную построением, с измеренным значением.

дайте измерения U_2 , I_2 и P_1 , рассчитайте $P_2 = U_2 I_2$, $I_2/I_{2НОМ}$, $U_2/U_{2НОМ}$, КПД и постройте графики. (Номинальные параметры обмоток указаны в табл. П.4. приложения)

Таблица 5.5.7

R_H , Ом	U_2 , В	I_2 , мА	P_1 , мВт	P_2 , мВт	$U_2/U_{2НОМ}$	$I_2/I_{2НОМ}$	КПД
х.х.							
330							
220							
100							
47							
22							

Примечание. В табл. 5.5.7 указаны значения сопротивлений R_H для случая, когда $W_1 = W_2 = 300$ витков. При $W_2 = 900$ витков их надо увеличить, а при $W_2 = 100$ – уменьшить в 10 раз. Поскольку в наборе нет сопротивлений меньше 10 Ом, можно использовать в качестве активных сопротивлений катушки трансформаторов (без сердечника). Их сопротивления указаны в табл. П.4. приложения.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «трансформатор», «идеальный трансформатор».
2. Что такое активная мощность? Какова ее природа?
3. Что такое согласованный режим работы цепи?
4. Чему равен КПД электрической цепи в согласованном режиме нагрузки?
5. Как КПД линии электропередач зависит от сопротивления линии?

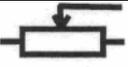
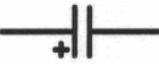
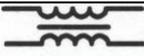
Список литературы

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи : учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. –7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2002. – 528 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электромагнитное поле : учебник для студентов вузов / Л. А. Бессонов. –7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 2001. – 231 с.
3. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. В 2-х т. Т. 1 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 536 с.
4. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов : в 3 ч. Ч. I. Линейные электрические цепи. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 592 с.

Приложение

Таблица П.1

Условные обозначения основных элементов электрических цепей

Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
Источники электрической энергии: Источник напряжения (ЭДС) постоянного тока (идеальный)		Проводники электрической цепи: Одиночный	
Источник постоянного тока (идеальный)		Пересекающиеся, несоединенные	
Гальванический элемент или аккумулятор		Пересекающиеся, соединенные	
Источник напряжения (ЭДС) синусоидального тока			
Резисторы: Постоянный линейный		Выключатели: Однополюсные	
Переменный линейный		Двухполюсные	
Нелинейный			
Индуктивности: Линейная		Конденсаторы Общее обозначение	
С разомкнутым магнитопроводом		Полярный (электролитический)	
С магнитопроводом		Нелинейный	
Трансформатор			
Транзисторы: Биполярный		Диоды	

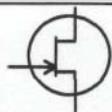
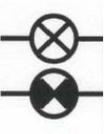
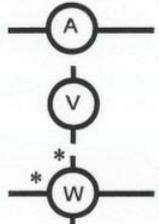
Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
Униполярный (полевой)			
Лампы накаливания: осветительная сигнальная		Измерительные приборы: амперметр вольтметр ваттметр	

Таблица П.2

Базовые электрические величины и их единицы измерения

Величина	Обозначение	Единица измерения	Кратные используемые
Заряд	Q	1 К = 1 Кулон	мК
Ток	I	1 А = 1 Ампер	мА, мкА
Напряжение, ЭДС	U, E	1 В = 1 Вольт	мВ, кВ
Сопротивление	R	1 Ом	кОм, МОм
Проводимость	G	1 См = 1 Сименс	
Индуктивность	L	1 Гн = 1 Генри	мГн, мкГн
Емкость	C	1 ф = 1 Фарад	мкФ, нФ, пФ

Таблица П.3

Состав набора миниблоков

Наименование и характеристики	Кол-во	Наименование и характеристики	Кол-во
Резисторы МЛТ, 2 Вт, ±5 %		Индуктивности	
10 Ом	1	10 мГн, 90 мА	1
22 Ом	2	40 мГн, 65 мА	1
33 Ом	1	100 мГн, 50 мА	2
47 Ом	1	Тумблер МТД-1, 250 В, 2 А	1
100 Ом	1	Лампа сигнальная СМН-10 55	1
150 Ом	1	Термистор РТС 50 Ом	1
220 Ом	1	Термистор NTC 6,8 кОм	1
330 Ом	1	Варистор S07K11, 18 В, 1 мА	1
470 Ом	1	Фоторезистор СФЗ-4Б	1
680 Ом	1	Диоды КД 26 (1N5408) 1А, 100 В	6
1 кОм	3	Стабилитрон КС510А, 10 В	1
2,2 кОм	1	Светодиод АЛ 307 Б	1
4,7 кОм	1	Варикап КВ 105А, 20 мА	1

Наименование и характеристики	Кол-во	Наименование и характеристики	Кол-во
10 кОм	2	Диодистор (диодный тиристор)	1
22 кОм	1	КН 102Б	
33 кОм	1	Транзисторы биполярные	
47 кОм	1	КТ502 Г (р-п-р)	1
100 кОм	2	КТ503 Г (п-р-п)	1
1 МОм	1	Транзисторы униполярные	
Потенциометры СП4-2М		КП303Е (с каналом п-типа)	1
1 кОм	1	КП101Е (с каналом р-типа)	1
10 кОм	1	Транзистор однопереходный	
Конденсаторы К-73-9, 100 В		КТ117Г	1
0,01 мкФ	1	Операционный усилитель	
0,1 мкФ	1	КР 140 УД 608А	1
Конденсаторы К73-17, 63 В			
0,22 мкФ	1		
0,47 мкФ	1		
1 мкФ	1		
Конденсаторы электролитические	1		
SR-63В 10 мкФ	1		
SR-63В 100 мкФ	1		
SR-35 В, 470 мкФ			

Таблица П.4

Параметры обмоток трансформатора

W	U _H , В	I _H , мА	R, Ом	S _H , ВА
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

Учебное издание

С. Г. Новиков, Е. В. Лычагин, А. С. Кадочкин, С. В. Елисеева

Цепи переменного тока

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Электротехника и электроника»

Директор Издательского центра *Т.В. Филиппова*
Редактирование, подготовка оригинал-макета *Е.П. Мамаевой*
Оформление обложки *Н.В. Пеньковой*

Подписано в печать 20.08.2014. Формат 60 84/16
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд. л. 3,8
Тираж 100 экз. Заказ № 82/

Оригинал-макет подготовлен в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42

Отпечатано с оригинал-макета в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42